

Untersuchungen zu 3D-Messverfahren auf der Basis von Speckle-Beleuchtung

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades doctor
rerum naturalium (Dr. rer. nat.) vorgelegt dem Rat der
Physikalisch-Astronomischen Fakultät der
Friedrich-Schiller-Universität Jena



FRIEDRICH-SCHILLER- UNIVERSITÄT JENA

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Physikalisch-Astronomische Fakultät
Institut für Angewandte Optik und Biophysik

eingereicht von: Andreas Walter Stark <andreas.stark@uni-jena.de>
geboren am: 27. Februar 1989 in Neubrandenburg
eingereicht am: 8. April 2021

1. Gutachter: Prof. Dr. R. Kowarschik

2. Gutachter: Prof. Dr. G. Häusler

3. Gutachter: Prof. Dr. W. Osten

Datum der Disputation: 12.10.2021

Zusammenfassung

In dieser Dissertation werden 3D-Messverfahren vorgestellt und untersucht, die auf die aktive Musterprojektion statistischer, kohärenter Muster, sogenannter "objektiver Speckles", gestützt sind. Optische 3D-Messverfahren ermöglichen die kontaktlose, flächige und schnelle Bestimmung der Oberflächenkoordinaten von Objekten. Die Verwendung aktiver, kohärenter Beleuchtung durch objektive Speckles erlaubt darüberhinaus eine hohe Lichtintensität, den Einsatz von Spektralfiltern zur Unterdrückung von Umgebungslicht und große Messvolumina, da Speckles über einen axialen Bereich $> 10\text{ m}$ einen hohen Kontrast zeigen. Durch die Abbildung kohärent beleuchteter Flächen entsteht jedoch ein kohärentes Rauschen, das "subjektive Speckles" genannt wird und die 3D-Rekonstruktion erschwert. Bisher verwendete Methoden, dieses Rauschen zu reduzieren, führten u.a. zu einer Verkleinerung des axialen Bereiches, in dem die Muster einen hohen Kontrast besaßen. Im Rahmen dieser Arbeit werden zum einen experimentelle und numerische Verfahren präsentiert, die in der Lage sind, den Kontrast subjektiver Speckles, ohne Änderungen in der Beleuchtung zu reduzieren, und zum anderen neue Anwendungen der Speckle-Projektion vorgestellt. Experimentell werden dazu Spiegel eingesetzt, die auf Piezoaktuatoren befestigt sind und so eine, im Vergleich zur Messgeschwindigkeit schnelle, periodische Bewegung ausführen können. Die zur Messung verwendeten Kameras beobachten das Messvolumen über diese Spiegel. Deren periodische Bewegung mittelt subjektive Speckle-Verteilungen und führt so letztlich zur Steigerung der Präzision und der Vollständigkeit der rekonstruierten 3D-Punktwolken. Auch numerische Mittelungsverfahren wurden gefunden, in Simulationen und im Experiment untersucht und in Bezug auf ihr Verbesserungspotential bewertet.

Die Vermessung von im sichtbaren Bereich des Lichtes spiegelnd oder transparent wirkenden Oberflächen, wie Edelstahl oder Glas, war bisher kaum durch die Stereophotogrammetrie möglich. Die Verwendung einer Speckle-Beleuchtung im ultravioletten Bereich des Lichtes, in diesem Fall bei einer Wellenlänge von 266 nm , ermöglicht es, derartige Oberflächen in ihrer Form mit höherer Präzision und Vollständigkeit rekonstruieren zu können als im sichtbaren Bereich des Lichtes.

Die speckle-basierte 3D-Messung mit nur einer Kamera war bisher nicht möglich, da Sequenzen von Speckle-Verteilungen im Allgemeinen nicht reproduzierbar waren. In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, diese Muster wiederholbar zu generieren, sodass die 3D-Messung möglich ist. Dieses Verfahren wird soweit miniaturisiert, dass ein funktionsfähiger Messkopf mit einem Durchmesser $< 3\text{ cm}$ erstellt und so schwer zu erreichende Messvolumina zugänglich gemacht werden.

Abstract

In this dissertation, 3D-measuring methods are presented and investigated which are based on the active pattern projection of statistical, coherent structures, so-called "objective speckles". Optical 3D-measuring processes enable the contactless, areal and fast determination of the surface coordinates of objects. The use of active coherent illumination such as objective speckles also allows high light intensity, the application of spectral filters to suppress ambient light and large measurement volumes, since speckles possess a large contrast over an axial range $> 10 m$. However, the imaging of coherently illuminated surfaces creates a coherent noise called "subjective speckles" that hinders the 3D-reconstruction. Up to now, the methods used to reduce this noise have led to, among other disadvantages, a reduction in the axial range in which the patterns had a high contrast.

Within the scope of this work at first experimental and numerical methods are presented which are able to reduce the contrast of subjective speckles without any changes in the illumination process and moreover resultingly in no changes to the range of high contrast of objective speckles. Furthermore new applications of speckle projection based 3D-measurement are introduced. For the first purpose, mirrors are used experimentally, which are attached to piezo actuators and thus are able to carry out a periodic movement that is fast compared to the measuring speed. The cameras observe the measurement volume via these mirrors. Their periodic movement leads to an averaging of the subjective speckle distributions and ultimately to an increase in precision and completeness of the reconstructed 3D-point clouds. Numerical averaging methods are also found, examined in simulations and in experiments, and evaluated with regard to their potential for improvement of the 3D-reconstruction process.

The measurement of surfaces that appear reflective or transparent in the visible range of light, such as stainless steel or glass, has so far been hardly possible using stereo photogrammetric methods. By using speckle illumination in the ultraviolet range of light, in this case at a wavelength of $266 nm$, it is shown in this Thesis that the shape of such surfaces can be reproduced with greater precision and completeness than in the visible range of light.

The speckle-based 3D-measurement with only one camera was previously not possible because speckle patterns were generally not repeatable. In this Thesis, a method is presented to generate these patterns in such a reproducible manner that 3D-measurements become obtainable. In addition, this process is miniaturized to such an extent that a functional 3D-measuring head with a diameter $< 3 cm$ is created and so hard-to-reach measurement volumes are made accessible.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	i
Symbolverzeichnis	i
1 Einleitung und Motivation	1
2 Grundlagen	4
2.1 3D -Vermessung	4
2.1.1 Stereophotogrammetrie	5
2.1.2 Epipolargeometrie	8
2.1.3 Zeitliche Korrelationsuche	10
2.1.4 3D -Messung mit einer Kamera und mehreren Beleuchtungszentren	12
2.2 Speckles	14
2.2.1 Speckle-Statistik	14
2.2.2 Objektive und subjektive Speckles	20
3 Reduktion subjektiver Speckles	26
3.1 Experimentelle Reduktionsverfahren	27
3.2 Numerische Reduktionsverfahren	33
3.2.1 Filterarten und Simulation	33
3.2.2 Anwendung im Experiment	43
3.3 Zusammenfassung	57
4 Speckle-basierte 3D -Vermessung im UV	60
4.1 Kalibrierung und Charakterisierung eines stereophotogrammetrischen Systems im UV-Bereich	61
4.2 Vermessung einer im VIS reflektierenden Freiformoberfläche aus Edelstahl .	66
4.3 Vermessung von im VIS transparenten Oberflächen aus Glas	72
4.3.1 Vermessung von gestuften, unbeschichteten Deckgläsern	72
4.3.2 Vermessung einer antireflex-beschichteten Linse	79
4.4 Zusammenfassung	84
5 Erzeugung wiederholbarer Speckles	85
5.1 Prototyp des Projektors wiederholbarer Speckles	86
5.2 Miniaturisierung	89
5.3 Zusammenfassung	91
6 Zusammenfassung und Ausblick	93
A Anhang	99
A.1 Kohärenz und räumliche Speckle-Verteilung	99
A.1.1 Kohärenz	99
A.1.2 Räumliche Verteilung von Speckles	101
A.2 Ortsfrequenzspektrum von Bessel-Speckles	103
A.3 M^2 -Wert und Modenzahl	105

A.4	Spezifizierungen der Aufbauten	107
A.5	Vergleich der experimentellen und numerischen Speckle-Reduktion	111
A.6	Weitere Filter zur Reduktion subjektiver Speckles	112
Literatur		128
Abbildungsverzeichnis		137
Tebellenverzeichnis		138
B Wissenschaftlicher Lebenslauf		139
C Eigene Publikationen		140
C.1	Veröffentlichungen in referierten Fachzeitschriften	140
C.2	Vorträge auf Fachkonferenzen	141
C.3	Patente	142
D Danksagung		143
E Erklärung des Promovenden		147

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
CCD	<i>Charge coupled device</i> , ladungsgekoppeltes Bauelement
CMOS	<i>Complementary metal-oxide-semiconductor</i> , komplementärer Metalloxidhalbleiter
EM	Elektromagnetisch
<i>FFT</i>	<i>Fast fourier transform</i> , "schnelle", numerische Fourier-Transformation
<i>Im</i>	Imaginärteil
MAAP	<i>Multiapertur array projector</i> , Multi-Apertur-Projektor
<i>Re</i>	Realteil
UV	Ultravioletter Wellenlängenbereich des Lichts
VIS	Sichtbarer Wellenlängenbereich des Lichts
Voxel	Volumenelement

Symbolverzeichnis

A	Flächeninhalt
\mathbf{A}	komplexer Vektor
a_k	komplexe Teilvektoren
a, b	Seitenlängen eines Detektorelements
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
D	Durchmesser eines Ausleuchtungsbereichs
\mathbf{E}	Essentialmatrix
\vec{E}	Komplexe Amplitude des elektrischen Feldes
e	Eulersche Zahl
\mathbf{F}	Fundamentalmatrix
\mathcal{F}	Fourier-Transformation
$F_{\#}$	Blendenzahl
f	Brennweite
f_G	Filtergröße
f_x, f_y	Brennweite in x - bzw. y -Richtung
G, H, U	Amplitudenverteilungen
I	Hier verwendeter Ausdruck für die Intensität
I_{EM}	Elektromagnetische Intensität
i	Imaginäre Einheit
i, j	Durchlaufindizes
K	Kontrast
\hat{K}	Kameramatrix
k	Durchlaufvariable
l_{ko}	Kohärenzlänge
N	Anzahl
n	Nummer eines Elements (Faktors, ...)
O	Objektpunkt

Symbolverzeichnis

P	Polarisationsgrad
$\hat{\mathbf{P}}$	Projektionsmatrix
P_i^1, P_j^2	Position des i-ten bzw. j-ten Pixels in Kamera 1 bzw. 2
p_I	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
\mathbf{R}	Rotationsmatrix
$S(\nu)$	Spektrale Dichteverteilung
\mathcal{S}	Scherung einer Detektormatrix
$\Delta \mathbf{s}$	Wegunterschied
s	Standardabweichung
T	Periodendauer der elektromagnetischen Schwingung
\vec{T}	Translationsvektor
T_v	Tastverhältnis
t	Zeit
u	Analytisches Signal
u_{Bel}, u_{Beob}	Beleuchtungs- bzw. Beobachtungswinkel
x, y, z	Koordinaten im Kamerakoordinatensystem
$\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$	Homogenisierte Koordinaten
\bar{x}	Durchschnittswert
\vec{x}	Raumpunktvektor im Kamerakoordinatensystem
$x_{\hat{K}}, y_{\hat{K}}$	Bildkoordinaten in der Kameraansicht
x_0, y_0	Bildkoordinaten des Hauptpunktes in der Kameraansicht
x_n	Element n der untersuchten Werte von x
x_W, y_W, z_W	Koordinaten im Weltkoordinatensystem
Δx	Abstand im Objektbereich
$\Delta x'$	Abstand im Bildbereich
$\Delta x_{OS}, \Delta x_{SuS}$	Laterale Größe objektiver bzw. subjektiver Speckles
Δz	Tiefenabstand im Objektbereich
δz	Präzision der Bestimmung des Tiefenabstandes im Objektbereich
$\Delta z_{OS}, \Delta z_{SuS}$	Axiale Größe objektiver bzw. subjektiver Speckles
β	Vergrößerung
Γ	Komplexe Kohärenzfunktion
γ	Komplexer Kohärenzgrad
δ	Einheitenlose Hilfsgröße
δ_k	Phasenversatz
ϵ	Elektrische Leitfähigkeit
ζ, η	Kamerakoordinaten
θ	Triangulationswinkel
λ	Wellenlänge des Lichts
μ	Magnetische Leitfähigkeit
ρ	Korrelationskoeffizient
ω	Winkelgeschwindigkeit des Lichts

1 Einleitung und Motivation

Die genaue Kenntnis über die Form von Objektoberflächen ist von zentraler Bedeutung in der Produktion [1, 2], ebenso in der Medizin [3–5] und bei der Archivierung kunsthistorischer Objekte und Gebäude [6, 7]. Zusätzlich hat sich in den letzten Jahren auch die Vermessung von Bauwerken [8, 9] sowie die 3D-Kartierung von Landschaften [10] und Infrastruktur [11] weit entwickelt. Für viele dieser Anwendungsfelder ist die kontaktlose Messung der Objektform eine notwendige Bedingung. Dabei sind oft auch die Messgeschwindigkeit und damit zusammenhängend eine niedrige Latenz sowie die Anzahl der verwertbaren Messpunkte entscheidende Kriterien [12]. Daher hat sich im Bereich der Messtechnik insgesamt, aber insbesondere im Bereich der 3D-Vermessung mit aktiver Beleuchtung, eine rasante Entwicklung vollzogen. Diese beinhaltet neben stereophotogrammetrischen Umsetzungen, die mit nur einer Messung 3D-Informationen wiedergeben [13] oder mit sequenziellen Messungen arbeiten [14], wobei derzeit bis zu 5.500 3D-Rekonstruktionen pro Sekunde erreicht werden können, auch multispektrale [15] oder digitalholographische Anwendungen [16].

Zur aktiven Beleuchtung des Messvolumens kann in der Stereophotogrammetrie unter anderem auf Gray-kodierte Muster [17] oder Sinusmuster [18] zurückgegriffen werden, doch auch auf bandbegrenzte Muster [19], aperiodische Sinus-Muster [20] oder Speckle-Muster [21]. Auch wenn andere Implementierungen denkbar sind, ist von diesen Musterarten nur letztgenannte in beinahe allen Fällen mit einer kohärenten Lichtquelle verbunden. Die Speckle-Muster erlauben dabei einen großen Tiefenbereich von einigen Metern, in dem die Muster kontraststark zu sehen sind, die Möglichkeit der beobachtungsseitigen spektralen Filterung, eine leichte Implementierung in Aufbauten und eine hohe Projektionsrate von mehr als 100.000 Mustern pro Sekunde [21, 22], was diese Methode für viele Anwendungen interessant macht. Allerdings ist mit der Verwendung einer kohärenten Quelle zur Beleuchtung auch das Zustandekommen von kohärentem Rauschen, den sogenannten *subjektiven Speckles*, verbunden [23]. Dies erschwert die 3D-Rekonstruktion durch kohärente Beleuchtung und Stereophotogrammetrie, da bei der Messung aus verschiedenen Richtungen unterschiedliche subjektive Speckles in gleichen Raumbereichen aufgezeichnet werden. Die Reduktion des Kontrasts dieser Muster wird beispielsweise in der Holographie und der Laserprojektion durch numerische [24, 25] und durch experimentelle Methoden [26–29] erreicht. Diese Verfahren sind so aber kaum auf die aktive Beleuchtung zum Zweck der 3D-Vermessung zu übertragen, da in den meisten Fällen auch der Kontrast der objektiven Speckles reduziert werden würde.

Das Interesse verschiedener Anwender an präzisen und akkuraten Messdaten erstreckt sich auch auf Objekte aus Materialien, die für die Stereophotogrammetrie im sichtbaren

Bereich des Lichts (VIS) unkooperativ sind, da sie zu transparent, zu stark reflektierend oder zu absorbierend wirken. In der Folge können durch mehrere Detektoren keine vergleichbaren Intensitäten des von der Objektoberfläche gestreuten Lichts empfangen werden. Andere Verfahren, wie die Interferometrie [30] oder die Deflektometrie [31, 32] werden daher für die Vermessung derartiger Objekte herangezogen.

Für einige Anwendungsfelder ist ein sehr kompakter Aufbau notwendig, oder die nötigen Sensoren sind derart preisintensiv, dass nur ein Sensor bzw. nur ein Kamerasystem für die Messung verwendet werden kann. Für die 3D-Vermessung mit einem solchen System ist die strenge Wiederholbarkeit der Muster eine notwendige Bedingung [33, 34]. Am *Institut für Angewandte Optik und Biophysik* (IAOB) wurde in Kooperation mit dem *Fraunhofer Institut für Feinmechanik und Optik* (IOF) dahingehend in den letzten Jahren eine Technik mit einem Multiapertur-Array-Projektor erarbeitet, die auch eine 3D-Vermessung mit nur einer Kamera aber mehreren Beleuchtungscentren ermöglicht [35]. Bisher konnten Speckle-Muster im Allgemeinen nicht in einer Sequenz wiederholbar erzeugt werden. Die 3D-Vermessung mit nur einer Kamera und aktiver Beleuchtung durch derartige Muster war daher nicht möglich.

Anliegen und Ziel dieser Arbeit ist es, den Stand der Technik der 3D-Vermessung mit Speckle-Beleuchtung um drei Kernpunkte zu erweitern:

1. Den Kontrast subjektiver Speckles durch geeignete Filterung zu unterdrücken und diese Filterung zu bewerten.
2. Das Prinzip der 3D-Vermessung mit Speckle-Beleuchtung in den UV-Bereich zu übertragen und Oberflächen, die im VIS unkooperativ sind, zu vermessen.
3. Speckle-Muster im VIS wiederholbar zu erzeugen und dieses Prinzip auch zu miniaturisieren.

Zuerst wird im Grundlagenkapitel 2 die 3D-Vermessung durch Stereophotogrammetrie und durch einen Ein-Kamera-Multi-Apertur-Projektor in ihrem Prinzip erläutert und einige Eigenschaften von Speckle-Verteilungen beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 3 experimentelle und numerische Reduktionsverfahren für subjektive Speckles vorgestellt und bewertet. Dazu werden experimentelle Messungen und Simulationen ausgewertet. Im Kapitel 4 wird dann die Übertragung der Technik speckle-basierter Stereophotogrammetrie in den UV-Bereich beschrieben. Neben einem Kalibrierkonzept und Vergleichsmessun-

gen zu den Ergebnissen aus dem sichtbaren Bereich des Lichts werden auch Resultate der Vermessung eines Objektes aus Edelstahl und transparenter Objekte aus Glas vorgestellt. Kapitel 5 beschäftigt sich darauf mit der Erzeugung wiederholbarer Speckles und damit erstmalig der Möglichkeit, diese zur 3D-Vermessung mit nur einer Kamera zu verwenden. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Miniaturisierung dieses Systems gezeigt. Zuletzt wird in Kapitel 6 eine Zusammenfassung aller relevanten Ergebnisse und ein Ausblick gegeben.

2 Grundlagen

2.1 3D-Vermessung

Die Vermessung dreidimensionaler Oberflächen ist für viele Anwendungsfelder relevant. Sowohl industriell gefertigte Güter [2,36] und Bauwerke [37,38], als auch kunsthistorische Objekte [7,15] sind Gegenstand der Messung. Aber auch im medizinischen Bereich [3–5] ist eine genaue Kenntnis der Oberfläche und Form von z.B. Körperteilen [39] von entscheidender Bedeutung. Im Allgemeinen sind die Begriffe *Genauigkeit*, *Präzision* und *Richtigkeit* sowie *Vollständigkeit* insbesondere für die photogrammetrische Vermessung wesentliche Bestandteile zur Bewertung einer Messmethode. In dieser Arbeit wurde der Begriff der Richtigkeit einer Messung als Antwort auf die Frage aufgefasst, wie *akkurat* etwas gemessen wurde, also wie weit der Durchschnitt der Messungen vom wahren Wert abgewichen ist. Die Präzision wurde als die durchschnittliche Abweichung der Messungen von ihrem Mittelwert verstanden. Die Genauigkeit beschrieb hier, als dazu übergeordnete Größe, wie gut Richtigkeit und Präzision zusammengefallen sind. Eine *genaue Messung* war folglich eine *akkurate* und *präzise Messung*. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zum Vergleich der verwendeten Methoden untereinander auf zwei technische Maße Bezug genommen: die *Vollständigkeit* einer Rekonstruktion und die *Standardabweichung* der bestimmten 3D-Koordinaten von denen einer Ausgleichsfläche. Die Standardabweichung s der Werte x_n der Anzahl N wurde dabei nach

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\bar{x} - x_n)^2}{N - 1}} \quad (2.1)$$

gebildet, wobei der Durchschnittswert der x_n durch $\bar{x} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}$ bestimmt wurde.

Der Begriff *Vollständigkeit* beschrieb in diesem Zusammenhang das Verhältnis der Anzahl der *vertrauenswürdig rekonstruierten Punkte* zu der Anzahl der in der Messung bzw. in dem Bildausschnitt maximal möglichen Punkte. Folglich lag der Wert für die *Vollständigkeit* zwischen 0 und 1, also zwischen 0% und 100%. Der Ausdruck: "vertrauenswürdig rekonstruierter Punkt" bezog sich darauf, ob für den rekonstruierten 3D-Punkt ein Bewertungsmaß größer gleich einem vorgegebenen Schwellwert gefunden werden konnte. Als Maß bzw. Schwellwert wurde der zeitliche, normierte Kreuzkorrelationskoeffizient ρ herangezogen, der eingekürzt Korrelationskoeffizient genannt wurde. Ein Punkt galt dann als vertrauenswürdig rekonstruiert, wenn die Bedingung $\rho \geq 0,9$ erfüllt war. In von dieser Praxis abweichenden Fällen wurde darauf hingewiesen. Für die Betrachtung der Ebenenmessabweichung wurden für die einzelnen Rekonstruktionen jeweils Ausgleichsflächen

bestimmt. Die Standardabweichung der Abstände der rekonstruierten Punkte von diesen Flächen wurde dann als Maß zur Bewertung angegeben. Dabei wurde die Standardabweichung nach *GUM* ("Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement") bestimmt [40]. Für die Untersuchung von Kugeloberflächen wurde analog für jede Rekonstruktion eine Ausgleichskugel bestimmt. Auch hier wurde die Standardabweichung der Abstände der rekonstruierten Punkte von dieser Kugel herangezogen. Für streuende Freiformobjekte wurde eine Vergleichsmessung mit einer inkohärenten Beleuchtung durch bandbegrenzte Muster angefertigt, bei der in gleicher Weise die Standardabweichung bzw. die durchschnittliche Abweichung von der Rekonstruktion aus den Vergleichsmessungen bestimmt wurden.

2.1.1 Stereophotogrammetrie

Informationen über die dreidimensionale Form von Objekten können auf vielerlei Arten erfasst werden [41]. Eine besteht in der Verwendung von standortunterschiedlichen Ansichten ein und derselben Szene. Für den Fall von zwei verschiedenen Ansichten spricht man von *Stereophotogrammetrie* [42, 43]. Dieses Prinzip fußt im Kern auf dem Ansatz, den Schnittpunkt derjenigen beiden Sichtstrahlen oder auch Sehstrahlen zu bestimmen, die zwischen einem Objektpunkt O und den zu den Abbildungsebenen der Detektoren gehörenden Elementen (z. B. Pixeln) gezogen werden können, und wird *Triangulation* genannt. Die Bekanntheit des Abbildungssystems im Bezug auf dessen Position, Orientierung und Abbildungseigenschaften ist dabei von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der Bestimmung der Schnittpunkte. Die Höhenauflösung eines photogrammetrischen Systems wird maßgeblich durch seine laterale Auflösung vorgegeben [44–46], solange die Objekte noch scharf aufgelöst werden, also im Schärfentiefebereich der abbildenden Optik liegen. Unabhängig davon, ob nur ein Detektor und ein kalibrierter Projektor oder zwei Detektoren für eine Vermessung genutzt werden, lässt sich die Höhenauflösung wie in Abbildung 1 gezeigt, konstruieren. Die laterale Auflösung im Bildbereich $\Delta x'$ ist durch die *Vergrößerung* des abbildenden Systems β mit der lateralen Auflösung im Objektbereich Δx durch $\Delta x' = \beta \cdot \Delta x$ verknüpft. Hier beschreibt θ den Winkel zwischen der Beobachtungsrichtung des Detektorelements und der eines Referenzdetektors. Δz gibt die Höhenauflösung des Systems wieder, während δz ein Maß für die Präzision dieses Wertes unter Verwendung der Lasertriangulation [44] angibt. Die maximale Höhenauflösung eines derartigen Systems und dessen Präzision (in Anlehnung an die Lasertriangulation [44]) lassen sich nach

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{\sin \theta} = \frac{\beta \Delta x'}{\sin \theta} \quad \delta z = \frac{K \lambda}{2\pi \sin \theta \sin u} \quad (2.2)$$

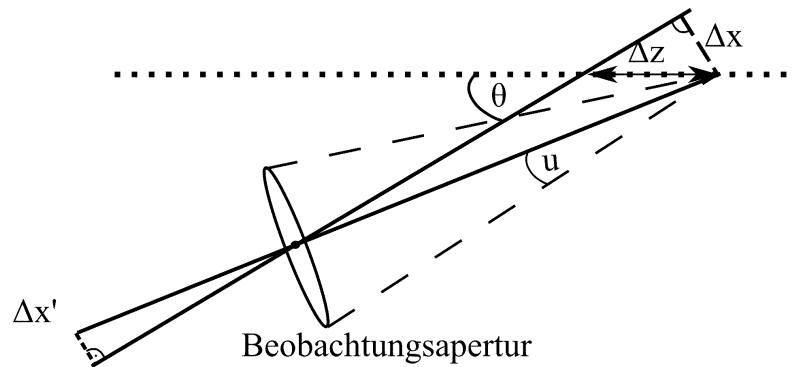


Abbildung 1: Skizze zum Zustandekommen der Höhenauflösung eines Triangulationssystems. Die gepunktete Linie repräsentiert die Hauptblickrichtung des Referenzdetektors. Dieser kann durch ein weiteres abbildendes System oder durch einen kalibrierten Projektor gegeben sein. Der Beobachtungswinkel u erlaubt die Bestimmung der Präzision δz .

bestimmen. Hier beschreibt K den Kontrast der subjektiven Speckles, die in Kapitel 2.2.2 vorgestellt werden, und λ die verwendete Wellenlänge.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die 3D-Rekonstruktion auf ein bereits am IAOB vorhandenes Software-Paket namens "correlation-expert" zurückgegriffen [22, 47–49]. Im folgenden Abschnitt sollen kurz die Grundlagen vorgestellt werden, auf denen die Arbeitsschritte der stereophotogrammetrischen 3D-Messung im Allgemeinen und die des Programms *correlation-expert* im Speziellen aufbauen.

In allen hier verwendeten Messszenarien und Simulationen wurde von einem Lochblendenmodell ausgegangen, um die Abbildung seitens der verwendeten Kameras zu beschreiben. Dabei besteht die wesentliche Annahme darin, dass alle Sehstrahlen vom Objekt zur Abbildungsebene durch denselben Punkt im Raum, der *Projektionszentrum* oder auch *Lochblende* genannt wird, verlaufen. Eine Skizze dieses Prinzips ist in Abbildung 2 dargestellt. Für einen Objektpunkt $O(x_W, y_W, z_W)$ im Weltkoordinatensystem, der sich im

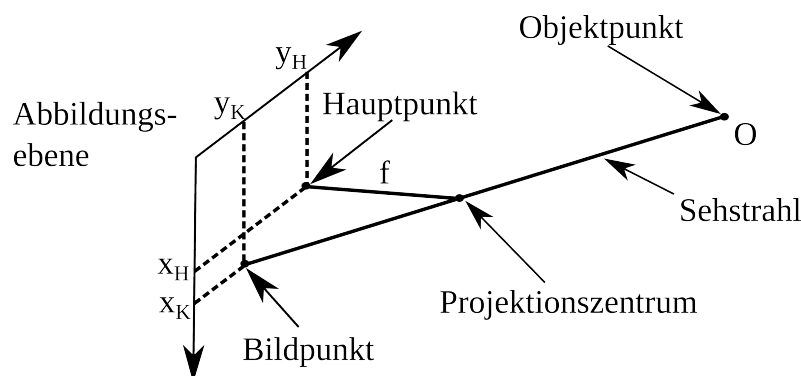


Abbildung 2: Abbildung eines Bildpunktes im Lochblendenmodell. Alle Sehstrahlen gehen dabei durch dasselbe Projektionszentrum.

Kamerakoordinatensystem am Punkt $O(x, y, z)$ befindet, können die Transformationen in

eine Bildansicht $O(x_{\hat{\mathbf{K}}}, y_{\hat{\mathbf{K}}})$ in der Abbildungsebene der Kamera in der Form

$$x_{\hat{\mathbf{K}}} - x_0 = \frac{fx}{z} \quad y_{\hat{\mathbf{K}}} - y_0 = \frac{fy}{z} \quad (2.3)$$

ausgeführt werden.

Die zur Abbildungsebene lotrechte Verbindungslinie zum Projektionszentrum bzw. der gedachten Lochblende schneidet die Aufnahmeebene im sogenannten Hauptpunkt (x_H, y_H) . Der Abstand f der Lochblende von diesem Punkt kann als Brennweite des Abbildungssystems aufgefasst werden und weicht idealerweise nur wenig von der echten Brennweite der sphärischen Linse bzw. des Linsensystems ab, deren Abbildungseigenschaften nachgebildet werden sollen.

Um den Abbildungsvorgang vereinfacht darzustellen und der Brennweite und der Lage des Hauptpunktes, den sogenannten *intrinsischen Parametern*, einer Kamera im Rahmen des Lochblendenmodells eine Matrixform zu geben, können *homogene Koordinaten* $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ eingeführt werden [41]. Dazu werden die Koordinaten der Bildansicht durch \tilde{z} mit $\tilde{z} \stackrel{!}{=} z$ nach

$$x_{\hat{\mathbf{K}}} \cdot \tilde{z} = x_{\hat{\mathbf{K}}} \cdot z = \tilde{x} \quad y_{\hat{\mathbf{K}}} \cdot \tilde{z} = y_{\hat{\mathbf{K}}} \cdot z = \tilde{y} \quad \text{zu} \quad \begin{bmatrix} x_{\hat{\mathbf{K}}} \\ y_{\hat{\mathbf{K}}} \end{bmatrix} \iff \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

erweitert.

Die Kameramatrix $\hat{\mathbf{K}}$ ermöglicht dann die Umrechnung der dreidimensionalen Koordinaten im Koordinatensystem der Kamera in die homogenisierten Koordinaten.

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \mathcal{S} & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{K}} \cdot \vec{x} \quad (2.5)$$

Die mögliche *Scherung* (engl. "shear"), also die mögliche Nichtorthogonalität der Koordinatenachsen der Bildebene, kann durch den Wert \mathcal{S} ausgeglichen werden. Die Werte für die Brennweiten f_x und f_y sind auf die Größe der Pixel normiert. Da diese nicht zwangsläufig quadratisch sind, kann die Brennweite entlang der verschiedenen Achsen durchaus voneinander abweichen. Für die intrinsische Kalibrierung der Kameras wurde mit Ausnahme der Kalibrierung, die im ultravioletten Bereich angewendet worden ist, das am IAOb entwickelte Verfahren nach Große et al. [50] eingesetzt, das als spezialisierte Weiterentwicklung des Verfahrens nach Zhang [51] betrachtet werden kann.

Das Welt- und das Kamerakoordinatensystem können durch Rotation und Translation ineinander überführt werden. Die Translation kann dabei durch einen Vektor \vec{T} und die

Rotation durch eine 3×3 -Matrix \mathbf{R} dargestellt werden, so dass Gleichung 2.5 durch

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{K}} \cdot \vec{x} = \hat{\mathbf{K}} \cdot [(\mathbf{R} \cdot \vec{x}_W) + \vec{T}] = \hat{\mathbf{P}} \cdot \begin{bmatrix} \vec{x}_W \\ 1 \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{P}} \cdot \vec{x}_W \quad (2.6)$$

erfüllt wird. Die Projektionsmatrix $\hat{\mathbf{P}}$ mit $\hat{\mathbf{P}} = \hat{\mathbf{K}} \cdot (\mathbf{R}|\vec{T})$ beschreibt die Abbildung der Weltkoordinaten in die homogenisierten Koordinaten des Kamerasystems. Wenn dasselbe Messvolumen durch zwei standortunterschiedliche Kameras mit den Projektionsmatrizen $\hat{\mathbf{P}}_1$ und $\hat{\mathbf{P}}_2$ beobachtet wird, können die Weltkoordinaten des Objektpunktes O bestimmt werden. Dazu müssen neben den Abbildungseigenschaften der Kameras, die dann durch $\hat{\mathbf{K}}_1$ und $\hat{\mathbf{K}}_2$ ausgedrückt werden, auch die Translationen und Rotationen der Kameras zum Weltkoordinatensystem und damit zueinander bekannt sein. Zur Vereinfachung wird meist das Weltkoordinatensystem mit dem Koordinatensystem der ersten Kamera oder auch "Führungskamera" identifiziert. Über den *Achtpunktalgorithmus* [52] können dann Rotation und Translation der beiden Kameras zueinander bestimmt werden. Sobald $\hat{\mathbf{P}}_1$ und $\hat{\mathbf{P}}_2$ bekannt und die Koordinaten des Objektpunktes O in beiden Bildansichten $(x_{\hat{\mathbf{K}}_1}, y_{\hat{\mathbf{K}}_1})$ und $(x_{\hat{\mathbf{K}}_2}, y_{\hat{\mathbf{K}}_2})$ bestimmt sind, lassen sich die gesuchten Raumkoordinaten angeben. Dabei wird letztlich der Schnittpunkt der Sehstrahlen der beiden Kameras im Raum ermittelt oder zumindest eine gute Näherung für diesen gegeben¹. Dieser Vorgang wird 3D-Punktrekonstruktion genannt und ist in Abbildung 3 skizziert. Das nach der sorgfältigen Kalibrierung zu lösende Problem besteht nun darin, die Abbildungen der Objektpunkte in den verschiedenen Bildansichten einander zuzuordnen. Diese Problemstellung wird in der Literatur als *Korrespondenzproblem* bezeichnet [22, 43, 47]. In den folgenden beiden Unterkapiteln werden Grundlagen zu gängigen Lösungs- bzw. Vereinfachungspraktiken dieses Problems dargestellt.

2.1.2 Epipolargeometrie

Eine weitverbreitete Methode zur Reduzierung des Korrespondenzproblems, der Suche nach korrespondierenden Punktpaaren in verschiedenen Bildansichten, besteht in der Verwendung der durch die Kalibrierung des stereophotogrammetrischen Systems gewonnenen Vorinformationen über die Positionierung der Kameras zueinander.

Durch die intrinsische und extrinsische Kalibrierung sind die Projektionsmatrizen $\hat{\mathbf{P}}_1$ und $\hat{\mathbf{P}}_2$, die Essentialmatrix \mathbf{E} und Fundamentalmatrix \mathbf{F} des Aufbaus bekannt [52]. Diese

¹Das Programm *correlation-expert* verwendete bei zwei zueinander windschiefen Sehstrahlen den Punkt als Schnittpunkt, der in der Mitte der Linie liegt, die den kürzesten Verbindungsweg zwischen den beiden Sehstrahlen markierte.

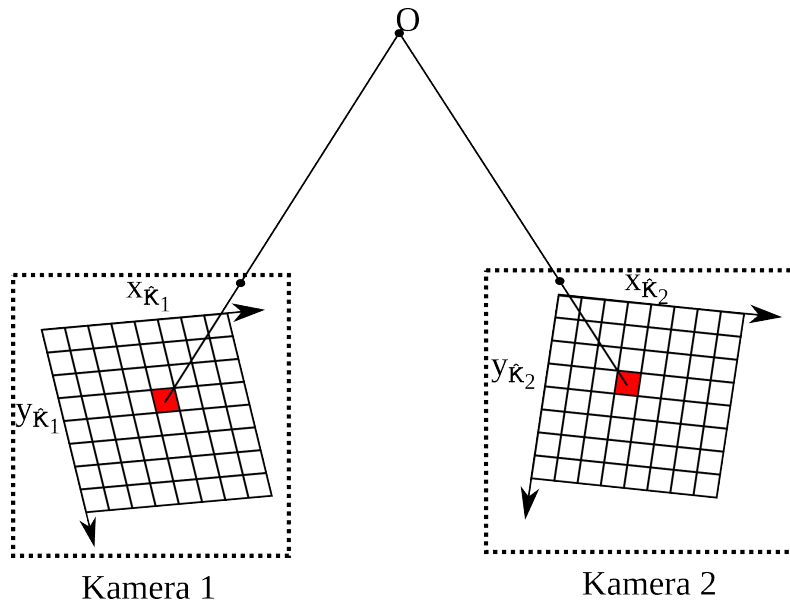


Abbildung 3: Rekonstruktion der 3D-Koordinaten des Objektpunktes O durch Triangulation in der Stereophotogrammetrie.

Matrizen ermöglichen es, von der Bildansicht einer Kamera in die andere umzurechnen. Die Fundamentalmatrix ordnet dabei jedem Bildpunkt der ersten Kamera eine Gerade in der Ansicht der zweiten Kamera zu. Diese Gerade repräsentiert die Abbildung des Sehstrahls in der Ansicht der zweiten Kamera, der das Bildelement der ersten Kamera mit dem Objektraum verbindet. Diese Linien werden Epipolarlinien genannt und bestehen aus all jenen Punkten der zweiten Bildansicht $P(x_{K_2}, y_{K_2})$, die für den Punkt der ersten Bildansicht $P(x_{K_1}, y_{K_1})$ der Gleichung

$$\begin{bmatrix} x_{\hat{K}_2} \\ y_{\hat{K}_2} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{F} \cdot \begin{bmatrix} x_{\hat{K}_1} & y_{\hat{K}_1} & 1 \end{bmatrix} \stackrel{!}{=} 0 \quad (2.7)$$

genügen. Das Problem der Korrespondenzsuche ist damit zwar reduziert, jedoch noch nicht gelöst. Die Identifizierung eines falschen Bildbereiches der zweiten Kamera im Bezug auf einen Bereich der ersten Kamera als *homologer Punkt* führt zu einer fehlerhaften Rekonstruktion, die "Ausreißer" genannt wird. Punkte, die in unterschiedlichen Ansichten denselben Objektpunkt wiedergeben, werden *homologe Punkte* genannt. Die Rekonstruktion eines Ausreißers sowie die Abbildung eines Sehstrahls in die Ansicht der zweiten Kamera ist in Abbildung 4 dargestellt. In vielen stereophotogrammetrischen Aufbauten sind die geometrischen Verhältnisse so beschaffen, dass die Epipolarlinien nur um kleine

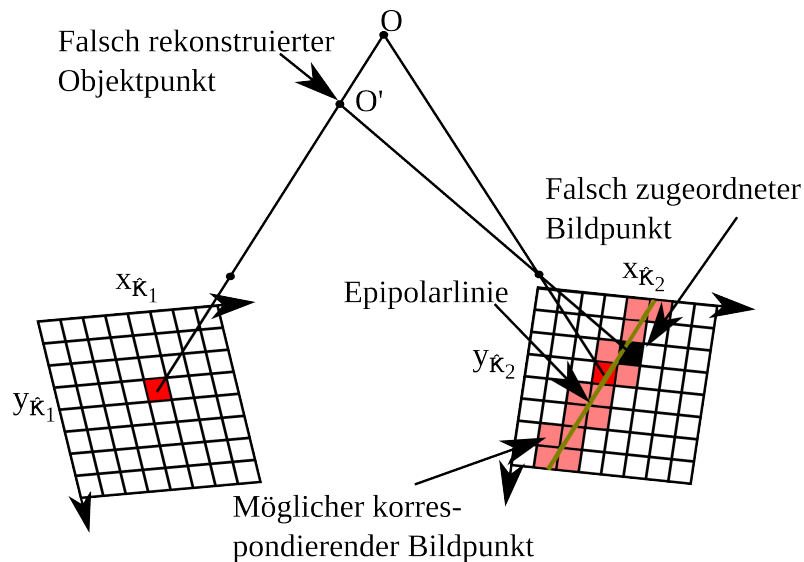


Abbildung 4: Abbildung des Sehstrahls der ersten Kamera in die Ansicht der zweiten Kamera als sogenannte Epipolarlinie. Schwarz dargestellt ist ein falsch bzw. fehlerhaft zugeordneter Bildbereich, der zur Rekonstruktion falscher 3D-Koordinaten führt. Die übrigen Bildpunkte, die für eine Korrespondenz in Frage kommen, da sie nahe oder auf der Epipolarlinie liegen, sind rot eingefärbt.

Winkel ($< 5^\circ$) von der Verbindungslinie der Kamerazentren abweichen². Meist werden zudem die beiden Kameras entweder nebeneinander oder übereinander angebracht, sodass die Epipolarlinien selbst für den ganzen Darstellungsbereich nur um kleine Winkel von den Hauptrichtungen der Pixel abweichen. Zur Veranschaulichung sei hierzu in Abbildung 5 die Epipolarlinie in der zweiten Kameraansicht eines stereophotogrammetrischen Aufbaus dargestellt.

Durch das Programm *correlation-expert* wurden alle Bilder, nachdem intrinsische und extrinsische Parameter bekannt waren, rektifiziert und die Verzeichnung korrigiert. Dabei wurde das Verfahren nach Fusiello et al. angewandt [53]. Die Rektifizierung beinhaltet eine Bildtransformation, in der die Zeilen der Bilder und die Epipolarlinien parallelisiert wurden. Die später vorgestellten Filterfunktionen wurden vor der Rektifizierung der Bilder angewendet.

2.1.3 Zeitliche Korrelationsuche

Das Korrespondenzproblem kann durch verschiedene Methoden und Ansätze gelöst werden. Bei stereophotogrammetrischen Systemen mit aktiver, strukturierter Beleuchtung können dazu verschiedene Mustertypen eingesetzt werden, wie z.B. die Streifenprojektion [54], die Projektion von aperiodischen Sinusmustern [18, 20], bandbegrenzten Mus-

²Wenn die Fundamentalmatrix und die maximale Anzahl an Reihen und Spalten der Detektoren bekannt ist, kann durch Umstellen von Gleichung 2.7 ein globaler Maximalwinkel bestimmt werden.

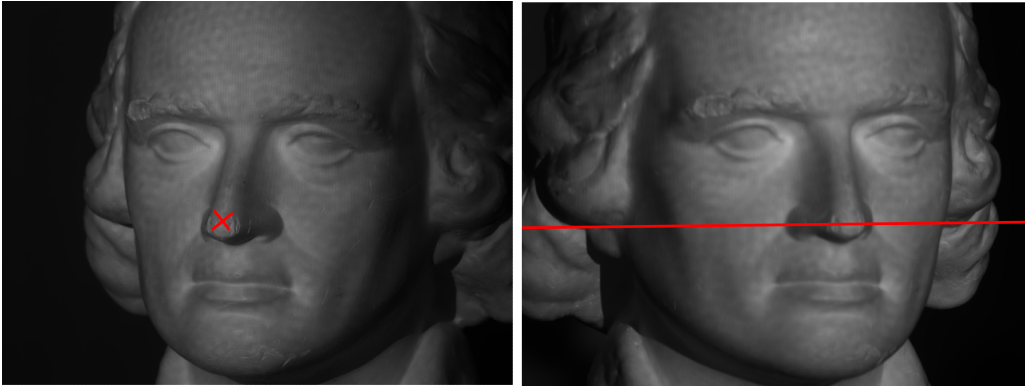


Abbildung 5: Stereoaufnahme einer Büste des Dichters Friedrich Schiller. Ein Pixel im Bild der ersten Kamera ist durch ein rotes Kreuz markiert. Die dazugehörige Epipolarlinie im Bild der zweiten Kamera ist ebenfalls rot markiert.

tern [55] oder objektiven Speckles [56]. Beispiele für die Muster-Typen sind in Abbildung 6 dargestellt. Um die Frage der Punktzuordnung lösen zu können, wurde die bereits am

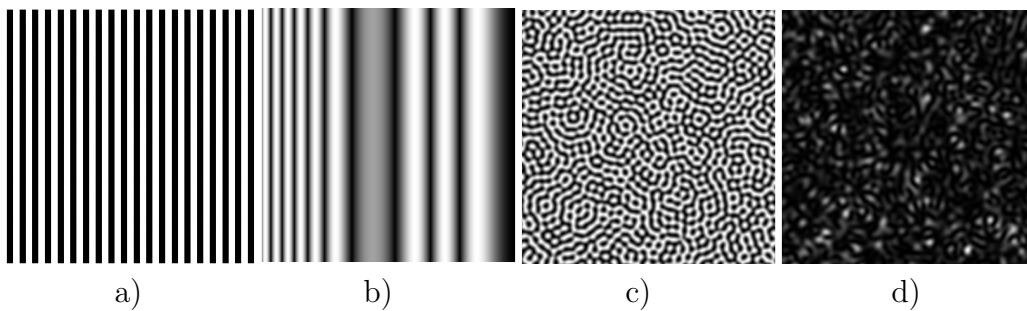


Abbildung 6: Darstellung von 4 Beispielen verschiedener Mustertypen: Streifenmuster a), aperiodische Sinusmuster b), bandbegrenzte Muster c), Speckle-Verteilung d).

IAOB etablierte Methode der zeitlichen Korrelationsuche verwendet. Die zentrale Vorgehensweise schloss dabei die Aufnahme von Bildfolgen ein, bei denen die zu vermessende Szene von unterschiedlichen Mustern oder einem Muster, das verschoben wurde, beleuchtet wurde. Die Kameras nahmen bei jedem Muster ein Bild auf, sodass ein Bilderstapel für jede Kamera entstand. Für die in Abbildung 5 gezeigte Büste wurden so die in Abbildung 7 beispielhaft gezeigten Bilderstapel erzeugt. Zur Beleuchtung wurden bandbegrenzte Muster verwendet. Die Sequenz von Grauwertverteilungen wurde pixelweise verglichen, wobei das Vorwissen über die Epipolargeometrie eingesetzt werden konnte, um die Anzahl der zu überprüfenden Bildpunkte in der zweiten Kameraansicht zu minimieren. Zur Bewertung, ob es sich bei zwei Pixeln, P_i^1 der ersten Kamera und P_j^2 der zweiten Kamera, um korrespondierende Pixel handelte, wurde der zeitliche, normierte Kreuzkorrelationskoeffizient

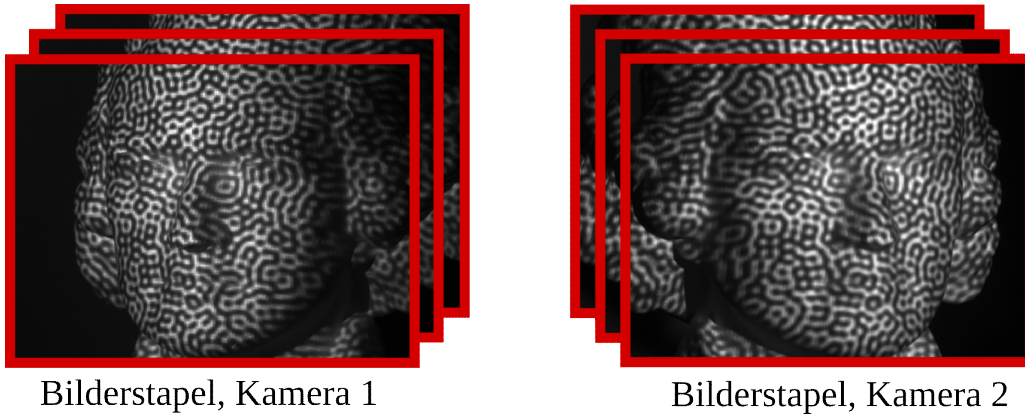


Abbildung 7: Bilderstapel aus den Ansichten zweier Kameras. Die in Abbildung 5 gezeigte Büste wurde mit bandbegrenzten Mustern beleuchtet und pro Muster eine Stereo-Aufnahme erstellt.

ρ eingesetzt, wie er in

$$\rho(P_i^1, P_j^2) = \frac{\sum_{n=1}^N (g(P_i^1, n) - \bar{g}(P_i^1))(g(P_j^2, n) - \bar{g}(P_j^2))}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (g(P_i^1, n) - \bar{g}(P_i^1))^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (g(P_j^2, n) - \bar{g}(P_j^2))^2}} \quad (2.8)$$

dargestellt ist. Hier bezeichnen $g(P_i^1, n)$ und $g(P_j^2, n)$ die Grauwerte der Pixel P_i^1 und P_j^2 in der n -ten Aufnahme. Die Mittelwerte der Grauwerte an diesen Stellen, im Bezug auf alle Aufnahmen der Messung, sind durch $\bar{g}(P_i^1)$ und $\bar{g}(P_j^2)$ gegeben. Der Korrelationskoeffizient konnte damit Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Wenn für Punktepaare $\rho = 1$ bestimmt wurde, wurden sie als "vollständig korreliert" bezeichnet. Entgegen dazu wurde bei $\rho = -1$ von "antikorrelierten Punkten" gesprochen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für $\rho \geq 0,9$ der Ausdruck "vertrauenswürdig rekonstruierte Punkte" verwendet. Alle übrigen Rekonstruktionsergebnisse wurden nicht zu Auswertungen herangezogen. In von dieser Praxis ($\rho \geq 0,9$) abweichenden Fällen wurde der veränderte Maßstab ausgewiesen. Auch andere Bewertungsmöglichkeiten wurden bereits untersucht [47, 48, 57, 58] und hätten alternativ verwendet werden können.

2.1.4 3D-Messung mit einer Kamera und mehreren Beleuchtungszentren

Die Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, dass insbesondere hohe Anforderungen an die Kamerasysteme gestellt werden, mit denen 3D-Informationen gewonnen werden sollen. So müssen diese Kameras extreme Aufnahmegeschwindigkeiten [14], eine hohe spektrale Breite [15] oder aber den Einsatz unter hoch spezialisierten Einsatzbedingungen (Infrarotbereich [59], Unterwasseraufnahmen [60, 61], Miniaturisierung [62]) ermöglichen. Die Kosten derartiger Systeme steigen dabei mit dem Anforderungsniveau. Eine Möglichkeit

der Reduktion dieser Kosten und des experimentellen Umfanges insgesamt besteht darin, nur eine Kamera zur Gewinnung von 3D-Daten zu verwenden.

Dazu gibt es bereits viele Anwendungen, die jedoch auf der strengen Wiederholbarkeit der Muster und der Verwendung eines einzelnen Projektionszentrums fußen [33,34,63–65]. Im Rahmen der Kooperation seitens des IAOb Jena und des Fraunhofer IOF Jena wurde ein Konzept entwickelt, um die 3D-Rekonstruktion von Oberflächen unter Verwendung eines "Multi-Appertur-Array-Projektors" kurz *MAAP* mit nur einer Kamera zu ermöglichen [66].

Der Ansatz der Kalibrierung des MAAP bestand dabei in der Kalibrierung der Volumenelemente des Messvolumens, der sogenannten *Voxel* (siehe Abbildung 8). Der Kalibrierprozess beinhaltet, eine gut streuende Ebene senkrecht zur Beleuchtungsrichtung am Beginn des Messvolumens auf einem Lineartisch zu positionieren und anschließend die Lage und Orientierung der Ebene im Bezug auf die intrinsisch kalibrierte Kamera zu bestimmen. Dazu wurde die Ebene durch einen Referenzbildschirm ausgetauscht und eine Sequenz wohldefinierter Muster gezeigt. Aus dieser Musterfolge ließ sich, analog zur intrinsischen Kalibrierung, die Lage und Orientierung des Bildschirms ermitteln [35]. Alternativ wurde die Verwendung einer zweiten Kamera vorgeschlagen, mit deren Hilfe die Position des Schirms über die Stereophotogrammetrie ausgewertet werden konnte. Nachdem die Position und Ausrichtung der Ebene im Raum bestimmt wurde, projizierte

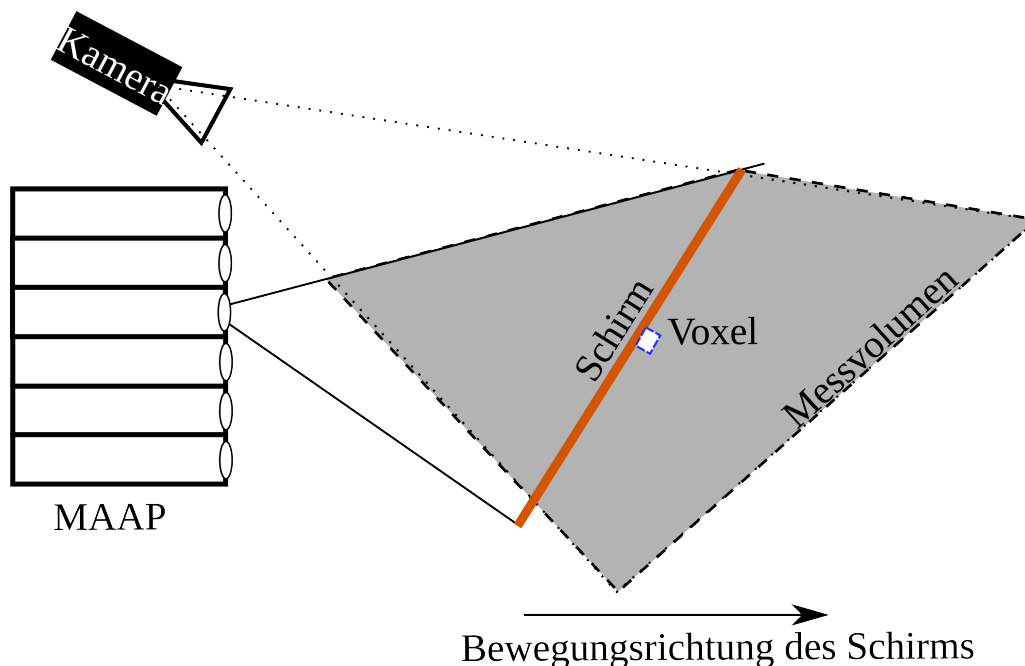


Abbildung 8: Arbeitsprinzip der Kalibrierung eines Multi-Appertur-Projektors (MAAP) für die 3D-Messung mit nur einer Kamera.

der MAAP die wiederholbar erzeugbaren aperiodischen Sinus-Muster nacheinander. Jedes

projizierte Muster wurde in einer Aufnahme festgehalten. Dann wurde die Ebene durch den Lineartisch möglichst parallel zur Beleuchtungsrichtung zwischen $50 \mu m$ und $500 \mu m$ verschoben und die Serie an Projektionen durch den MAAP und Aufnahmen durch die Messkamera wiederholt. Dieser Prozess wurde solange ausgeführt, bis das gesamte Messvolumen von der Ebene durchlaufen wurde³. Die sich aus den Kamerapixeln und den Ebenenpositionen ergebenden Volumenelemente/Voxel konnten durch diese Aufnahmen Grauwertsequenzen zugeordnet werden⁴. Durch die Korrelationsuche zwischen den Aufnahmen eines Messobjektes, das sich in dem Messvolumen befand, und dem Datensatz an Aufnahmen der Muster ließen sich dreidimensionale Oberflächen rekonstruieren, solange die Muster und damit die Grauwertsequenzen streng wiederholt wurden⁵. Im Gegensatz zu Triangulationsmessprinzipien war die Höhenauflösung Δz (vgl. Gleichung 2.2) nicht mehr von der lateralen Auflösung der Kamera bzw. des Detektors abhängig [68]. Da die 3D-Koordinaten pixel- und damit sehstrahlweise bestimmt wurden, war prinzipiell nur die Schrittweite des Lineartisches während der Kalibrierung und die Grauwertempfindlichkeit der Detektorelemente maßgeblich für die Höhenauflösung.

2.2 Speckles

2.2.1 Speckle-Statistik

Bei der Beobachtung von Flächen, die durch kohärente Strahlung beleuchtet werden, können körnige, spekulare Strukturen im ausgeleuchteten Bereich beobachtet werden. Diese Strukturen werden "Speckles" genannt (engl. "Tupfen" oder "Sprenkel") und treten in verschiedensten Anwendungsfeldern auf. Die statistischen Eigenschaften einer einzelnen solchen Struktur lassen sich beschreiben, indem das *analytische Signal* $u(x, y, z; t)$ als einzelne Polarisationskomponente des elektrischen Feldes \vec{E} am Punkt $P(x, y, z)$ zum Zeitpunkt t untersucht wird. u lässt sich dann für eine monochromatische Welle nach Gleichung [69]

$$u(x, y, z; t) = \mathbf{A}(x, y, z) \exp(i2\pi\nu t) \quad (2.9)$$

³Das Messvolumen war in den meisten Fällen zwischen 5 cm und 10 cm tief. Mit der räumlichen Tiefe des Volumens und kürzer werdenden Ebenenverrückungen stieg sowohl die notwendige Datenmenge als auch die Berechnungszeit der 3D-Rekonstruktionen.

⁴Es wurde auch eine Subpixel-Interpolation implementiert, die schlussendlich eine Präzision unterhalb der Schrittweite von $50 \mu m$ bis $500 \mu m$ ermöglichte.

⁵Eine Technik wurde entwickelt, mit der auch nach einer Positionsveränderung der Kamera zum Projektor noch 3D-Rekonstruktionen erzeugt werden konnten. Allerdings setzte dies ein Kalibrierobjekt bzw. Referenzobjekt voraus, das eine konstante Position zum Projektor vor und nach der Verrückung besaß [67].

darstellen. ν beschreibt die Frequenz der Welle und \mathbf{A} eine komplexe Amplitude bzw. ein Phasor der Form

$$\mathbf{A}(x, y, z) = |\mathbf{A}(x, y, z)| \exp(i\theta(x, y, z)). \quad (2.10)$$

Die Intensität I am Punkt P der Welle lässt sich aus dem analytischen Signal durch

$$I(x, y, z) = \lim_{T \rightarrow \infty} |u(x, y, z; t)|^2 dt = |\mathbf{A}(x, y, z)|^2 \quad (2.11)$$

bestimmen⁶. Der komplexe Vektor oder Phasor \mathbf{A} kann dabei als aus N komplexen Teilvektoren \mathbf{a}_k so zusammengesetzt verstanden werden, dass

$$\mathbf{A}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N \mathbf{a}_k(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |\mathbf{a}_k| \exp(i\theta_k) \quad (2.12)$$

erfüllt ist. Die Zusammensetzung von \mathbf{A} als Summe aus den einzelnen, komplexen Teilvektoren in der komplexen Ebene kann als Zufallsbewegung aufgefasst werden und entspricht somit dem als "random walk" bekannten Phänomen [70, 71]. Die Zufallsbewegung und der Zusammenhang von \mathbf{A} und $\frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{a}_k$ sind in Abbildung 9 dargestellt. Zwei Bedingungen

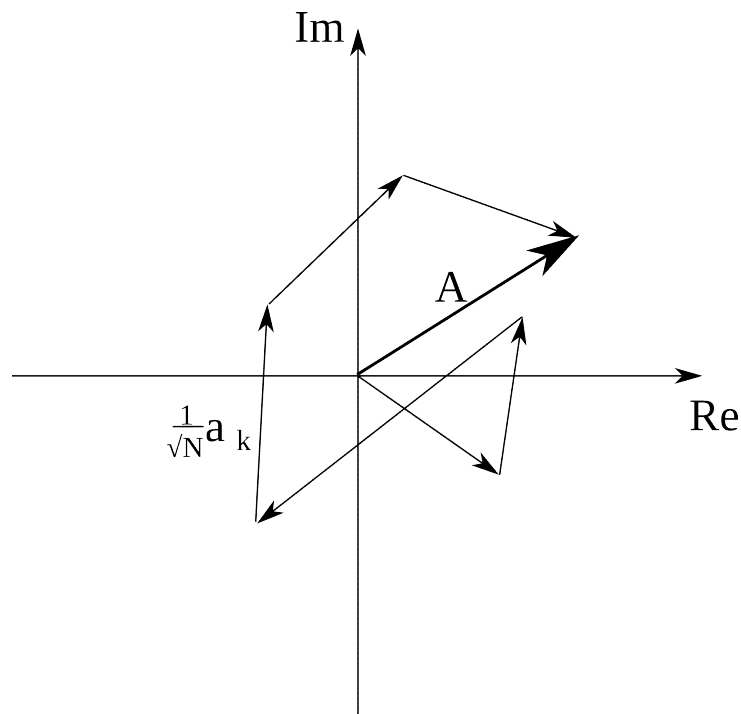


Abbildung 9: Zusammensetzung des Phasors \mathbf{A} durch mehrere komplexe Teilvektoren \mathbf{a}_k in der komplexen Ebene.

⁶Im Anhang A.1 S. 99 werden in diesem Zusammenhang einige Grundlagen zur Kohärenz und zur räumlichen Struktur von Speckles vorgestellt. Eine analoge Gleichung findet sich in A.4, S. 99.

müssen von den komplexen Teilvektoren erfüllt werden, um zu einer Statistik beizutragen, die der vollständig entwickelter Speckle-Verteilungen entspricht:

1. Die einzelnen Elemente müssen statistisch unabhängig voneinander sein.
2. Die Phasen θ_k müssen statistisch gleichmäßig verteilt sein⁷.

Eine Feldverteilung, die auf dieser Grundlage aus komplexen Vektoren zusammengesetzt ist, wird als vollständig entwickeltes Speckle-Feld bezeichnet und lässt sich mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

$$p_I(I) = \frac{1}{\bar{I}} \exp\left(-\frac{I}{\bar{I}}\right) \quad (2.13)$$

beschreiben [72], wobei \bar{I} die Durchschnittsintensität angibt. Daraus folgen im Bezug auf das vollständig entwickelte Speckle-Feld für den Durchschnittswert \bar{I} , dass $\bar{I}^2 = 2\bar{I}^2$ und für die Varianz s^2 , dass $s^2 = \bar{I}^2$ und $s = \bar{I}$ sind. Ein Maß für den Kontrast K eines Speckle-Feldes kann grundsätzlich durch

$$K = \frac{s}{\bar{I}} \quad (2.14)$$

gegeben werden und beläuft sich in diesem Fall auf $K = 1$. Die Verteilung $\bar{I}p_I(I/\bar{I})$ ist in Abbildung 10 zu sehen. Zwei vollständig entwickelte Speckle-Verteilungen können auf

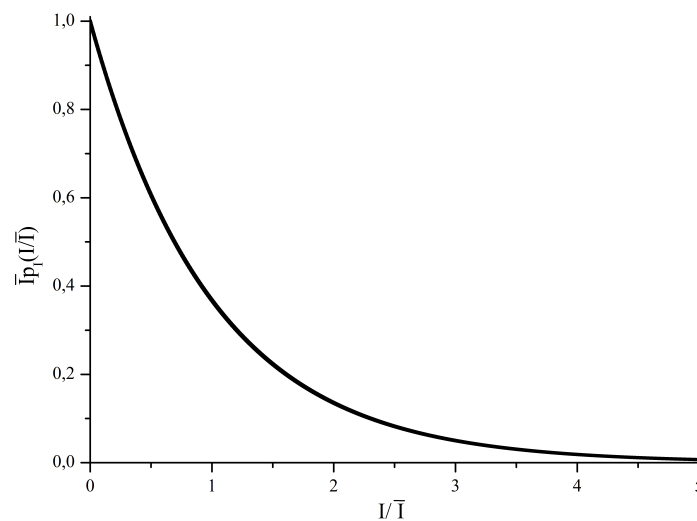


Abbildung 10: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für ein vollständig ausgebildetes Speckle-Feld.

Amplitudenbasis durch Addition überlagert werden, allerdings führt diese Superpositi-

⁷Im Umkehrschluss ergibt sich hieraus, dass für eine Veränderung der Statistik von Speckles diese beiden Forderungen nicht oder nur teilweise erfüllt werden dürfen. So könnte z.B. die Phase nicht vollständig gleichverteilt oder eine Funktion der "Schrittweite" sein.

on nicht zu einer Änderung der Statistik [72]. Die räumliche Struktur der entstehenden Speckles kann aber durchaus verändert werden [73]. In früheren Untersuchungen wurde so u.a. die Verwendung einer ringförmig beleuchteten Streuscheibe erprobt, wobei ein innerer Radius von der Beleuchtung ausgespart wurde [47]. Die so entstandenen Speckles wurden in diesem Zusammenhang "bandbegrenzte Speckles" genannt und besaßen eine nicht nennenswert veränderte Statistik. Im Zusammenhang mit den hier gezeigten Ergebnissen wurde eine derartige Beleuchtung für den Bereich der strukturierten Beleuchtung in der Fluoreszenzmikroskopie [74,75] vorgeschlagen [76]⁸ und diese am Universitätsklinikum Jena erprobt. Die so erzeugten Beleuchtungsstrukturen wurden in diesem Zusammenhang "Bessel-Speckles" genannt. Eine kurze Darstellung über ihre räumlichen Eigenschaften findet sich im Anhang A.2, S. 103.

Die inkohärente Überlagerung von Speckles, also ihre Überlagerung auf Intensitätsbasis, führt im Bezug auf die Statistik zu wesentlichen Veränderungen. Die Superposition zweier statistisch unabhängiger Intensitätsverteilungen I_1, I_2 zu einer Gesamtintensität $I_G = I_1 + I_2$, hat im Vergleich zur Addition der Amplituden einen direkten Einfluss auf die Statistik der entstehenden Verteilung. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p_G(I_G)$ lässt sich für die Fälle $\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}$ und $\bar{I}_1 > \bar{I}_2$ nach

$$p_G(I_G) = \frac{I_G}{\bar{I}^2} \exp\left(-\frac{I_G}{\bar{I}}\right) \quad \text{für } \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I} \quad (2.15)$$

$$p_G(I_G) = (\bar{I}_1 - \bar{I}_2)^{-1} \left[\exp\left(-\frac{I_G}{\bar{I}_1}\right) - \exp\left(-\frac{I_G}{\bar{I}_2}\right) \right] \quad \text{für } \bar{I}_1 > \bar{I}_2 \quad (2.16)$$

bestimmen. Damit ergeben sich die in Abbildung 11 gezeigten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für das Verhältnis der Durchschnittsintensitäten der Speckle-Verteilungen r mit $r = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1}$. Kommt es zur intensitätsbasierten Überlagerung mehrerer Speckle-Muster mit gleicher Durchschnittsintensität $\bar{I}_n = I_0$ wird der Durchschnitt der Gesamtintensität über die Summe der Durchschnitte der Teilintensitäten ausgedrückt. Die Intensität I_G wird dann durch

$$I_G = \sum_{n=1}^N I_n = NI_0 \quad (2.17)$$

⁸Der Vorschlag ist im Patentantrag [76] enthalten und geht explizit auf D. Weigel zurück, der die stärkeren Außenbänder im Ortsfrequenz-Spektrum gezielt erzeugen wollte, um schärfere Abgrenzungen der hellen und dunklen Bereiche zu gewährleisten. Die Bezeichnung "Bessel-Speckles" wurde in diesem Zusammenhang gebraucht.

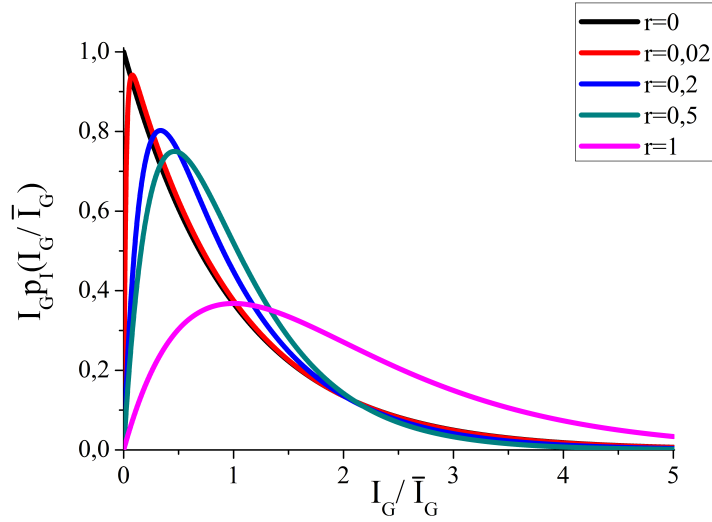


Abbildung 11: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Überlagerung zweier vollständig ausgebildeter Speckle-Felder mit unterschiedlichen Intensitätsverhältnissen.

beschrieben. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann unter dieser Bedingung für N Speckle-Verteilungen durch

$$\begin{aligned}
 p_G(I_G) &= \frac{I_G^{N-1}}{\Gamma(N)I_0^N} \exp\left(-N\frac{I_G}{I_0}\right) \\
 &= \frac{N^N I_G^{N-1}}{\Gamma(N)I_0^N} \exp\left(-N\frac{I_G}{I_0}\right) \stackrel{N \in \mathbb{N}}{=} \frac{N^N I_G^{N-1}}{(N-1)!I_0^N} \exp\left(-N\frac{I_G}{I_0}\right)
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

gegeben werden. Die nach dieser Vorschrift für die Werte $N = 1, 2, 4$ und 12 erzeugten Graphen werden in Abbildung 12 wiedergegeben. Bei der inkohärenten Überlagerung mehrerer Speckles entsteht ein inkohärenter Untergrund, wie in Abbildung 12 zu sehen ist. Je mehr Verteilungen hinzu addiert werden, umso stärker wird dieser Untergrund. Ferner verändert sich auch die Form der Verteilungen und nähert sich mit größer werdendem N der Gauß-Verteilung an⁹. Der Kontrast der sich ergebenden Verteilungen lässt sich mit der Varianz s_G^2 analog zu Gleichung 2.14 bestimmen. Die Varianz wird dabei über

$$s_G^2 = \bar{I}_G^2 - \bar{I}_G^2 = \sum_{n=1}^N \bar{I}_n^2 \tag{2.19}$$

⁹Für große N muss diese Verteilung nach dem zentralen Grenzwertsatz gegen eine Gauß-Verteilung konvergieren. Dies entspricht dem Übergang zu einer inkohärenten Quelle und beantwortet die Frage, warum im Alltag selten Speckles beobachtet werden, die durch natürliche Lichtquellen entstanden sind.

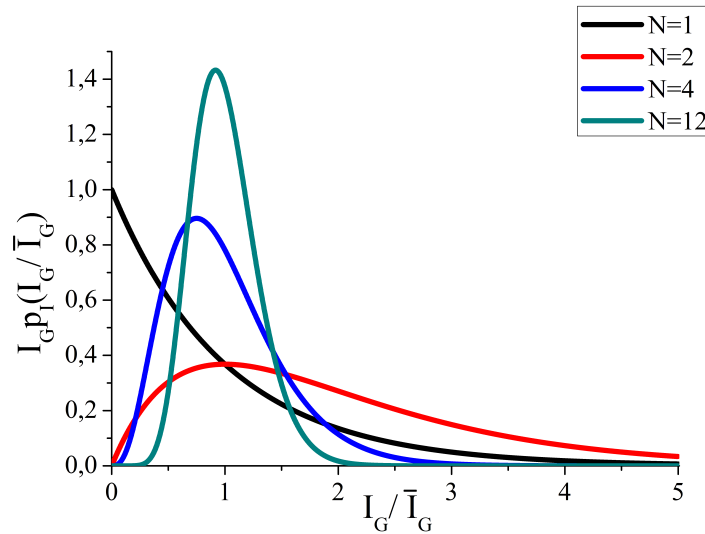


Abbildung 12: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines einzelnen, sowie für die Überlagerung von 2, 4 und 12 vollständig ausgebildeten Speckle-Feldern mit gleichen Intensitätsverhältnissen.

berechnet [72]. Der Kontrast K ist folglich unter Zuhilfenahme der Gleichungen 2.14 und 2.17 durch

$$K = \frac{s_G}{\bar{I}_G} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N \bar{I}_n^2}}{\sum_{k=1}^N \bar{I}_n} \stackrel{\bar{I}_n = I_0}{=} \frac{\sqrt{NI_0^2}}{NI_0} = \frac{1}{\sqrt{N}} = K(N) \quad (2.20)$$

gegeben. Der Kontrast der Gesamtverteilung fällt also mit zunehmender Zahl an inkohärent addierten Einzelverteilungen N mit $N^{-0,5}$ ab. Diese Feststellung wird in den folgenden Unterkapiteln und bei der Begründung der Kontrastreduktion von subjektiven Speckles eine zentrale Bedeutung einnehmen. In früheren Veröffentlichungen und Dissertationsschriften [22, 46] wurden zudem verschiedene Möglichkeiten zusammengestellt, durch eine Veränderung der Zahl an Freiheitsgraden M der Speckle-Verteilungen den resultierenden Kontrast zu beeinflussen. Dazu lässt sich der Polarisationsgrad des die Speckles erzeugenden Feldes heranziehen [77, 78], ebenso die zeitliche Inkohärenz [79, 80], die bereits diskutierte Summe über unkorrelierte Speckle-Verteilungen [81], die Charakteristik der Phase [82] sowie räumliche [83, 84] und zeitliche Integration [26]. Doch auch der Kontrast von partiell korrelierenden Speckle-Verteilungen war bereits Gegenstand von Untersuchungen [82, 85].

2.2.2 Objektive und subjektive Speckles

In den vorhergehenden Abschnitten wurden einige statistische Eigenschaften von Speckle-Verteilungen vorgestellt, jedoch ohne nach den Umständen ihres Zustandekommens zu fragen. Es wird im Allgemeinen zwischen *objektiven* und *subjektiven* Speckles unterschieden. Die Differenzierung bezieht sich dabei auf die Frage, ob die Strukturen unmittelbar durch Streuung entstanden (objektive Speckles) oder durch die Abbildung einer kohärent beleuchteten Oberfläche (subjektive Speckles) zustande gekommen sind.

Die objektiven Speckles können im einfachsten Fall durch die statistische Variation der Phase der Wellenfront eines kohärenten Strahles z.B. durch eine Streuscheibe erzeugt werden, wie in Abbildung 13 dargestellt¹⁰. Hinter der Streuscheibe bilden sich Raumbereiche,

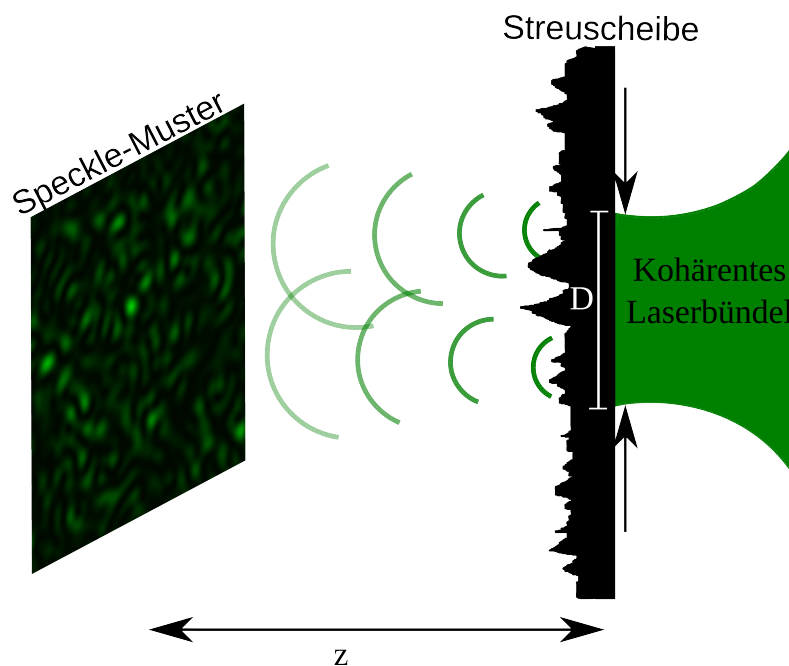


Abbildung 13: Erzeugung objektiver Speckles im Abstand z durch die Beleuchtung einer Streuscheibe mit einem kohärenten Laserbündel des Durchmessers D .

in denen sich das Licht konstruktiv oder destruktiv überlagert. Diese Raumbereiche werden objektive Speckles genannt. Ihre durchschnittliche laterale Ausdehnung Δx_{OS} kann dabei für eine kreisförmige Ausleuchtung auf der Streuscheibe durch den Durchmesser des ausgeleuchteten Bereiches D , die verwendete Wellenlänge λ und den Abstand z von der Streuscheibe, also der Ebene der Streuung, durch

$$\Delta x_{OS} \approx 1,4\lambda \frac{z}{D} \quad (2.21)$$

¹⁰Eine andere Erzeugungsvariante besteht in der Streuung von kohärentem Licht an Metalloberflächen [86]. Dabei kann potentiell eine größere Beleuchtungsintensität erzielt werden.

abgeschätzt werden [72]¹¹. Die axiale Ausdehnung objektiver Speckles Δz_{OS} wird mit einer ähnlichen Näherung für das Fernfeld bei einer kreisförmig ausgeleuchteten Quelle durch

$$\Delta z_{OS} \approx 6,7\lambda \frac{z^2}{D^2} \quad (2.22)$$

wiedergegeben. Der Kontrast objektiver Speckles wird durch die Anzahl der sich inkohärent überlagernden Einzelmuster bzw. die Anzahl an Freiheitsgraden M [22] beschrieben. Die zueinander inkohärenten Muster können aus verschiedenen Quellen stammen und so keine feste Phasenkorrelation besitzen, durch Laufzeitunterschiede aus derselben Quelle erzeugt werden [87], durch die Quelle selbst entstehen, wenn zueinander inkohärente Wellenpakete ausgesandt werden¹² oder durch verschiedene Polarisationszustände der Beleuchtungsquelle [23] zustande kommen. Der Polarisationsgrad der Beleuchtung P_{Bel} kann die Anzahl an Freiheitsgraden um $\frac{2}{1+P_{Bel}^2}$ [22] erhöhen. Der sich für objektive Speckles ergebende Kontrast kann nach Gleichung 2.20 aus den inkohärent addierten Einzelmustern N_{Obj}^* ermittelt werden. P_{Bel} kann dabei einzeln betrachtet werden, indem die Anzahl der nicht durch Polarisierungseffekte entstandenen Muster N_{Obj} herangezogen wird. Der Kontrast objektiver Speckles

$$K_{Obj} = \sqrt{\frac{1}{N_{Obj}^*}} = \sqrt{\frac{1}{N_{Obj}}} \cdot \sqrt{\frac{1 + P_{Bel}^2}{2}} \quad (2.23)$$

kann mit einer einzelnen Aufnahme bestimmt werden, wenn die Speckles größer als ein Bildelement eines Detektors sind, wenigstens ein ganzes Speckle betrachtet wird und der Kontrast der subjektiven Speckles im Vergleich zu dem der objektiven Speckles klein ist. Der Kontrast kann allgemeiner auch aus einem Satz von Aufnahmen objektiver Speckles bestimmt werden, wenn die Aufnahmen unter denselben Bedingungen angefertigt, aber jeweils eine andere objektive Speckle-Verteilung mit gleichen statistischen Eigenschaften erzeugt wird. Die Grauwertstapel einzelner Pixel werden dazu nach 2.14 (S. 16) ausgewertet.

Sobald eine kohärent beleuchtete Oberfläche abgebildet wird, entstehen durch die Überlagerung mehrerer phasenversetzter Amplitudenspreitzfunktionen bzw. Punktbildverwaschungsfunktionen Raumbereiche konstruktiver und destruktiver Interferenz (Abb. 14). In Analogie zu den objektiven Speckles werden diese Bereiche subjektive Speckle genannt.

¹¹Diese laterale Ausdehnung bezieht sich jeweils auf die Raumrichtung, in der der Durchmesser in der Streuebene ermittelt wurde. Durch eine Abweichung von einer lateralen Kreisform hin zu einer Ellipse bzw. einer linienartigen Ausleuchtung kann die Ortsfrequenz der Speckles lateral richtungsabhängig gestaltet werden.

¹²Ein starkes Indiz für den letztgenannten Fall ist gegeben, wenn die sogenannte Beugungsmaßzahl M^2 einer Laserquelle größer als 1 ist. Im Anhang A2 dieser Arbeit wird dargestellt, dass im Allgemeinen nur für $M^2 = 1$ die Anzahl der beteiligten Moden bekannt ist.

Die laterale (Δx_{SuS}) und axiale Ausdehnung (Δz_{SuS}) der Speckles hängen nun vom Ab-

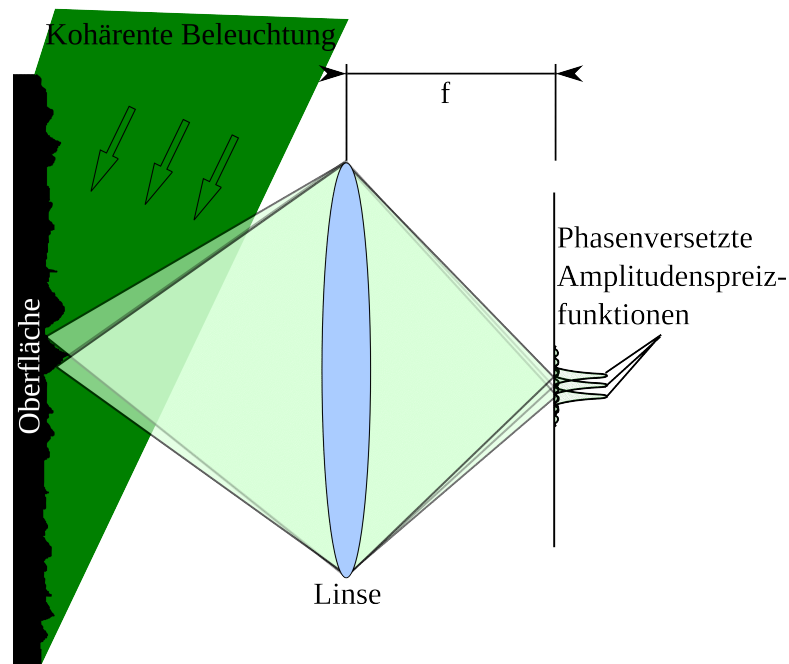


Abbildung 14: Entstehung subjektiver Speckles in der Brennebene im Abstand f von der Linse in Abhängigkeit vom Linsendurchmesser D_L durch die Abbildung einer kohärent beleuchteten Fläche.

stand der Ebene, in dem die Speckles auf einem Schirm aufgefangen werden, und vom Durchmesser der abbildenden Linse D_L ab. Da in den meisten Fällen eine Abbildung in die Brennebene einer Linse vorgenommen wird, ist mit der Brennweite f der Abstand von der Abbildungsebene fixiert. Durch die sogenannte "Blendenzahl" $F_{\#}$, lassen sich diese Größen nach $F_{\#} = f/D_L$ ins Verhältnis setzen [88]. Analog zu den Gleichungen 2.21 und 2.22 lassen sich so die laterale Ausdehnung Δx_{SuS} und die axiale Ausdehnung Δz_{SuS} der subjektiven Speckles durch die Gleichungen

$$\Delta x_{SuS} \approx 1,4\lambda F_{\#} \quad (2.24)$$

$$\Delta z_{SuS} \approx 6,7\lambda F_{\#}^2 \quad (2.25)$$

nähern [72]. Subjektive Speckles sind standortabhängig, treten oft als Störeffekt auf und werden auch als "kohärentes Rauschen" wahrgenommen. Da bei der Abbildung von verschiedenen Standpunkten ein eigenes, statistisches Muster auftritt, auch, wenn identische Linsen dasselbe Objekt abbilden, bewirken subjektive Speckles, dass im selben Objektpunkt entsprechende Bildbereiche mit unterschiedlichen Helligkeiten beobachtet werden.

Der Kontrast K_{SuS}^* subjektiver Speckles bei Linientriangulationsverfahren kann nach

$$K_{SuS}^* = K_{Zeitl} \cdot K_{Räuml} \cdot K_{Pol}^* \cdot K_{Pixel} \quad (2.26)$$

bestimmt werden [46]. Die Faktoren K_{Zeitl} und $K_{Räuml}$ beschreiben, inwieweit die zeitliche bzw. die räumliche Kohärenz den Gesamtkontrast der subjektiven Speckles K_{SuS}^* beeinflusst. Der Faktor für die zeitliche Kohärenz lässt sich nach

$$K_{Zeitl} = \left(1 + \left(\frac{4\delta h}{l_{Ko}} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (2.27)$$

bestimmen. Hier stellt δh die Rauigkeit der die Speckles erzeugenden Oberfläche dar, und l_{Ko} entspricht der Kohärenzlänge des verwendeten Lichts nach A.14 (S. 101). Bei der Beschreibung der räumlichen Kohärenz nach [46] sind der Beleuchtungswinkel u_{Bel} und der Winkel der Beobachtungsapertur u_{Beob} entscheidend. Der Ausdruck für $K_{Räuml}$ gibt diesen Zusammenhang in der Form

$$K_{Räuml} = \min \left(\frac{\sin u_{Beob}}{\sin u_{Bel}}, 1 \right) \quad (2.28)$$

wieder. Hierbei sollte beachtet werden, dass sich die Formel 2.28 auf räumlich inkohärente Quellen bezieht und bei annähernd idealer kohärenter Beleuchtung, wie sie bei der Beleuchtung durch objektive Speckles vorliegt, ein Wert von 1 angenommen werden kann. Die Polarisation kann ebenfalls zu einer Kontrastminderung der subjektiven Speckles beitragen. Der Polarisationsgrad kann zwischen 0 (unpolarisiert) und 1 (vollständig polarisiert) liegen, sodass dieser Faktor nur zwischen $\frac{1}{\sqrt{2}}$ und 1 liegen kann. Subjektive Speckles sind dagegen sowohl vom Polarisationsgrad der Beleuchtung als auch vom Polarisationsgrad des Lichts nach der Streuung durch die beleuchtete Oberfläche P_{Ob} abhängig [23]. Aus beiden Polarisationsgraden ergibt sich

$$K_{Pol}^* = \sqrt{\frac{1 + P_{Ob}^2}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1 + P_{Bel}^2}{2}} \quad (2.29)$$

Damit kann der Faktor K_{Pol}^* Werte zwischen $\frac{1}{2}$ und 1 annehmen. Der Faktor K_{Pol} , der ausschließlich durch die Polarisationsseigenschaften der beleuchteten Oberfläche hinzukommt, kann dagegen analog zu Gleichung 2.23 als

$$K_{Pol} = \sqrt{\frac{1 + P_{Ob}^2}{2}} \quad (2.30)$$

definiert werden. Die Größe K_{Pix} wird im Rahmen dieser Arbeit im Gegensatz zu [46] $K_{Pix} = \min\left(\frac{\lambda F_{\#}}{a \cdot \sin u_{Beob}}, 1\right)$ durch einen leicht veränderten Ansatz wiedergegeben, bei dem das Flächenverhältnis von Detektorelementen und Speckles durch das Vorwissen über Brennweite und Blende der abbildenden Optik ausgewertet wird. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei optischen Detektoren, wie CCD- oder CMOS-Elementen, um "phasenblinde" Detektoren handelt, die die zeitlich und räumlich gemittelte Intensität eines Wellenfeldes ausgeben. Für ein Sensorelement bzw. Pixel mit rechteckigen Abmessungen und den Seitenlängen a und b , wobei nur der photosensitive Bereich des Pixels herangezogen wird, folgt für die räumliche Mittelung über $I(x, y)$ die vereinfachte Darstellung

$$I_{Detektor} = \frac{1}{abT_V^2} \int_0^{aT_V} \int_0^{bT_V} I(x, y) dx dy . \quad (2.31)$$

Die meisten kommerziellen Detektorelemente haben eine quadratische Form, sodass $a = b$ angenommen werden kann. Das Tastverhältnis T_V beschreibt dabei das Verhältnis der photosensitiven Seitenlänge zur gesamten Seitenlänge eines Pixels.¹³ Die vom Detektorelement aufgenommene Intensität ist also eine Mittelung über einen Teil eines subjektiven Speckles für den Fall, dass $\Delta z_{SuS} > a$. Für $\Delta z_{SuS} = a$ entspricht die Intensität $I_{Detektor}$ der des Speckles, für $\Delta z_{SuS} < a$ entspricht sie einem Vielfachen der Speckle-Intensität. Da aber auch eine Mittelung über mehrere räumlich versetzte subjektive Speckles durchgeführt wird, kommt es ebenfalls zu einer Veränderung des Speckle-Kontrastes K_{SuS} , wenn $\Delta z_{SuS} < a$. Die laterale Form der subjektiven Speckles kann für eine kreisförmige Blende ebenfalls als nahezu kreisförmig angenommen werden [23], sodass die Anzahl N_{SuS} der im untersuchten Pixel zu findenden subjektiven Speckles durch das in

$$N_{SuS} = \frac{A_{Aufnahme}}{A_{SuS}} = \frac{a^2 T_V^2}{2\pi \left(\frac{\Delta x_{SuS}}{2}\right)^2} \quad (2.32)$$

gegebene Verhältnis der Flächen $A_{Aufnahme}$ und A_{SuS} bestimmt werden kann. Der Kontrast der vom Detektorelement wahrgenommenen subjektiven Speckles kann K_{Pix} durch

$$K_{Pix}(N_{SuS}) = K_{Pix}(N_{SuS}(a, \Delta x_{SuS})) = \frac{1}{\sqrt{N_{SuS}}} \approx \min\left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\Delta x_{SuS}}{a T_V}, 1\right) \quad (2.33)$$

ausgedrückt werden. Durch die Näherungsformel für die laterale Größe der subjektiven Speckles aus Gleichung 2.24 lässt sich der Kontrast K_{Pix} in Abhängigkeit der Blendenzahl

¹³Die meisten CCD-Sensoren haben ein Tastverhältnis von 0,85 – 0,9, viele CMOS-Chips ein Tastverhältnis von 0,7.

$F_{\#}$, der Wellenlänge λ und der Größe des photosensitiven Teils eines Pixels a nach

$$K_{Pix} = \min\left(K_{Pix}(N_{SuS}(a, F_{\#}, \lambda)), 1\right) \approx \min\left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1,4\lambda F_{\#}}{aT_V}, 1\right) \quad (2.34)$$

$$\stackrel{T_V=0,85}{\approx} \min\left(1,4 \frac{\lambda F_{\#}}{a}, 1\right)$$

beschreiben. Durch eine passende Auswahl der Parameter kann der Kontrast der subjektiven Speckles variiert und so ggf. gesenkt werden. Für eine weite Blendenöffnung, also für kleine $F_{\#}$, sinkt der Kontrast, ebenso wenn eine kleinere Wellenlänge verwendet wird oder ausgedehntere Pixel zum Einsatz kommen. Die Schärfentiefe eines Linsensystems ist allerdings indirekt proportional zur Blendenöffnung [88], sodass zwischen der Reduktion des Kontrasts der subjektiven Speckles durch K_{Pix} und den erwünschten Abbildungseigenschaften der Optik abgewogen werden muss. Es ist aber zu betonen, dass die stärkste Reduktion des Kontrasts subjektiver Speckles durch die Verwendung eines großen Beobachtungswinkels, also einer großen Apertur gegeben ist. Dieser Zusammenhang wird bereits durch die Formel 2.2 wiedergegeben und bestätigt die Erwartung aus der Lasertriangulation. Sollte diese Möglichkeit aber ausgereizt sein, müssen andere Lösungen zur weiteren Reduktion des Kontrasts subjektiver Speckles gefunden werden.

Neben den genannten vier Einflussfaktoren kann es auch durch die Laserquelle selbst zu einer Senkung des Kontrastes subjektiver Speckles kommen. Wenn durch dieselbe Quelle mehrere zueinander inkohärente Strahlenbündel ausgesandt werden, wird durch jedes auch ein eigener Satz subjektiver Speckles erzeugt, die sich inkohärent addieren. Für die Stereophotogrammetrie ist also über die von Willomitzer et al. vorgeschlagene Kontrastbewertungsfunktion 2.26 noch der bereits erwähnte Faktor $\frac{1}{\sqrt{N_{Obj}^*}} = K_{Obj}$ [23] hinzuzufügen, bei der N_{Obj}^* die Anzahl der inkohärenten Strahlenbündel angibt. Diese Zahl kann experimentell aus dem Kontrast der objektiven Speckles ermittelt werden, wenn bekannt ist, ob Polarisationseffekte bei der Speckle-Erzeugung eine Rolle spielten und so ggf. der Kontrast gesenkt wurde. Der Kontrast K_{SuS} kann dann durch

$$K_{SuS} = K_{Zeitl} \cdot K_{Räuml} \cdot K_{Pol} \cdot K_{Pixel} \cdot K_{Obj} \quad (2.35)$$

bestimmt werden. Die subjektiven Speckles hängen in ihrem Kontrast also direkt vom Kontrast der objektiven Speckles ab und entstehen durch die Überlagerung der Wellenfelder, die nach der Streuung an der oder den Objektoberflächen durch die Kameraobjektive auf die Sensoren abgebildet werden. Dadurch kann der Kontrast der durch die Abbildung entstandenen Strukturen höchstens so groß sein wie der Kontrast der Muster vor der Abbildung.

3 Reduktion subjektiver Speckles

Die 3D-Messung mit kohärenter Beleuchtung bringt neben einigen Vorteilen auch Nachteile im Vergleich zu inkohärenten Methoden mit sich. Vorteilhaft für die Beleuchtung ist die hohe Intensität, mit der die strukturierte Beleuchtung z.B. bei der Verwendung von Speckle-Mustern betrieben werden kann. Hier kann theoretisch genug Licht für über 100.000 Aufnahmen pro Sekunde bereit gestellt werden [21,22]. Zudem ist der Aufbau zur Erzeugung derartiger Muster recht übersichtlich und einfach umzusetzen. Ferner können bei quasi-monochromatischer Beleuchtung Bandpassfilter verwendet werden, die eine 3D-Messung auch bei tagheller Störbeleuchtung ermöglichen [22]. Das augenfälligste Merkmal von kohärenten Speckle-Mustern ist jedoch der große Raumbereich, mit einer Tiefenausdehnung von mehreren Metern, der mit kontraststarken Mustern gefüllt wird. Entgegen diesen positiven Eigenschaften durch die Beleuchtung von Objekten zum Zweck der 3D-Messung steht vor allem ein typisches Phänomen der kohärenten Beleuchtung: das Zustandekommen der in den Grundlagen vorgestellten subjektiven Speckles (S. 20). Diese statistischen Muster sind bei der Objektbeobachtung in ihren statistischen Eigenschaften, wie Größe und Form, von der verwendeten Blende und im Bezug auf ihre Phase von Abstand, Orientierung und Position zum Objekt abhängig. Die letztgenannte Eigenschaft ist ein erhebliches Hindernis für die Stereophotogrammetrie, da die standortunterschiedlichen Detektoren bzw. Kameras so grundsätzlich verschiedene subjektive Speckles auf derselben Objektoberfläche wahrnehmen. Bei Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems, wie der hier angewendeten zeitlichen, normierten Kreuzkorrelation, sorgt diese Art des statistischen Rauschens für eine Senkung der Zuordnungsgenauigkeit, die erheblichen Einfluss auf die Vollständigkeit der Rekonstruktionen und die Standardabweichung von einer Ideal- oder Ausgleichsfläche hat. Verschiedene andere Forschungsfelder sind ebenfalls mit diesem Rauschen konfrontiert und können von der Reduktion subjektiver Speckles profitieren. Dabei wurden sowohl experimentelle [26–29], als auch numerische [24, 25] Methoden verwendet. Die experimentellen Methoden ließen sich aber nicht auf die Stereophotogrammetrie übertragen, ohne das auch die objektiven Speckles in ihrem Kontrast reduziert worden wären. Die numerischen Verfahren wiederum waren auf Anwendungen mit nur einer Kamera angelegt und hätten mit hoher Wahrscheinlichkeit zu den Rekonstruktionshindernissen beigetragen. In früheren Arbeiten hat sich stattdessen die Verwendung einer zweiten Streuscheibe bei der Reduktion subjektiver Speckles als sehr hilfreich erwiesen [22].

Diese wurde hinter der zur Erzeugung der objektiven Speckles nötigen Streuscheibe als Schirm eingesetzt. Durch eine Abbildungsoptik wurde das von dieser Scheibe stammende Licht in das Messvolumen projiziert. Durch eine schnelle Rotation der zweiten Streuschei-

be konnte die räumliche Kohärenz des Lichtes teilweise aufgehoben werden, da durch die Aufnahmezeit der Sensoren der Kameras die sich schnell ändernden subjektiven Speckles auf dem Objekt nicht mehr aufgelöst werden konnten. Während einer Aufnahme wurde also über mehrere jeweils kohärente, jedoch zueinander inkohärente Muster gemittelt, deren Summe aber immer noch das objektive Speckle-Muster beinhaltete. Diese Technik brachte allerdings den Nachteil mit sich, dass zum einen ein Teil der Intensität durch einen zweiten Streuvorgang verloren ging und dass vor allem der Raumbereich, der durch objektive Speckles mit kontraststarken Mustern gefüllt wurde, auf die Tiefenausdehnung eines inkohärenten Abbildungssystemes, vorgegeben durch die Abbildungsoptik, reduziert wurde. Ein Ziel dieser Arbeit war es daher, andere Methoden zur Reduktion subjektiver Speckles zu finden, die nach Möglichkeit weder mit einem Lichtverlust, noch mit einer Verkleinerung des Bereichs einhergingen, in denen die objektiven Speckles einen hohen Kontrast besaßen, und die Messzeit nur geringfügig beeinflussten. Dazu wurde sowohl bei objektiven, als auch bei subjektiven Speckles von *ergodischen* Verteilungen ausgegangen, bei denen räumliche (*Scharmittel*) und zeitliche Mittelwerte gleich sind. Im folgenden Unterkapitel 3.1 wird eine experimentelle Methode vorgestellt, den Kontrast subjektiver Speckles zu reduzieren, indem die Kameras das Messvolumen über sich bewegende Spiegel betrachteten. Neben dem Kontrast in den Aufnahmen wird auch die Standardabweichung zu Ausgleichsflächen und die Vollständigkeit von 3D-Rekonstruktionen untersucht. In Abschnitt 3.2 werden lineare Filterfunktionen vorgestellt. Diese wurden zuerst in Simulationen getestet, bevor die experimentell erzeugten Aufnahmen numerisch nachbearbeitet wurden. Der Einfluss der Filter auf den Kontrast, ebenso wie auf die Rekonstruktionseigenschaften war dabei Gegenstand der Betrachtung. Zum Abschluss dieses Kapitels folgt darauf eine Zusammenfassung und die Nennung wesentlicher Ergebnisse.

3.1 Experimentelle Reduktionsverfahren

Eine Idee zur Reduktion des Kontrastes subjektiver Speckles kam durch die Überlegung zustande, dass das Rauschen nicht nur positionsabhängig, sondern auch positionsspezifischer Natur ist [89]. Eine Bewegung der Kameras lateral zur Beobachtungsrichtung während der Aufnahme führte so zur Mittelung zwischen mehreren subjektiven Speckles und somit zur Kontrastreduktion. Die einfachste Umsetzung gelang durch die Betrachtung des Messvolumens über Spiegel¹⁴ die auf beweglichen Piezoelementen (PI-S-330.2SD) befestigt waren, sodass eine zeitabhängige Änderung des Beobachtungsstrahlenganges während der Aufnahme möglich wurde (siehe Abbildung 15). Der Aufbau bestand neben

¹⁴Die verwendeten Spiegel hatten einen Durchmesser von 25 mm, waren auf den Wellenlängenbereich 350 nm - 750 nm ausgelegt und besaßen "optische Qualität", also eine Oberflächenrauigkeit $< \lambda/10$.

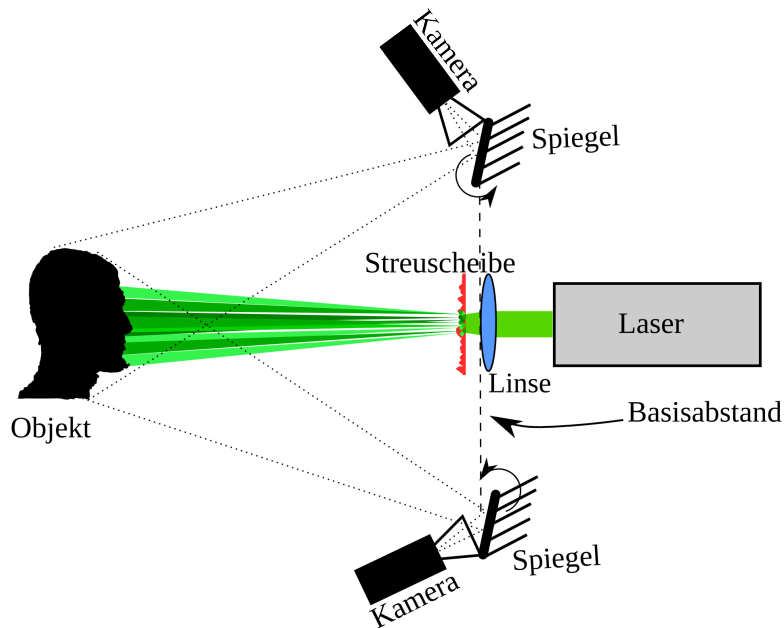


Abbildung 15: Stereophotogrammetrischer Messaufbau zur Reduktion subjektiver Speckles durch die Verwendung beweglich angebrachter Spiegel.

den Spiegeln und den Piezoelementen aus zwei Kameras (AVT-Pike F-032b, Pixelabstand: $7,4 \mu m$, Objektiv: Cosmicar Television Lens, $f: 50 \text{ mm}$, $F_{\#}: 1,8$), einem Laser (MGL-F-532-2W, $\lambda: 532 \text{ nm}$, max. Leistung: 2 W , Betriebsart: kontinuierlich, $M^2 < 1,2$). Das Messvolumen war $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ groß, wobei der Abstand der Basis vom Messvolumenzentrum 128 cm betrug und der Winkel zwischen den Sichtstrahlen der Kameras bei $30,5^\circ$ lag. Der maximale Winkel zwischen den Epipolarlinien und der Horizontalen in den Aufnahmen betrug $3,1^\circ$ (die Spezifikationen des Aufbaus sind in Tabelle 1 S. 107 zusammengefasst). Die Abstände von Linse, Streuscheibe und Messvolumenzentrum wurden so gewählt, dass die durchschnittliche objektive Speckle-Größe im Messvolumenzentrum bei etwa 10 Pixeln aus Sicht der Kameras lag. Eine Bewertung der histogrammischen Verteilung der Speckles und des Kontrastverlaufes konnte vorgenommen werden, indem 300 Aufnahmen einer Ebene (zertifizierte Ebenheitsabweichung $< 2 \mu m$) unter Beleuchtung mit objektiven Speckles betrachtet wurden. Da im weiteren Verlauf dieses Kapitels Vergleichsmessungen herangezogen wurden, bei denen bandbegrenzte Muster (BBM) durch einen Projektor zur Beleuchtung verwendet wurden, ist neben dem Histogramm der Speckles auch das Histogramm der BBM in Abbildung 16 aufgetragen. Die Häufigkeit der Grauwerte der projizierten BBM war im Experiment nicht gleichmäßig verteilt, obwohl alle Graustufen in den Ausgangsverteilungen gleich oft auftraten. Diese Abweichung war auf den Projektor zurückzuführen, der die Grauwertstrukturen nicht vorgabengetreu, sondern nur durch einen sogenannten GAMMA-Wert verändert übertrug. Zudem kam es offenbar

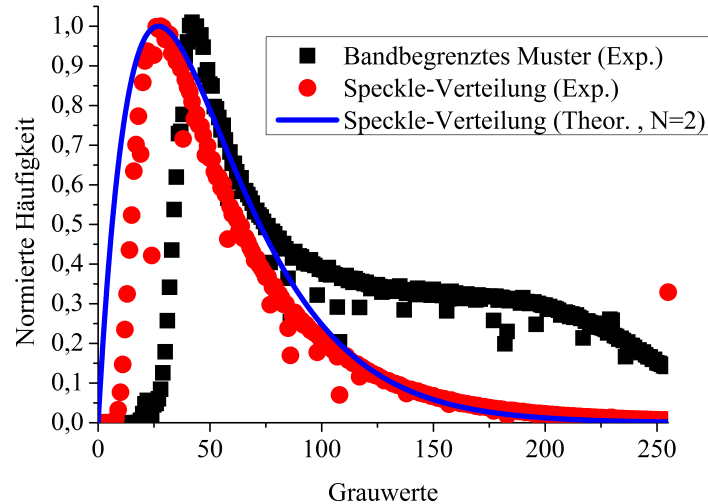


Abbildung 16: Histogramm der Speckle-Verteilungen und der bandbegrenzten Muster (BBM) aus dem Experiment und theoretische Verteilungskurve für zwei inkohärent überlagerte Speckle-Verteilungen. Alle Werte wurden über die Grauwerte von 0 bis 255 aufgetragen und auf ihr Maximum (bei einer Graustufe < 255) normiert. Bei den Speckles besaßen 0,55% der Pixel den maximalen Grauwert und bei den BBM etwa 4,1%.

zur Ausbildung eines Helligkeitsuntergrundes, sodass kaum Grauwerte der kleinsten Stufen beobachtet wurden. Trotzdem besaß das Histogramm der inkohärenten BBM eine größere Homogenität als die Speckle-Verteilungen. Schon Große [47] und Schaffer [22] haben nachgewiesen, dass die ungleichmäßige histogrammische Verteilung der Speckle-Muster z.B. im Vergleich zu BBM oder Sinus-Mustern messtechnische Nachteile mit sich gebracht hat. Die Häufigkeitsverteilung der Speckles folgte hier grob der theoretischen Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für zwei inkohärent addierte Speckle-Muster, besaß jedoch auch einen inkohärenten Untergrund, der darauf schließen ließ, dass es zur inkohärenten Überlagerung weiterer Muster gekommen war¹⁵. Der Kontrast der objektiven Speckles betrug 0,68. Aus diesem Wert und der Verteilung des Histogramms ließ sich folgern, dass durch den Laser wenigstens zwei zueinander inkohärente Beleuchtungsmuster erzeugt wurden.

Die 300 Einzelaufnahmen der durch objektive Speckles beleuchteten Ebene wurden summiert, um eine möglichst homogene Intensitätsverteilung zu erreichen. Die Spiegel wurden während der Aufnahmen periodisch um verschiedenen Amplituden bewegt, wobei die Bewegung nur entlang einer Achse erfolgte, sodass das Bild sich aus Sicht der Kameras in

¹⁵Durch die Verwendung von Linsen und Streuscheiben, könnten Reflexe an den Grenzflächen in das Messvolumen geworfen werden, die unter Umständen sogar als eigenständige Speckle-Verteilungen aufgetreten sein könnten.

vertikaler bzw. horizontaler Richtung verschob. Zur Messung wurde die Spiegelbewegung mit einer Frequenz von 500 Hz verwendet. Die Aufnahmezeit der Kameras lag bei 14 ms, sodass während einer Aufnahme mehrere Perioden des "Schüttelns" der Spiegel aufgenommen wurden. Die jeweils aus den Summenbildern aus 300 Einzelaufnahmen ermittelten Kontraste sind in Abbildung 17 über den Amplituden der Bewegungen der Spiegel in μrad aufgetragen¹⁶. Mit zunehmender Bewegungsamplitude sank der Kontrast von 0,166 un-

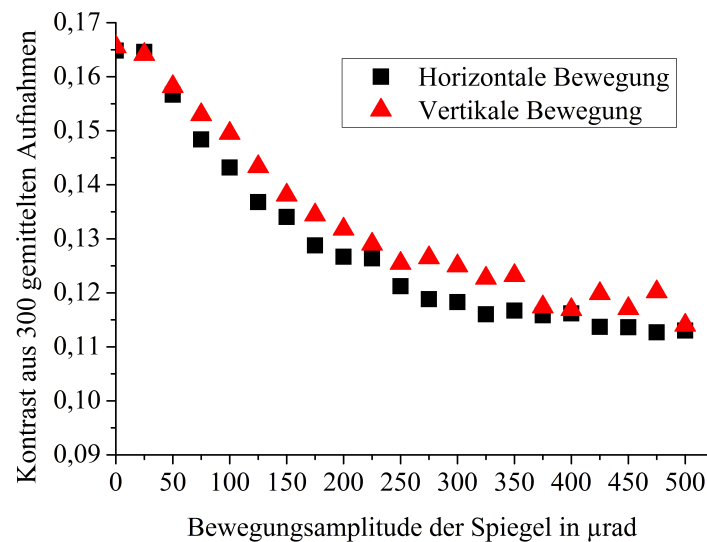


Abbildung 17: Kontrast in den Aufnahmen einer kohärent beleuchteten Ebene (Mittelung über 300 Einzelaufnahmen unter Beleuchtung mit objektiven Speckles) bei verschiedenen Spiegelbewegungsamplituden.

ter 0,115. Die Reduktion des Kontrastes durch eine Veränderung des Beobachtungsweges während der Messung bzw. durch die experimentelle Mittelung zwischen benachbarten Bildbereichen war also möglich. Da sich der Kontrast für beide Bewegungsrichtungen bei größer werdenden Bewegungsamplituden ähnlich verhielt, war eine Vorzugsrichtung anhand dieser Ergebnisse nicht auszumachen.

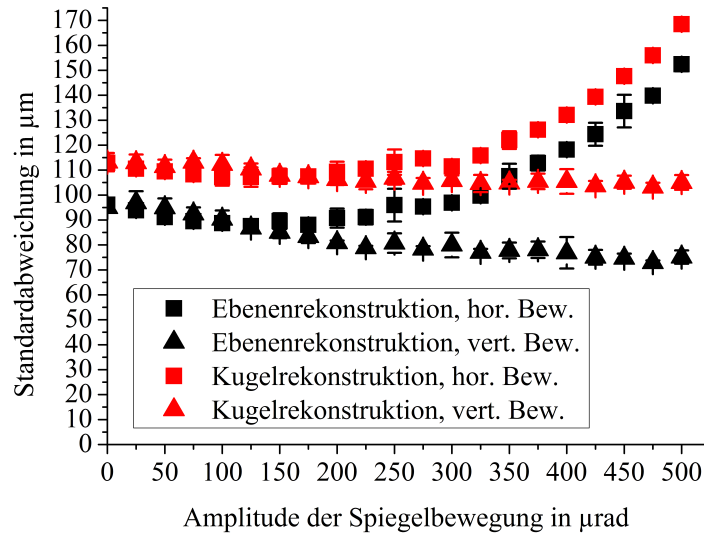
Ein Anteil von etwa 0,04 des Kontrastwertes war wegen $K = \frac{K_{Obj}}{\sqrt{N}}$ auf den verbliebenen Kontrast der gemittelten 300 objektiven Speckle-Verteilungen zurückzuführen. Die in den Grundlagen (Kapitel 2.2.2) vorgestellte Formel zur Bestimmung des Kontrasts der subjektiven Speckles 2.35 (S. 25) konnte hier angewandt werden. Der zeitliche Anteil des Kontrasts K_{Zeitl} konnte durch die Kohärenzlänge von einigen Zentimetern und die geringe Höhenabweichung als 1 und der Wert $K_{Räuml}$ ebenfalls als 1 angenommen werden. Das

¹⁶Die Bewegung der Spiegel hatte keinen wahrnehmbaren Einfluss auf die Histogramme der objektiven Speckles, darum wurde in Abbildung 16 nur ein Histogramm pro Beleuchtungsart beispielhaft wiedergegeben.

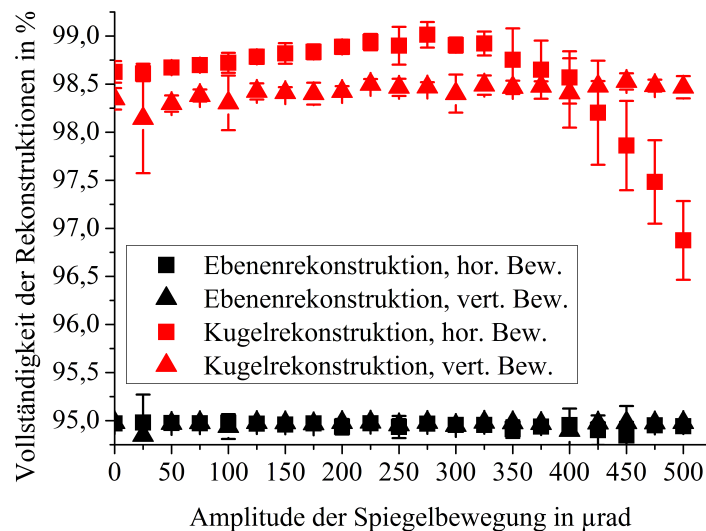
Licht war auch nach dem Passieren der Streuscheibe annähernd vollständig linear polarisiert. Nachdem es von der Objektoberfläche gestreut wurde, war es allerdings vollständig unpolarisiert, sodass $K_{Pol} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ gesetzt werden konnte. Die spezialisierte Formel für den Kontrastwert durch den Einfluss der Pixel (vgl. Gleichung 2.32) liefert mit $F_{\#} = 1,8$, dem Pixelabstand von $7,4 \mu m$ und der Wellenlänge von $532 nm$ etwa den Wert $0,18$. Durch den Ausgangskontrast der objektiven Speckles von $0,68$ folgt ein Kontrast von $0,087$. Da die experimentelle Kontrastreduktion nur zu einem Rückgang im Kontrast um $0,051$ geführt hat, kann davon ausgegangen werden, dass der Kontrast noch nicht maximal möglich verringert wurde. Ferner scheint es neben dem Restkontrast der gemittelten objektiven Speckles noch einen weiteren Kontrastuntergrund gegeben zu haben. Dieser könnte sich z.B. aus inkohärenten Streulichtanteilen zusammengesetzt haben und wurde so durch die Filterung kaum beeinflusst.

Um den Einfluss der Bewegung der Spiegel während der Aufnahme auf den Messvorgang bewerten zu können, wurden Messserien durchgeführt, bei denen die bereits verwendete Ebene und eine Kugel mit einer Kugelabweichung $< 3 \mu m$ vermessen wurden. Für jede Einzelmessung wurden 30 Stereoaufnahmen unter Speckle-Beleuchtung angefertigt. Die Spiegel wurden während der Aufnahme um Amplituden zwischen 0 bis $500 \mu rad$ in Schritten von $25 \mu rad$ bewegt. Bei jeder der 21 eingestellten Bewegungsamplituden wurden 10 Einzelmessungen durchgeführt, unter horizontaler und anschließend auch unter vertikaler Bewegung der Spiegel. Die sich ergebenden Rekonstruktionen wurden im Bezug auf ihre Standardabweichung zu Ausgleichsflächen und auf ihre Vollständigkeit untersucht. Jeder Satz von 10 Messungen bei gleicher Amplitude und gleicher Filterrichtung wurde gemittelt und die Standardabweichung der 10 Messungen zu diesem Mittelwert als Fehlerbalken angegeben. Die ermittelten Werte sind in Abbildung 18 über die Amplituden der Spiegelbewegung aufgetragen¹⁷. Die Standardabweichung der rekonstruierten 3D-Punkte von Ausgleichsebenen nahm für Amplituden kleiner $150 \mu rad$ für beide Bewegungsrichtungen ab, für die horizontale Bewegung um maximal $8,9\%$. Von hier an stiegen jedoch die Werte für die horizontale Spiegelbewegung, während die Standardabweichung für die vertikal orientierte Bewegung weiter sank und bei der größten hier untersuchten Amplitude eine Abnahme um $20,9\%$ beobachtet werden konnte. Ein Vergleich mit der theoretisch optimalen Präzision aus der Lasertriangulation (Gleichung 2.2) lieferte einen Wert von $\frac{1}{2\pi} 50,5 \mu m$. Die Vollständigkeit der Rekonstruktionen für beide Fälle lag bei 95% . Die Punktwolken, die aus den Aufnahmen der Kugel erzeugt wurden, zeigten im Bezug auf die Standardabweichung ein ähnliches Verhalten. Erst bei einer Amplitude von $200 \mu rad$ wurden Unterschiede zwischen den Bewegungsrichtungen deutlich. Ab diesem Wert stieg wiederum die Standardabweichung bei horizontaler Bewegung, während die vertikal ori-

¹⁷Erste Ergebnisse wurden im Tagungsband der Oldenburger 3D Tage 2020 veröffentlicht [84].



a)



b)

Abbildung 18: a) Standardabweichung der Rekonstruktionen einer Ebene und einer Kugel im Bezug zu Ausgleichsflächen in μm als Funktion der horizontalen bzw. vertikalen Bewegungsamplitude der Spiegel in μrad , b) Vollständigkeit der Rekonstruktionen (Ebene maximal 107.520 Punkte, Kugel maximal 14.100 Punkte) in Abhängigkeit von der Bewegungsamplitude.

entierten Filter eine weitere Absenkung bewirkten. Die Standardabweichung konnte bei horizontaler Filterung um 5% und bei vertikal orientierter Mittelung um maximal 8,4% gesenkt werden. Die Vollständigkeit sank gleichzeitig bei größerer horizontaler Filterung um einige Prozent, während die vertikal gefilterten Bilder im Wesentlichen gleichbleibend vollständige Rekonstruktionen lieferten. Anhand dieser Daten ließ sich ein Vorzug für

die vertikale Filterung gegenüber der horizontalen Filterung feststellen, da sowohl die Vollständigkeit, als auch die Präzision für die vertikal orientierten Filterungen zunahm. Der Kugelradius war auf den Wert $15.000 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$ zertifiziert. In Abbildung 19 sind die Abweichungen der für die Punktwolken gefundenen Ausgleichskugeln zu diesem Radius angegeben¹⁸. Die Radien der Ausgleichskugeln lagen zwar für kleine Filtergrößen recht

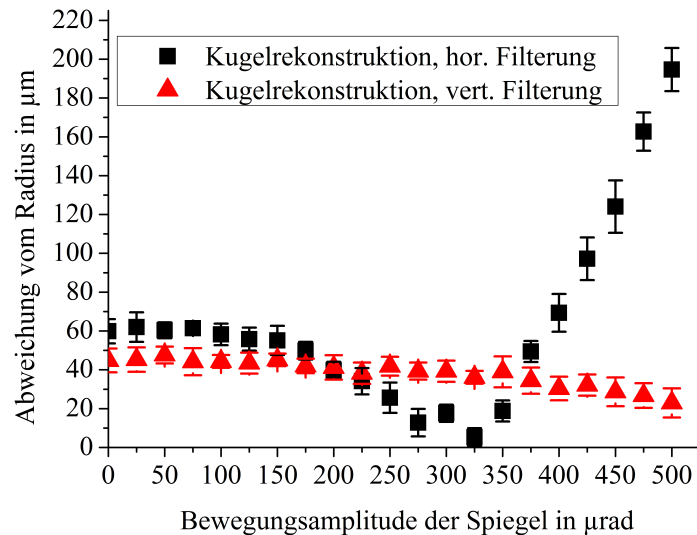


Abbildung 19: Abweichung der Radien der Ausgleichskugeln vom Ausgangsradius ($15.000 \mu\text{m}$) aufgetragen über die Amplitude der Spiegelbewegungen in μrad .

nahe an dem zertifizierten Radius, mit zunehmender Filtergröße wichen die Werte aber deutlicher voneinander ab. Die vertikal orientierte Filterung zeigte dahingehend kaum einen Einfluss auf den Radius der Ausgleichskugel.

3.2 Numerische Reduktionsverfahren

3.2.1 Filterarten und Simulation

Eine Möglichkeit unter Vermeidung von experimentellem Aufwand den Kontrast subjektiver Speckles zu reduzieren, besteht in der Verwendung numerischer Filter in der Nachbearbeitung der Aufnahmen. Derartige Filter werden schon seit Jahrzehnten in der Bildverarbeitung eingesetzt [90–93], jedoch nach Wissen des Autors nicht für Anwendungen

¹⁸Da Position und Form der vermessenen Objekte nur durch das Messsystem selbst bestimmt wurden und so keine Grundgenauigkeit ("ground truth") als Referenz herangezogen werden konnte, sind die hier gezeigten Werte relativ zueinander zu werten und daher nur ein Hinweis darauf, wie akkurat die Messung war. Da durch eine Normierung des Bezugssystems der Messung immer eine Ausgleichskugel mit dem idealen Radius gefunden werden kann, soll hier darauf hingewiesen werden, dass für alle in diesem Kapitel vorgestellten Messungen dieselbe Normierung verwendet wurde.

in der Stereophotogrammetrie. Eine Voraussetzung zur Implementierung eines derartigen Verfahrens bildete die Trennbarkeit der subjektiven Speckles, also des Rauschens, von objektiven Speckles, die zur 3D-Rekonstruktion verwendet wurden. In dem in Unterkapitel 3.1 verwendeten Aufbau konnte von subjektivem Speckle-Rauschen ausgegangen werden, das von Pixel zu Pixel unterschiedlich war, während die Beleuchtungsstrukturen etwa 10 Pixel groß waren. Eine räumliche Filterung ermöglichte eine selektive Reduktion räumlich kleiner Strukturen und versprach so ein hohes Erfolgspotential. Darüberhinaus konnten bereits vorhandene Aufnahmen nachträglich bearbeitet werden.

In Anlehnung an die Ergebnisse des Experiments mit beweglich angebrachten Spiegeln wurden eindimensionale Filter untersucht. Die Filterfunktionen wurden ausschließlich durch mit der Programmiersprache "MATLAB" selbst geschriebenen Programmen umgesetzt. Die Faltung der Verteilung im Bild $I_0(x, y)$ mit der Filterfunktion $F(x, y)$ ließ sich unter Zuhilfenahme des Faltungstheorems für die sich nach der Filterung ergebende Verteilung $I(x, y)$ zu

$$I(x, y) = I_0(x, y) * F(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{I_0(x, y)\} \cdot \mathcal{F}\{F(x, y)\}\} \quad (3.1)$$

bestimmen. Diese mathematische Operation setzt allerdings die *Linearität*¹⁹ und die Verschiebungsinvarianz voraus, die insbesondere an Stufen und Kanten nicht gegeben sein muss, sodass es dort zur Ausbildung von Artefaktstrukturen kommen kann. Diese ließen sich jedoch in den hier gezeigten Versuchen durch Mittelwertbildung der Rohdaten erkennen und entfernen. Numerisch wurde eine sogenannte schnelle Fouriertransformation *FFT* (engl.: *fast Fourier transform*) umgesetzt. Der mit *MATLAB* erstellte Quellcode beschrieb die Operation

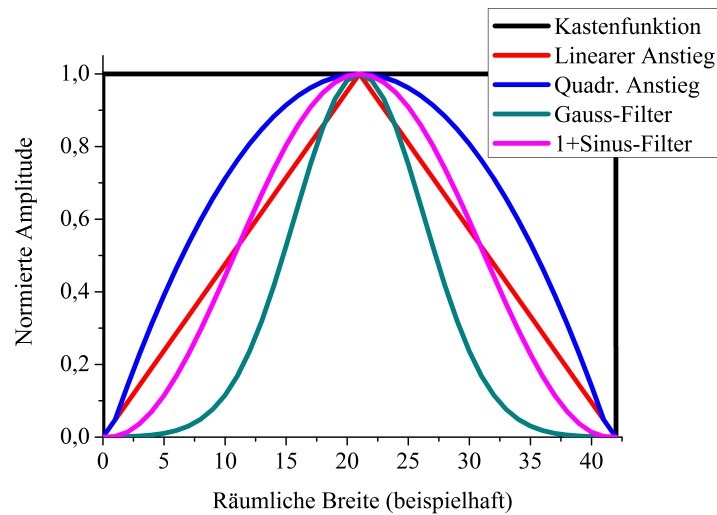
$$I(x, y) = FFT^{-1}\{FFT\{I_0(x, y)\} \cdot FFT\{F(x, y)\}\} . \quad (3.2)$$

Um grundsätzlich zu prüfen, ob derartige Funktionen den Kontrast von speckle-artigem, statistischen Rauschen reduzieren können, wurden Speckle-Verteilungen simuliert. Die einzelnen Bildelemente waren dabei statistisch unabhängig von den benachbarten Elementen, und die Standardabweichung des Rauschens war mit dem mittleren Grauwert vergleichbar, sodass ein Kontrast von 0,98 erreicht wurde. Diese Verteilungen wurden mit verschiedenen Filterfunktionen nach der in der Gleichung 3.2 gezeigten Methode gefaltet. Dabei handelte es sich um fünf verschiedene Funktionen, die jeweils nur in eine Raumrichtung ausgedehnt waren. Die andere Raumrichtung blieb ungefiltert. Auf diese Weise wurde eine Kastenfunktion, eine Dreiecksfunktion mit linearem Anstieg, eine Funktion

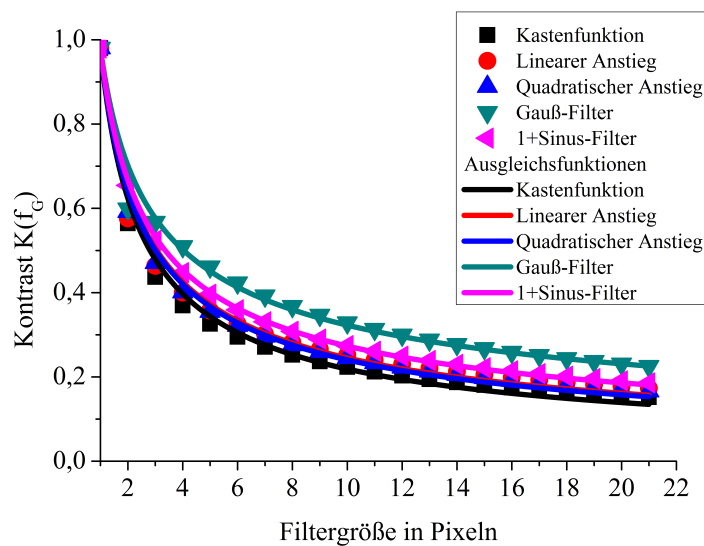
¹⁹Für die lineare Transformation L zweier Funktionen f und g mit den Vorfaktoren α und β gilt: $L(\alpha f + \beta g) = \alpha L(f) + \beta L(g)$.

mit quadratischem Anstieg, eine Gaussfunktion und eine 1+Sinus-Funktion erzeugt, wie sie in Abbildung 20 a) dargestellt sind. Die Berechnungszeit lag je nach Filtergröße pro Bild bis zu 50 ms. Allerdings ließe sich dieser zeitliche Mehraufwand durch Parallelisierung reduzieren.

Die sich ergebenden Kontraste $K(f_G)$ der mit diesen Filtern gefalteten Verteilungen sind



a)



b)

Abbildung 20: a) Filterfunktionen, b) Verlauf des Kontrasts K der gefilterten Verteilungen über die Filtergröße in Pixeln.

in Abbildung 20 b) über die Filtergröße f_G aufgetragen. Die Filtergröße wurde im Rahmen dieser Arbeit als die Anzahl an Bildelementen (Pixeln) verstanden, die durch eine Filterfunktion vom mittleren Pixel zum Rand des Darstellungsbereiches hin mit Werten

ungleich 0 gefüllt waren²⁰. Die Filtergröße war also stets auf die Größe im Ortsraum bezogen. Es konnte zudem iterativ über die Methode nach Levenberg-Marquardt [94] ein Satz best-passender Ausgleichsfunktionen gefunden werden. Dabei ließ sich der Kontrast $K(f_G)$ der sich ergebenden Verteilungen durch Gleichung 3.3 darstellen. Der Ausgangskontrast des ungefilterten Bildes K_0 , die Filtergröße f_G und eine zu diesem Zweck eingefügte, skalare Hilfsgröße δ bilden dazu die Näherungsformel

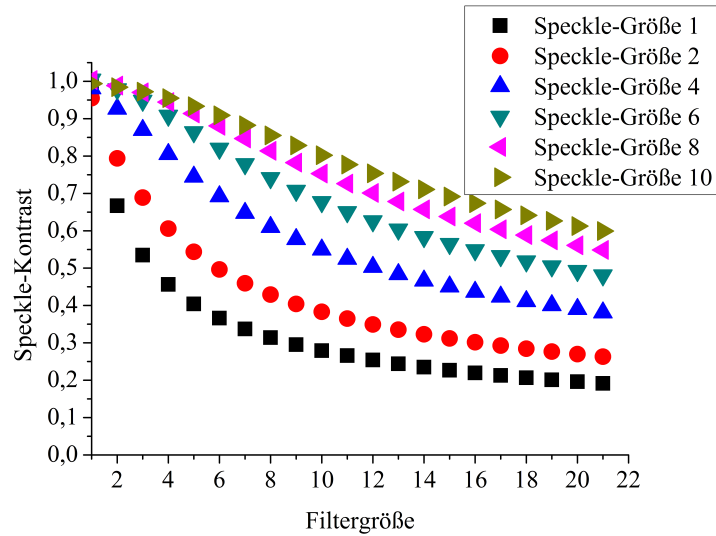
$$K(f_G) = K_0 \cdot f_G^\delta. \quad (3.3)$$

Dabei variierten die Werte für δ in Abhängigkeit der Filterfunktionen, wobei kein analytischer Zusammenhang zwischen der Form der Filter und den Werten für δ gefunden werden konnte. Für die Kastenfunktion ergab sich δ zu $-0,6515 \pm 0,0002$, für die Filterfunktion mit linearem Anstieg zu $-0,6022 \pm 0,0092$ und für die Filterfunktion mit quadratischem Anstieg zu $-0,61018 \pm 0,0007$. Für den Gaußfilter lieferte die Ausgleichsfunktion die beste Annäherung für $\delta = -0,4823 \pm 0,0076$, und für die 1+Sinus-Funktion konnte δ zu $-0,5548 \pm 0,0019$ bestimmt werden.

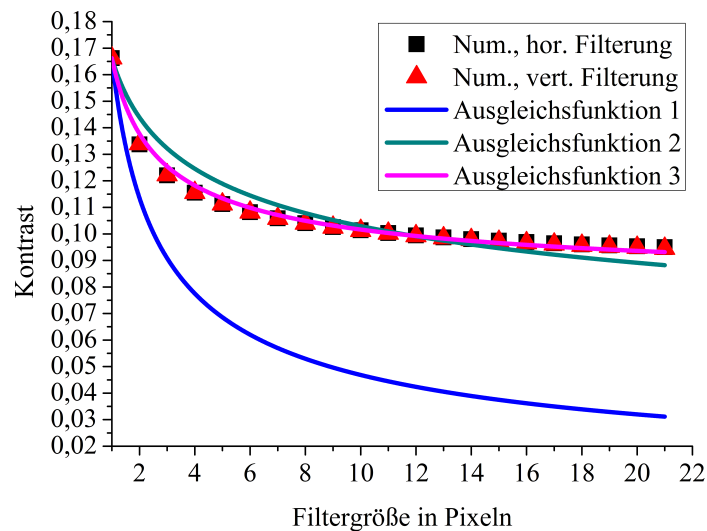
Für jede der gewählten Filterfunktionen konnte der Kontrast um bis zu 84% reduziert werden. Das Ziel der Reduktion subjektiver Speckles durch eine numerische Filterung war jedoch neben der Senkung des Kontrasts selbst, auch die Aufrechterhaltung von größeren Strukturen in den Aufnahmen, wie die der objektiven Speckles, die zur 3D-Messung nötig waren. Daher wurde eine weitere Simulation durchgeführt, in der Speckle-Verteilungen mit Durchschnittsgrößen zwischen 1 und 10 Pixeln generiert und mit verschiedenen Filtergrößen des eindimensionalen 1+Sinus-Filters bearbeitet wurden. Dieser Filter wird im Folgenden "Sinus-Filter" genannt und ausgewählt, da diese Filterung der Bewegung der Spiegel im Experiment am nächsten kam. Der Verlauf der sich ergebenden Kontraste der Verteilungen ist in Abbildung 21 dargestellt. Das bereits erwähnte, räumliche "Tiefpassverhalten" des Filters ist daraus abzulesen, da die räumlich ausgedehnteren Strukturen auch bei größeren Filtern einen hohen Kontrast behielten, während die kleinsten Speckles durch die Filterung am stärksten in ihrem Kontrast reduziert wurden.

Bei der Anwendung des Sinus-Filters auf das Summenbild der 300 Aufnahmen konnte der in Abbildung 21 b) gezeigte Kontrastverlauf über die verwendete Filtergröße beobachtet werden. Bei dem Versuch eine Ausgleichsfunktion mit einem Wert von $-0,55$ für δ zu verwenden, wurde Verlauf 1 erzeugt. Ausgleichsfunktion 2 wurde erstellt, indem analog zu Gleichung 3.3 ein best-passender Wert für δ bestimmt wurde. Dieser lag bei $-0,20805 \pm 0,00539$ (Abbildung 21). Beide Ausgleichsfunktionen geben den Kontrastver-

²⁰Die Gaußfunktion wurde zur Erstellung von Filterfunktionen für einen Wert kleiner 10% des Maximums gleich 0 gesetzt.



a)



b)

Abbildung 21: a) Kontrast von Speckle-Verteilungen mit verschiedenen Durchschnittsgrößen, von 1 bis 10 Pixeln, bei Filterung mit einem Sinus-Filter, b) Kontrast in dem Summenbild aus 300 Einzelaufnahmen unter Verwendung eines numerischen, horizontal orientierten und eines vertikal orientierten Sinus-Filters und Ausgleichsfunktionen.

lauf nur ungenau wieder. Es musste daher davon ausgegangen werden, dass der Intensitätsuntergrund, der sich aus dem übrigen Kontrast der gemittelten, objektiven Speckles und weiteren Strukturen zusammensetzt, für die Veränderung des Verlaufes verantwortlich war. Im Gegensatz zur Simulation konnte während einer experimentellen Messung nicht ausgeschlossen werden, weitere Intensitäten aufzunehmen. Streulicht von den Grenzflächen des verwendeten Linsensystems oder der Streuscheibe zum Beispiel könnten zu

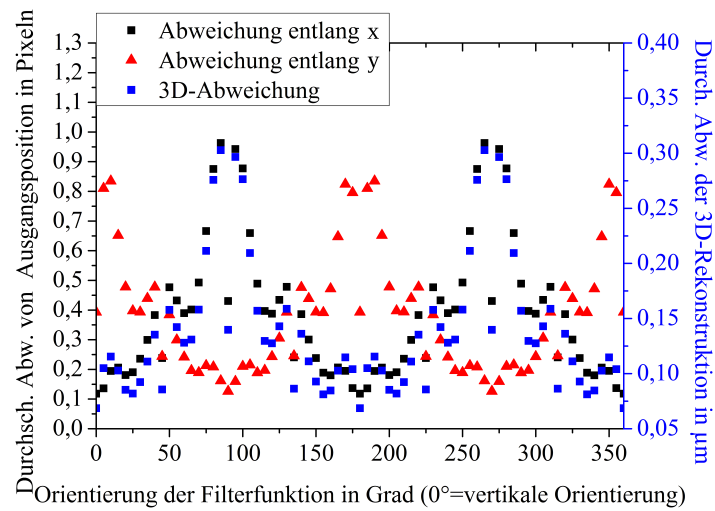
einem Intensitätsuntergrund geführt haben. Der Mittelungsprozess hätte auf diese Verteilung keinen Einfluss gehabt. Durch eine geeignete Funktion konnte die inkohärente Überlagerung dieser Intensitäten mit den relevanten Bildinformationen beschrieben werden, indem Gleichung 3.3 durch einen best-passenden Wert für einen Untergrund U erweitert wurde. Die Funktion

$$K(f) = (K_0 - U) \cdot f^\delta + U \quad (3.4)$$

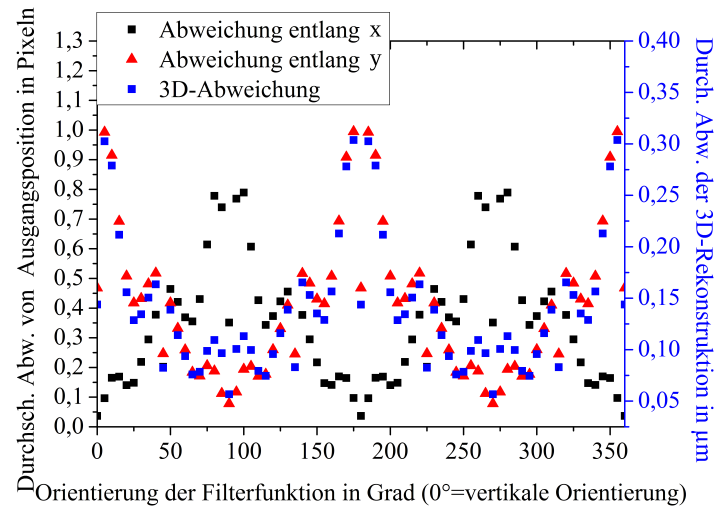
schloss diesen Wert mit ein und bildete so eine bessere Approximation. In diesem Fall ergab sich bei einem δ von $-0,55$ ein U von $0,0763 \pm 0,00055$. Insgesamt ließ sich beobachten, dass der Kontrast durch die Verwendung von numerischen Sinus-Filtern mit steigender Filtergröße gesenkt werden konnte. Bei der stärksten hier verwendeten Filterung konnte der Kontrast vom Ausgangswert von $0,166$ auf $0,095$, also um $42,8\%$ herabgesetzt werden. Im Vergleich zur Simulation musste, wie erläutert, im Experiment allerdings davon ausgegangen werden, dass ein Kontrastuntergrund vorhanden war, der einen direkten Zugriff auf einen Wert für den Kontrast der subjektiven Speckles erschwerte.

Die Ergebnisse des vorhergehenden Unterkapitels 3.1 legten nahe, dass die Filterung der Bilder eine Vorzugsrichtung in vertikaler Richtung besaß. Um zu evaluieren, ob diese Vorzugsrichtung mit der Geometrie des photogrammetrischen Aufbaus zusammenhing, wurden zwei Aufbauten mit *POV-Ray* simuliert. In einem dieser Aufbauten befanden sich die Kameras horizontal nebeneinander. Im zweiten wurden die Kameras übereinander angeordnet, sodass ihre Verbindungslinie nicht in der Horizontalen verlief, sondern in der Vertikalen. Die Parameter des Aufbaus orientierten sich dabei an dem experimentellen Aufbau, der in Kapitel 3.1 (eine detaillierte Auflistung wird in Tabelle 1 S. 107 wiedergegeben) verwendet wurde. Eine simulierte, perfekte Ebene wurde durch inkohärente, bandbegrenzte Muster beleuchtet und 30 Stereoaufnahmen erzeugt. Anschließend wurden diese Aufnahmen durch eindimensionale Sinus-Filter der Größe 21, also der hier verwendeten Maximalgröße gefiltert. Die Orientierung des Mittelungsprozesses beschränkte sich nun nicht mehr auf die vertikale und horizontale Richtung, sondern wurde in Schritten von 5° , beginnend bei 0° von der Vertikalen, bis 360° gewählt. Aus den so erzeugten Aufnahmen und den ungefilterten Ausgangsbildern wurden 3D-Rekonstruktionen erstellt. Die Rekonstruktion ohne Filterung wurde als Referenz verwendet und die Abweichung der korrespondierenden Punktpaare ausgewertet. Die x - und y -Koordinaten des nach der Filterung gefundenen Korrespondenzpartners wurden für jeden Pixel der Führungskamera mit der Position des ursprünglichen Korrespondenzpartners verglichen. Der Absolutbetrag der Abweichung in x - und y -Richtung wird in Abbildung 22 wiedergegeben. Ferner wurde die durchschnittliche Abweichung der Ebenenrekonstruktion von der Ausgleichsebene der Referenzpunktswolke bestimmt und über die Winkel der unterschiedlichen Filterorientie-

rungen aufgetragen. Die beiden Simulationen lieferten folgende Aussagen:



a)



b)

Abbildung 22: Abweichung der Korrespondenzpartner in Pixeln und 3D-Rekonstruktionsabweichung in Abhängigkeit der Orientierung der Filterfunktion.
a) Kameras nebeneinander, b) Kameras übereinander positioniert.

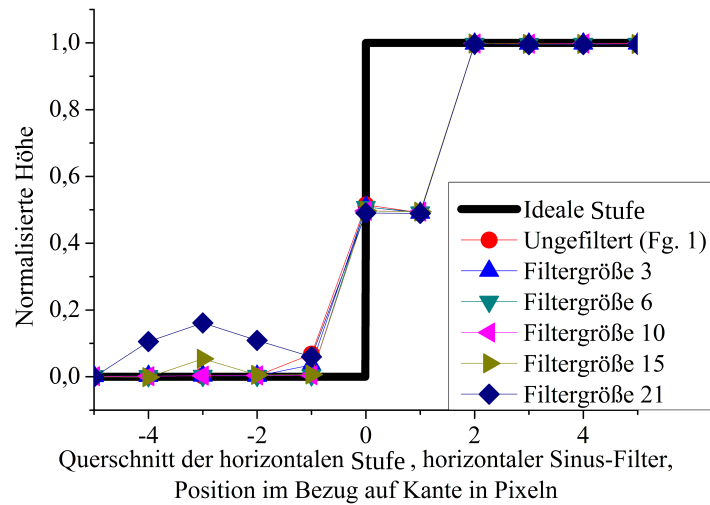
- Die Filterung war 180°-periodisch.
- Je weiter die Filterung in vertikaler bzw. horizontaler Richtung orientiert war, umso stärker war die Abweichung in x - bzw. y -Richtung.
- Die durchschnittlichen Abweichungen der zugeordneten Korrespondenzpartner in x - und y -Richtung waren vergleichbar und hatten einen ähnlichen Verlauf.

Die durchschnittlichen 3D-Abweichungen waren in beiden Simulationen von den Abweichungen der Korrespondenzpartner abhängig. Ob sie von der Abweichung in horizontaler oder vertikaler Richtung bestimmt wurden, hing dabei von der Geometrie des Aufbaus ab. Der 3D-Fehler bei der horizontalen Positionierung der Kameras war vom Fehler in vertikaler Richtung abhängig, wurde also maximal, wenn die Filterung ebenfalls vertikal orientiert war. In dem Fall, in dem die Kameras vertikal zueinander positioniert wurden, war die 3D-Abweichung abhängig von der Differenz der Korrespondenzpartner in horizontaler Richtung. Damit kann belegt werden, dass die Positionierung der Kameras zueinander die Vorzugsrichtung der Filterung, also die Orientierung die mit dem kleinsten Fehler verbunden war, vorgab. Eine Erklärung für diese Besonderheit ist, dass die Epipolargeometrie, die sich aus dem Prinzip der Triangulation ergab, sich in diesem Punkt bemerkbar machte:

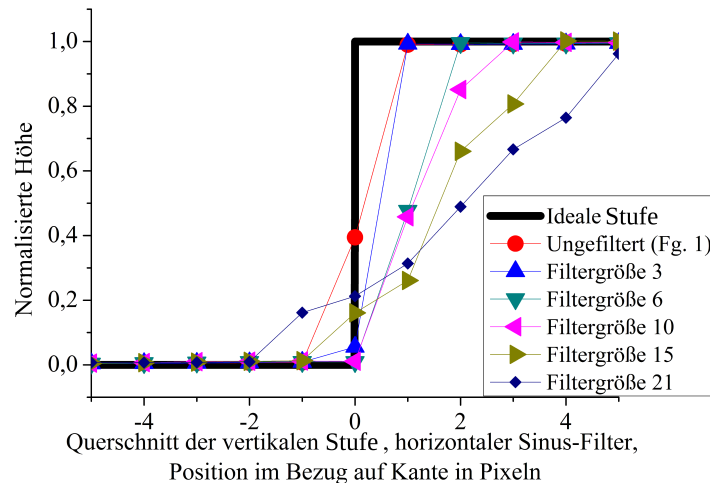
Da durch die Kalibrierung im Vorhinein die Positionen der Abbildungszentren der Kameras bekannt waren, waren auch sämtliche Epipolarebenen und -linien bekannt, entlang derer bzw. in deren unmittelbarer Nähe die Korrespondenzsuche den höchsten Erfolg hatte. Wurde entlang dieser Linien gefiltert, also die für die Korrespondenzsuche entscheidenden Werte unter den Nachbarn entlang der Linie gemittelt, sodass diese weniger gut unterscheidbar werden, so stieg die Wahrscheinlichkeit, nicht den eigentlichen Korrespondenzpartner zu finden. Im Gegensatz dazu wurden durch eine Filterung senkrecht zu den Epipolarebenen die Grauwerte benachbarter Pixel entlang dieser Epipolarlinien kaum oder gar nicht ähnlicher und ließen sich so leichter unterscheiden [83]. Das Vorwissen über die Lage der Epipolarebenen, die feststanden, bevor die Korrespondenzsuche überhaupt gestartet wurde, war somit ein Vorteil für die angepassten Filterungen.

Eine weitere Messung wurde simuliert, bei der vor die zuvor allein untersuchte Ebene noch eine kleinere Fläche, ebenfalls mit perfekter Ebenheit, gesetzt wurde. Die zweite Fläche war parallel zur ersten orientiert und besaß einen Abstand von 5 *cm* zu dieser. Nun wurde ein Satz von Messungen durchgeführt, bei dem die Szenerie mit 30 verschiedenen Mustern objektiver Speckles, ohne das Zustandekommen subjektiver Speckles, beleuchtet wurde. Anschließend wurden die Bilder horizontal und vertikal mit verschiedenen Filtergrößen gefiltert und die untere Kante und die linke Kante der kleineren Fläche zur Bewertung herangezogen. Um zu überprüfen, wie sich eine ideale Stufe durch die lineare Filterung verändert, wurden die z -Koordinaten aus den Rekonstruktionen bewertet, indem ein Querschnitt über 5 Pixel vor und hinter den Stufen ausgewählt wurde. Dabei wurde die Höhe normiert und jeweils über 20 benachbarte Linien bzw. Querschnitte gemittelt, um zufällige Fehler zu vermindern und einen generellen Trend möglicher Fehlrekonstruktionen durch die Filterung zu zeigen. Die sich ergebende Verteilung unter Einsatz der horizontalen, eindimensionalen Sinus-Filterung und der Verlauf der idealen Stufen sind in Abbildung

23 dargestellt.



a)

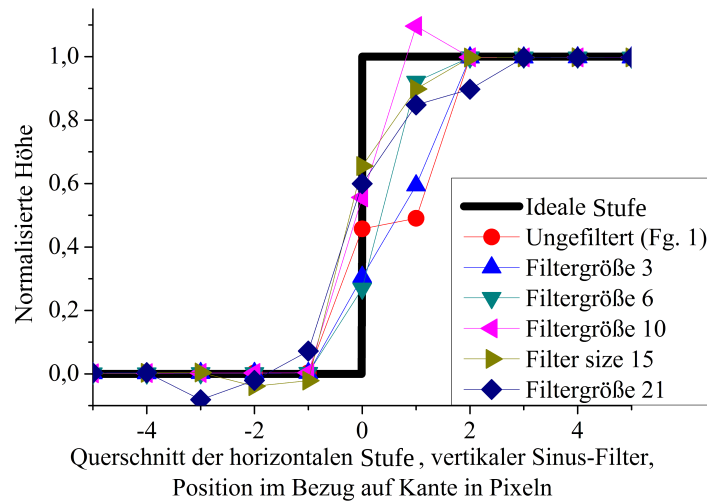


b)

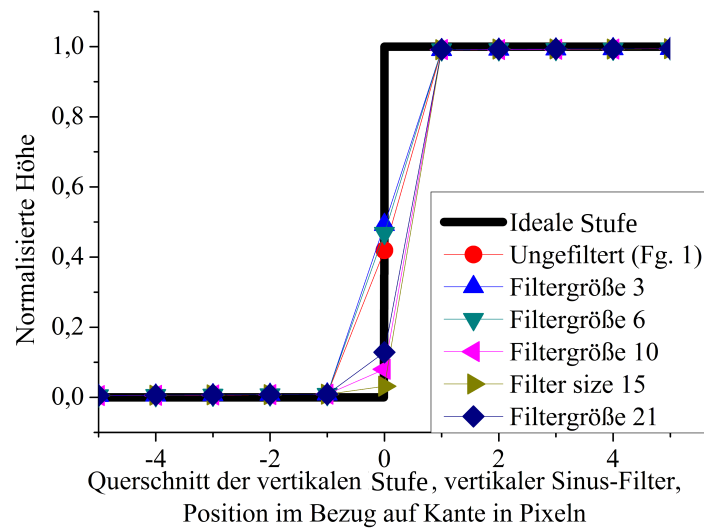
Abbildung 23: a) Verlauf der gemittelten Querschnitte der horizontal orientierten Stufe unter horizontaler, eindimensionaler Sinus-Filterung über den Bildbereich in Pixeln, b) Verlauf der gemittelten Querschnitte der vertikal orientierten Stufe unter horizontaler, eindimensionaler Sinus-Filterung über den Bildbereich in Pixeln.

Die Rekonstruktion der horizontal orientierten Stufe, die nicht von der horizontalen Filterung beeinflusst worden sein sollte, zeigte tatsächlich kaum eine Änderung durch die Filterung. Diese Beobachtung entsprach somit der Erwartung, die an einen derartigen Filter gestellt werden konnte. Die vertikal orientierte Stufe dagegen wurde nur für kleine Filtergrößen noch als Kante bzw. Stufe wiedergegeben. Mit zunehmender Filtergröße verbreiterte sich der Bereich, in dem ein Anstieg zu sehen war, von ursprünglich 3 Pixeln auf bis zu 8 Pixel.

Die 30 Ausgangsbilder wurden auch mit dem vertikalen Filter bei Filtergrößen zwischen 1 und 21 Pixeln gefiltert. Die sich für je 20 gemittelte, benachbarte Querschnitte ergebenden Verteilungen für die horizontal und vertikal verlaufenden Stufen werden in Abbildung 24 wiedergegeben. Auch die horizontal verlaufende Stufe wurde durch die vertikale Filte-



a)



b)

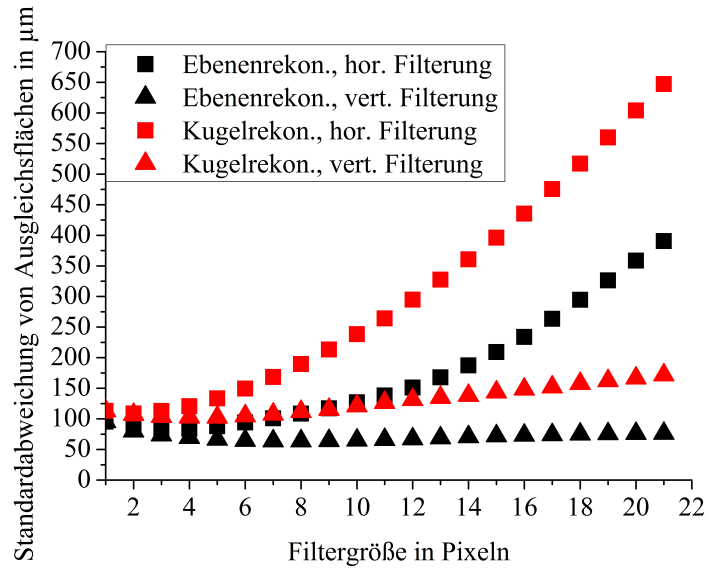
Abbildung 24: a) Verlauf der gemittelten Querschnitte der horizontal orientierten Stufe unter vertikaler, eindimensionaler Sinus-Filterung, b) Verlauf der gemittelten Querschnitte der vertikal orientierten Stufe unter vertikaler, eindimensionaler Sinus-Filterung.

rung, in Analogie zur vertikalen Stufe durch horizontale Filterung, durch die numerische Nachbearbeitung beeinflusst. Allerdings verbreiterte sich der Anstieg nicht wesentlich in Abhängigkeit von der Filtergröße. Eine Begründung für dieses Verhalten kann in den bisher vorgestellten Ergebnissen gefunden werden: Die Geometrie des Aufbaus ermöglichte

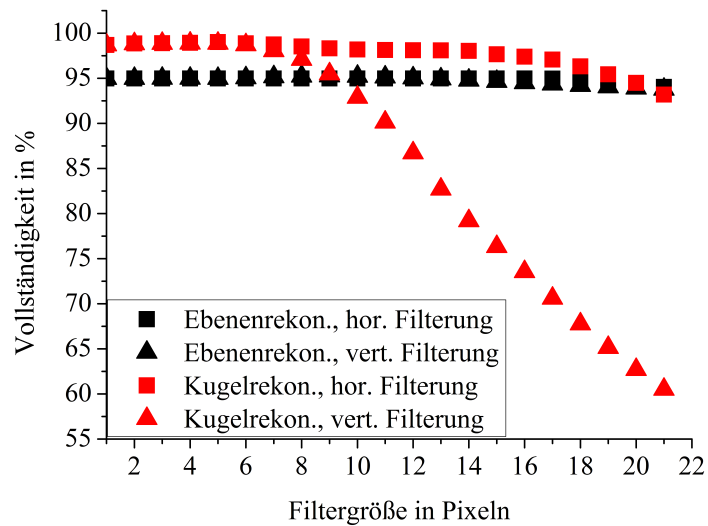
es, dass der Rekonstruktionsvorgang gegenüber Filterungen senkrecht zu den Epipolarlinien unempfindlicher war. An der Lage der Epipolarebene änderte sich durch die Filterung nichts, die Korrespondenzsuche in der Ebene wurde aber weniger negativ beeinflusst. Die vertikale Stufe wurde so durch den vertikal orientierten Filter kaum wahrnehmbar verändert. Diese Simulationen zeigten, dass die Filterung senkrecht zu den Epipolarebenen generell weniger nachteilig für die Korrespondenzsuche gegenüber der Filterung in diesen Ebenen war. Die optimale Orientierung der Mittelung verlief somit senkrecht zu der Ebene, die die beiden Kameraprojektionszentren und der untersuchte Objektpunkt aufspannten.

3.2.2 Anwendung im Experiment

Um zu belegen, dass die numerische Filterung sich auch positiv auf die Rekonstruktion von Aufnahmen aus experimentellen Messungen auswirken konnte, sind die Aufnahmen aus dem Experiment mit den kippbaren Spiegeln verwendet worden. Von den jeweils 10 Messserien wurde stets die Serie aus den Messungen ohne Spiegelbewegung ausgewählt, die am dichtesten am Mittelwert lag. Diese wurde anschließend mit linearen Sinus-Filtern in vertikaler und in horizontaler Richtung bei Filtergrößen zwischen 1 und 21 Pixeln bearbeitet. An die rekonstruierten Punktwolken der Ebene und der Kugel wurden jeweils Ausgleichsflächen angepasst und die Vollständigkeit der Rekonstruktionen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 dargestellt. Die Optima der Standardabweichung lagen für alle Filterorientierungen und Objekte nicht bei Filtergröße 1, während die Vollständigkeit nur bei den Kugelrekonstruktionen bei größeren Filtern absank. Die Filterung der Aufnahmen konnten also grundsätzlich zu einer Verbesserung der 3D-Rekonstruktionsqualität beitragen, wobei die einzelnen Optima bei verschiedenen Filtergrößen lagen und unterschiedlich ausgeprägt waren. Die Standardabweichung der Ebenenrekonstruktion konnte durch die horizontale Filterung von $95,2 \mu\text{m}$ auf $81,4 \mu\text{m}$ also um 14,4% bei einer Filtergröße von 3 verbessert werden, während die Vollständigkeit bei etwa 95% lag. Die vertikale Filterung ermöglichte dagegen eine Verkleinerung der Standardabweichung auf $63,9 \mu\text{m}$ (um knapp 33%) bei einer Filtergröße von 8, während die Vollständigkeit bei 95% gehalten werden konnte. Die Standardabweichung der Kugelrekonstruktion konnte durch die horizontale Filterung mit der Größe 2 von $113,1 \mu\text{m}$ auf $108,7 \mu\text{m}$ also um 3,9%, gesenkt werden. Die numerische Mittelung in vertikaler Richtung führte zu einer Senkung um $10,4 \mu\text{m}$, also um 9,3%, bei der Filtergröße 5. Die Vollständigkeit der Rekonstruktionen der Kugeloberfläche lag bei allen Filtern um oder über 95%, außer bei den vertikalen Sinus-Filtern größer 9. Hier führte die Rekonstruktion zu erheblichen Verlusten in der Vollständigkeit.



a)



b)

Abbildung 25: a) Verlauf der Standardabweichung der Rekonstruktionen der Ebene und der Kugel im Bezug zu Ausgleichsflächen in μm als Funktion der Größe der numerischen Filter, b) Verlauf der Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken der Ebene (Maximum 108.000 Punkte) und der Kugel (Maximum 14.100 Punkte) als Funktion der Filtergröße.

In Abbildung 26 werden die Radien der Ausgleichskugeln mit dem zertifizierten Radius²¹ verglichen.

Bei vertikaler Filterung wich der Radius der bestimmten Ausgleichskugeln für Filtergrößen kleiner 15 nur um höchstens $50 \mu\text{m}$ von dem Referenzradius ab und auch für größere

²¹Wie oben bereits erwähnt, lagen keine "ground truth"-Daten vor, sodass die Werte nicht absolut, sondern relativ zueinander betrachtet werden müssen.

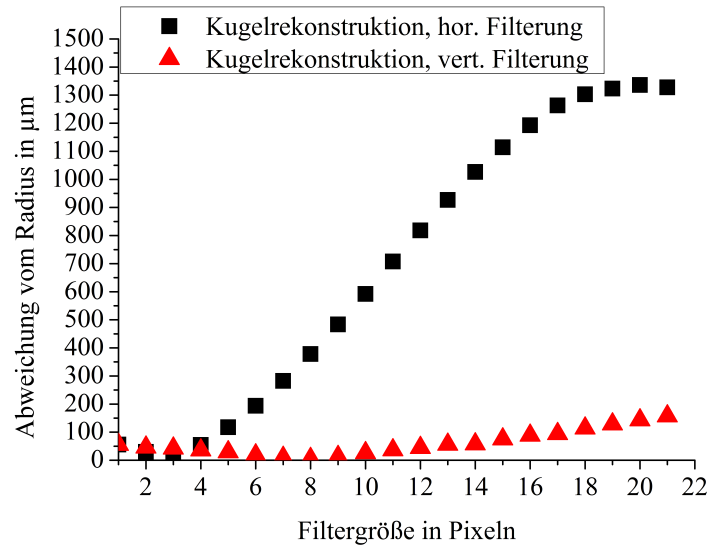


Abbildung 26: Abweichung der Radien der Ausgleichskugeln vom Referenzradius ($15.000 \mu\text{m}$) aufgetragen über die Filtergröße.

Filter blieb dieser Wert noch unter $200 \mu\text{m}$. Die horizontale Filterung führte dagegen zu einer zunehmend stärkeren Abweichung der Radien der gefundenen Ausgleichskugeln im Bezug auf den Referenzwert von $15.000 \mu\text{m}$. Schon bei einer Filtergröße von 5 kam es zur Abweichung um mehr als $100 \mu\text{m}$ und ab der Filtergröße 6 zu Abweichungen über $200 \mu\text{m}$. Mit zunehmender Filtergröße (ab Größe 13) wuchs diese Abweichung auf über 1 mm . Die numerische Mittelung in horizontaler Richtung führte also zu Fehlrekonstruktionen, wenn zu große Filter verwendet wurden, während eine vertikale Mittelung zwar zum Verlust an Vollständigkeit führen konnte, jedoch im Vergleich zu einem Referenzradius auch für verschiedene Filterausdehnungen nur kleine Abweichungen lieferte.

Um den Einfluss der Filterung auf die Rekonstruktionen sichtbar zu machen, wurde das Messvolumen mit 300 verschiedenen, inkohärenten, bandbegrenzten Mustern beleuchtet und Aufnahmen angefertigt. Aus diesen 300 inkohärenten Stereoaufnahmen ohne subjektive Speckles, wurde eine Punktwolke rekonstruiert, die für die Abbildungen 27 und 28 als Referenz diente²². In Abbildung 27 sind die Differenzen der z -Koordinaten der unter der horizontalen Filterung entstandenen Rekonstruktionen von der Referenzrekonstruktion aus inkohärenten Bildern dargestellt. Es wurden zur Filterung der 30 Aufnahmen unter kohärenter Beleuchtung die Filtergrößen 2, 5 und 21 verwendet, da dort das Optimum der horizontalen bzw. vertikalen Filterung bei der Kugelrekonstruktion lag bzw. es sich

²²Für den Fall, dass ein Punkt als nicht vertrauenswürdig rekonstruiert eingestuft wurde, wurde der Wert 0 als Grauwert für die Abbildung eingesetzt. Diese Konvention wurde auch in allen folgenden Darstellungen angewandt.

um den größten hier untersuchten Filter handelte.

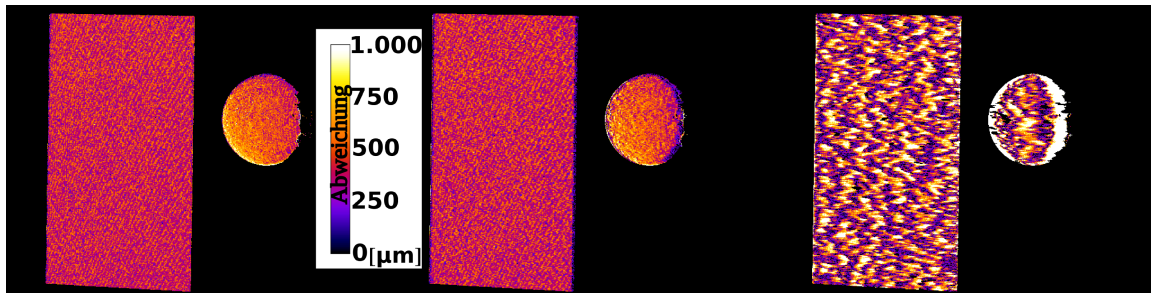


Abbildung 27: Abweichung der Rekonstruktionen der Ebene und der Kugel von einer Referenzrekonstruktion (300 inkohärente bandbegrenzte Muster) in μm , für horizontale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

Die Abweichungen fielen bei kleinen Filtergrößen relativ gering aus, allerdings waren schon bei Filtergröße 5 zunehmende Fehlrekonstruktionen an der linken und rechten Seite der Kugel auszumachen. Die maximale Filtergröße verursachte in diesen Bereichen erhebliche Abweichungen. Doch auch die Rekonstruktion des zentralen Bereichs der Kugel und der Ebene wich bei maximaler Filtergröße stark von der Referenzrekonstruktion ab. Wie in den Abbildungen 18 b) (S. 32) und 25 b) (S. 44) zu sehen ist, wurde die Vollständigkeit der Rekonstruktionen durch die horizontale Filterung kaum beeinflusst.

Zum Vergleich sind die Abweichungen der z -Koordinate der Rekonstruktionen der mit Speckles erzeugten Aufnahmen unter vertikaler Filterung von der Referenzrekonstruktion unter inkohärenter Beleuchtung in Abbildung 28 dargestellt. Dabei wurden wiederum die Filtergrößen 2, 5 und 21 abgebildet. Die Filterung in vertikaler Richtung liefert im Ver-

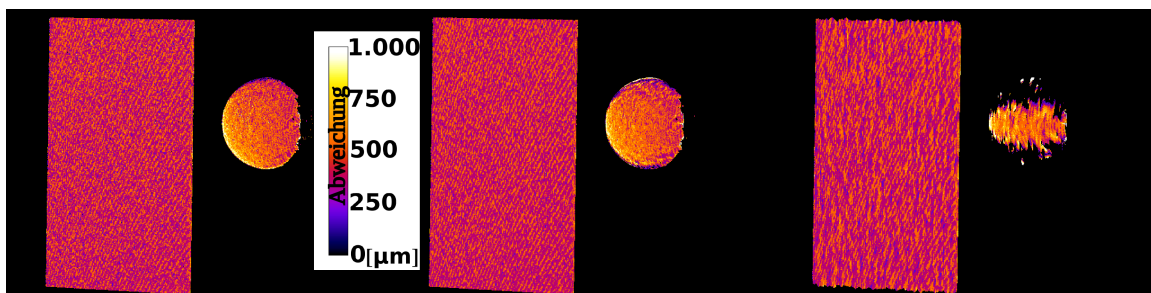


Abbildung 28: Abweichung der Rekonstruktionen der Ebene und der Kugel von einer Referenzrekonstruktion (300 inkohärente bandbegrenzte Muster) in μm , für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

gleich zur horizontalen Filterung für die Ebenenrekonstruktion nur kleine Abweichungen von der Referenzpunktwolke. So sind selbst bei der größten Filterausdehnung nur wenige Abweichungen von der Ebene über 1 mm zu beobachten. Die Kugelrekonstruktion lieferte bei Filtergröße 5 ein ähnliches Bild wie ihr horizontal gefiltertes Pendant, allerdings waren

nun die obere und untere Seite der Kugel leicht verzerrt dargestellt. Bei der maximalen Filtergröße wurden die sich vergrößernden, fehlerhaft rekonstruierten Bereiche allerdings nicht rekonstruiert, sondern die Kugel mit verringerter Vollständigkeit dargestellt. Die Rekonstruktion von stark verzerrten Bereichen wurde so vermieden.

Die 3D-Punktwolken der Ebene und der Kugel ließen sich auch bezüglich ihrer Korrelationskoeffizienten auswerten. In Abbildung 29 und 30 sind die Korrelationskoeffizienten dargestellt, die für die einzelnen Punkte aus Sicht der Führungskamera gefunden wurden und über dem Schwellwert 0,9 lagen. Der Schwellwert des Korrelationskoeffizienten hat

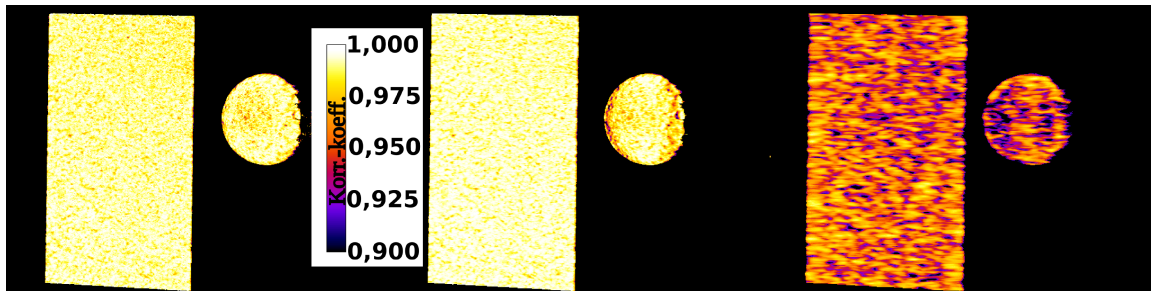


Abbildung 29: Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera, für horizontale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

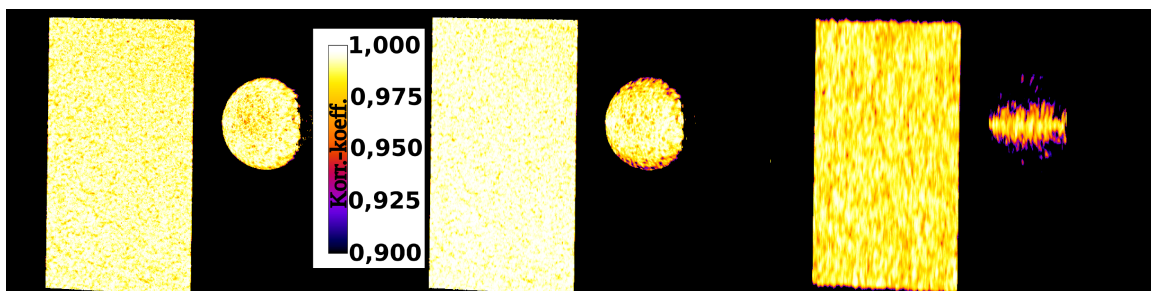


Abbildung 30: Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera, für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

sich bei vertikaler Filterung, also senkrecht zu den Epipolarebenen, als gutes Maß zur Bewertung der Vertrauenswürdigkeit der Punktreakonstruktion erwiesen. Die horizontale Filterung senkte zwar den Korrelationskoeffizienten, jedoch in diesem Fall nicht stark genug, um die Mehrzahl der fehlerhaft rekonstruierten Punkte als Ausreißer zu identifizieren.

Mit demselben Aufbau wurden zwei Freiformobjekte vermessen. Diese, zwei geläppte Bauelemente und eine Büste des Dichters Friedrich Schiller, sind in Abbildung 31 zu sehen. Die zur Auswertung herangezogenen Bereiche sind farblich umrandet dargestellt. Für die

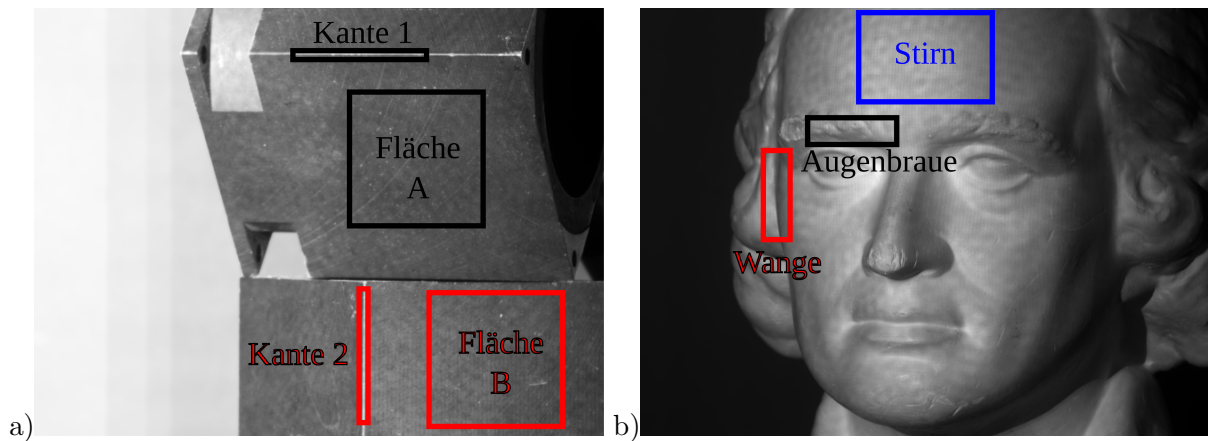


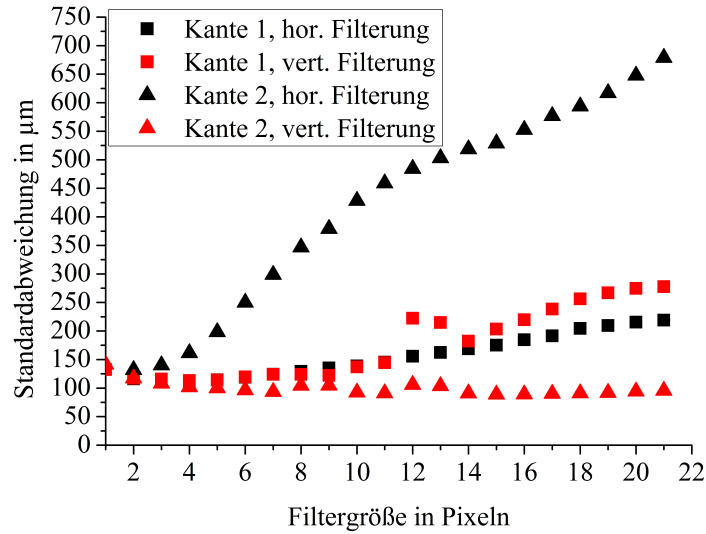
Abbildung 31: a) Bild zweier geläppter Bauelemente, b) Büste des Dichters Friedrich Schillers. Die untersuchten Bereiche sind farblich markiert dargestellt.

Messungen wurden wiederum 30 Aufnahmen unter Speckle-Beleuchtung angefertigt und die Bilder numerisch mit horizontal bzw. vertikal orientierten, eindimensionalen Sinus-Filtern mit Größen zwischen 1 und 21 bearbeitet. Als Referenz für die Freiformflächen wurden in derselben Konstellation 300 Aufnahmen unter inkohärenter Beleuchtung mit bandbegrenzten Mustern gemacht. Aus diesen Aufnahmen wurden dann Referenzpunkt- wolken rekonstruiert.

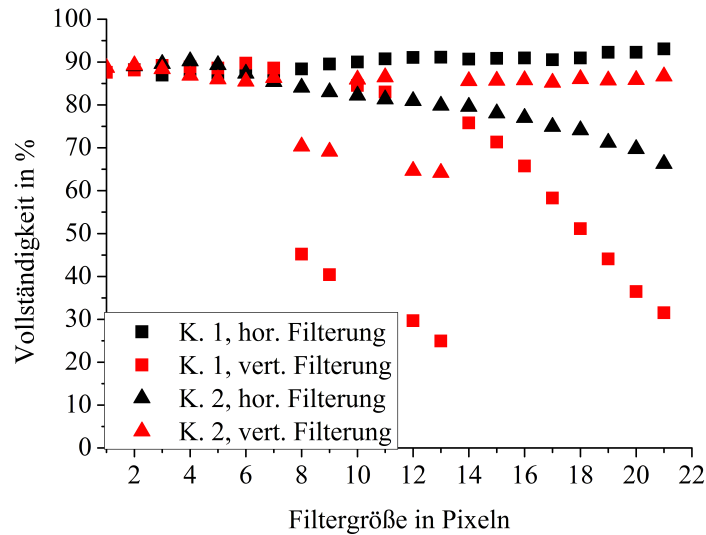
Die Kanten 1 und 2 waren horizontal bzw. vertikal orientiert. Aus den Rekonstruktionen ließ sich entnehmen, dass Kante 1 um etwa $107,4^\circ$ zur Blick- bzw. z -Richtung in der x - z -Ebene geneigt war, während Kante 2 beinahe senkrecht ($90,2^\circ$ zur Blickrichtung) stand. Die Flächen, die die Kanten bildeten, waren zueinander um 90° geneigt. Fläche A war um einen Winkel von $47,3^\circ$ zur z -Richtung in der y - z -Ebene geneigt. Fläche B besaß einen Neigungswinkel von etwa $32,1^\circ$ zur Blickrichtung in der x - z -Ebene. Die Achse, um die Fläche A geneigt war, lief annähernd parallel zur Horizontalen in den Kameraansichten. Fläche B war dagegen um eine Achse geneigt, die annähernd senkrecht dazu verlief.

In Abbildung 32 sind die Standardabweichung der durch Speckle-Beleuchtung erzeugten Punktwolken von der Referenzpunkt- wolke im Bereich von Kante 1 und 2, sowie deren Vollständigkeit dargestellt.

Die Werte für die Standardabweichung aus dem Bereich von Kante 1 besaßen un- abhängig von der Filterorientierung Minima bei den Filtergrößen 4 bzw 13. Für den Bereich der Kante 2 zeigten die in verschiedenen Richtungen gefilterten Aufnahmen dage- gen eine deutliche Trennung: Während die horizontale Filterung mit zunehmender Größe eine steigende Standardabweichung lieferte, sank dieser Wert bei vertikaler Filterung mit größer werdender Filterausdehnung. Die Vollständigkeit für beide Bereiche und beide Filterungen stieg mit wachsender Größe, hier bildeten nur die im Bereich von Kante 2



a)



b)

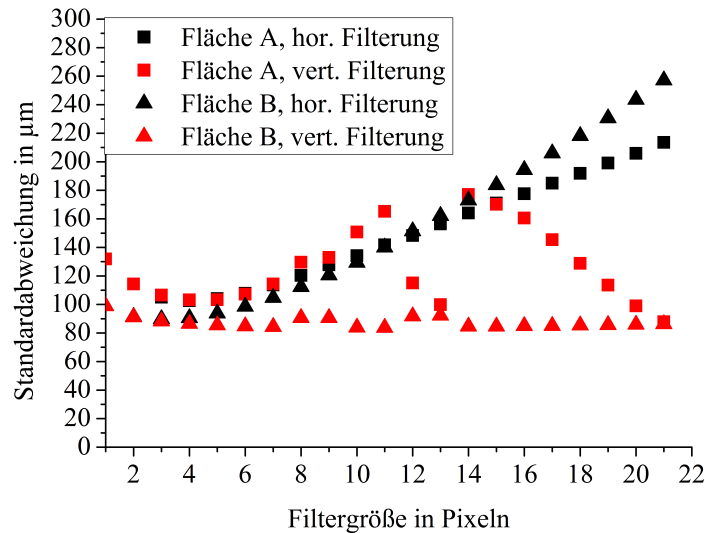
Abbildung 32: Punktrekonstruktionsabweichung der Kanten 1 und 2 beim Vergleich der mit Speckle-Beleuchtung und Filterung erzeugten Rekonstruktionen zu der durch inkohärente Beleuchtung erzeugten Referenzrekonstruktion als Funktionen der Filtergröße.

a) Standardabweichung der Punktwolken im Bereich von Kante 1 bzw. 2 in μm ,

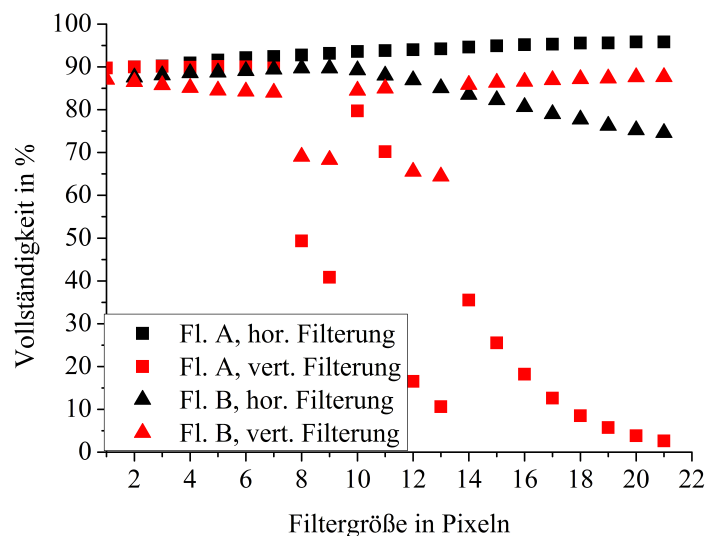
b) Vollständigkeit der rekonstruierten Bereiche in %.

unter vertikaler Sinus-Filterung rekonstruierten Punktwolken eine Ausnahme, die zunehmend unvollständiger rekonstruiert wurden. "Sprünge" bei den Werten der Vollständigkeit können dadurch erklärt werden, dass durch die Filterung und die statistische Natur der Beleuchtung und des Rauschens einige Punkte, deren Korrelationskoeffizient dicht am Schwellwert von 0,9 lag, filterabhängig über oder unter dieser Schwelle verlegt wurden und

so für einen scheinbar sprunghaften Anstieg bzw. eine rapide Abnahme der Vollständigkeit sorgten, die sich in einigen Fällen auch auf die Standardabweichung übertrug (siehe Abbildung 33). Die Ergebnisse der Rekonstruktionen der Flächen A und B lieferten in



a)



b)

Abbildung 33: Punktrekonstruktionsabweichung der Flächen A und B beim Vergleich der mit Speckle-Beleuchtung und Filterung erzeugten Rekonstruktionen zu der durch inkohärente Beleuchtung erzeugten Referenzrekonstruktion. a) Standardabweichung der Punktwolken im Bereich von Fläche A bzw. B in μm , b) Vollständigkeit der rekonstruierten Bereiche in %.

gewisser Weise das umgekehrte Bild, das in den Bereichen von Kante 1 und Kante 2 beobachtet wurde: nach einem Minimum bei der Filtergröße 4 stieg die Standardabweichung für die horizontale Filterung in beiden Abschnitten und für die vertikale Filterung im Be-

reich von Fläche A . Die Standardabweichung für die unter vertikaler Filterung im Bereich von Fläche B rekonstruierten Punktwolken sank dagegen mit zunehmender Filterung. Die Vollständigkeit der Rekonstruktionen stieg für beide Bereiche unter horizontaler Filterung und für den Bereich von Fläche A unter vertikaler Filterung mit steigender Filterausdehnung. Lediglich im Bereich der Fläche B sank die Vollständigkeit mit größer werdenden Filterstärke.

Die aus den Aufnahmen unter Speckle-Beleuchtung erzeugten Rekonstruktionen ließen sich mit der Referenzpunktwolke auch bildlich vergleichen. In den folgenden Abbildungen sind die Abweichungen der entsprechenden z -Koordinate dargestellt. In Abbildung 34 ist

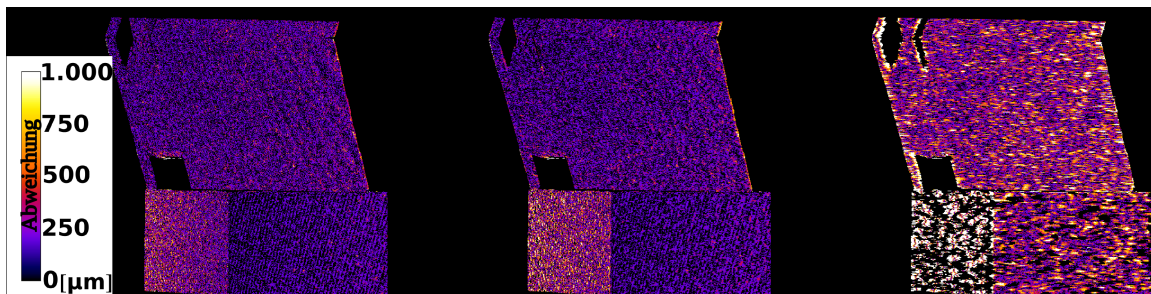


Abbildung 34: Abweichung der Rekonstruktionen der geläpften Bauelemente von einer Referenzrekonstruktion (300 inkohärente bandbegrenzte Muster) in μm für horizontale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

die Abweichung in der z -Koordinate unter horizontaler Filterung dargestellt. Schon bei Filtergröße 5 (mittig) war zu erkennen, dass die linke Seite des unteren Blocks mit einer größeren Abweichung rekonstruiert wurde als noch im schwach gefilterten Bild (links). Bei der größtmöglichen Filterung (rechts) wurde der gesamte Objektbereich unvollständiger und fehlerhafter rekonstruiert, insbesondere im Bereich des unteren Blocks.

Die entsprechenden Ergebnisse für die vertikale, eindimensionale Sinus-Filterung sind in Abbildung 35 dargestellt. Hier sind größere Abweichungen oder unvollständig rekonstru-

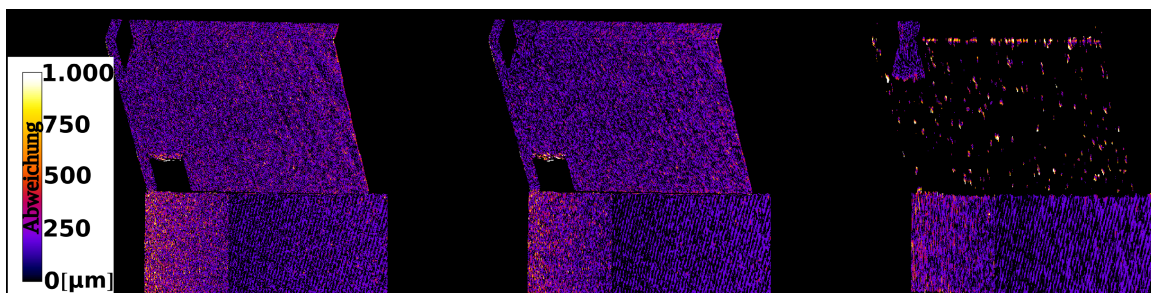


Abbildung 35: Abweichung der Rekonstruktionen der geläpften Bauelemente von einer Referenzrekonstruktion (300 inkohärente bandbegrenzte Muster) in μm für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

ierte Bereiche weder in der linken (Filtergröße 2) noch der mittigen Darstellung (Filtergröße 5) auszumachen. Bei der maximalen Filtergröße 21 (rechts) wurde der obere Block beinahe gar nicht mehr rekonstruiert, während die 3D-Rekonstruktion des unteren Bauelements noch mit geringeren Abweichungen gelang.

Aus den horizontal gefilterten Aufnahmen dieser Messung wurden Rekonstruktionen erzeugt, die deutlich vollständiger aber auch fehlerhafter waren als die Rekonstruktionen aus vertikal gefilterten Bildern. Insbesondere sind die Flächen, die um die Horizontale geneigt waren deutlich stärker von der horizontalen Filterung beeinflusst. Gleichzeitig wurden die um die Vertikale geneigten Flächen deutlich schlechter rekonstruiert, wenn vertikal gefiltert wurde. Der Einfluss der Filterung auf den Korrelationskoeffizienten soll in den Abbildungen 36 und 37 verdeutlicht werden, in denen er räumlich aus Sicht der Führungskamera für verschiedene Filtergrößen dargestellt ist.

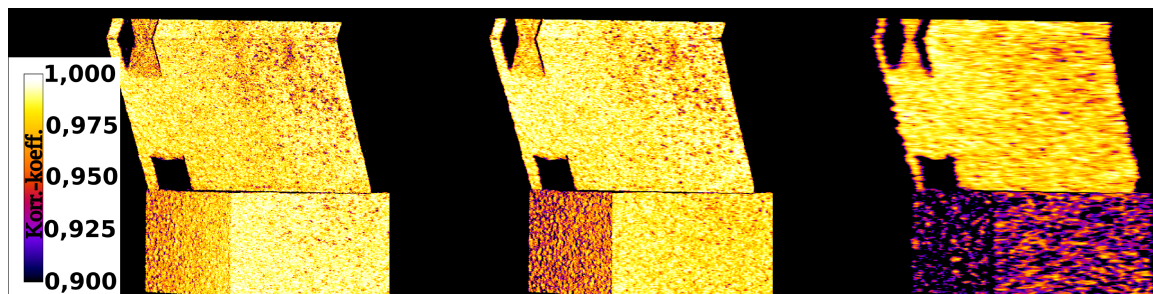


Abbildung 36: Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera, für horizontale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

Abbildung 36 zeigt die räumliche Verteilung des Korrelationskoeffizienten der Rekonstruktionen, die unter horizontaler, eindimensionaler Filterung erzeugt wurden, aus Sicht der Führungskamera. Es wurden nur Werte über 0,9 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass der Korrelationskoeffizient in der linken und der mittigen Darstellung flächig über 0,9 lag. Eine Ausnahme bildete hier wiederum die linke Fläche des unteren Bauelements. Unter maximaler Filterung sank zwar der Korrelationskoeffizient, jedoch nicht weit genug, um stark abweichende Punkte herausfiltern zu können. In Abbildung 37 sind die Ergebnisse für die vertikale Filterung dargestellt. Der Korrelationskoeffizient lag sowohl für die Filtergröße 2 als auch 5 im ganzen Objektbereich über dem Schwellwert von 0,9. Bei Filterung der Größe 21 wurde jedoch beinahe das gesamte obere Bauelement nicht mehr rekonstruiert, während das untere beinahe vollständig wiedergegeben wurde. Es konnte somit beobachtet werden, dass der zeitliche Korrelationskoeffizient für die Filterung in vertikaler Richtung als zuverlässiger Schwellwert zur Reduktion von Ausreißern verwendet werden konnte. Bei horizontaler Filterung wurden dagegen auch Punkte rekonstruiert, die eine erhebliche Abweichung von der Oberflächenform besaßen.

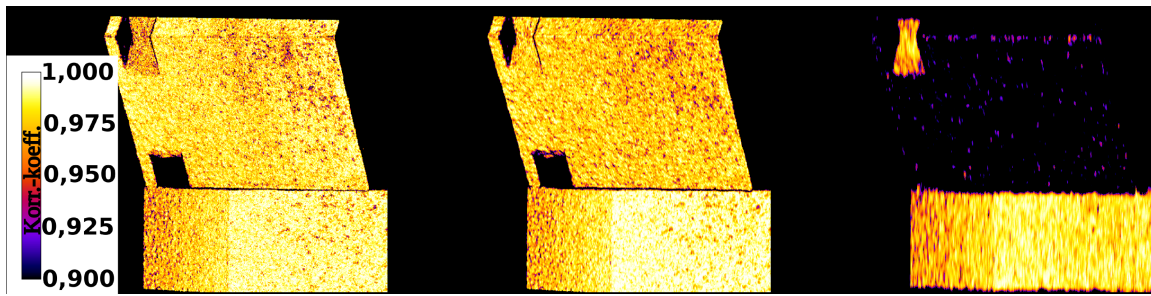
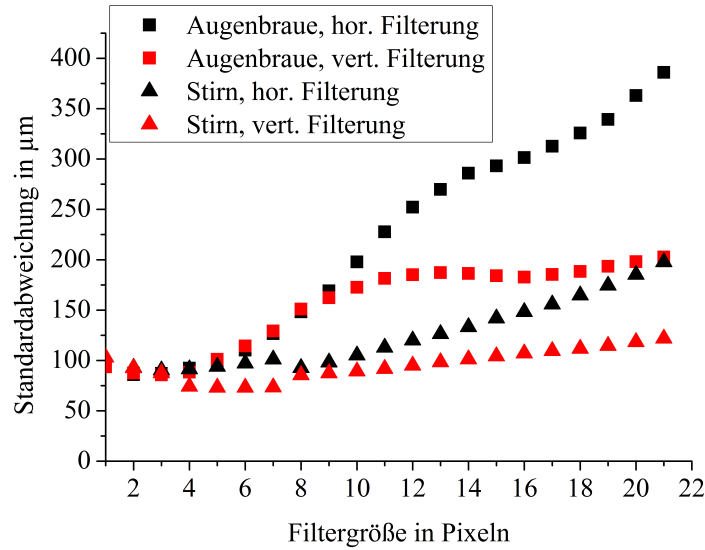


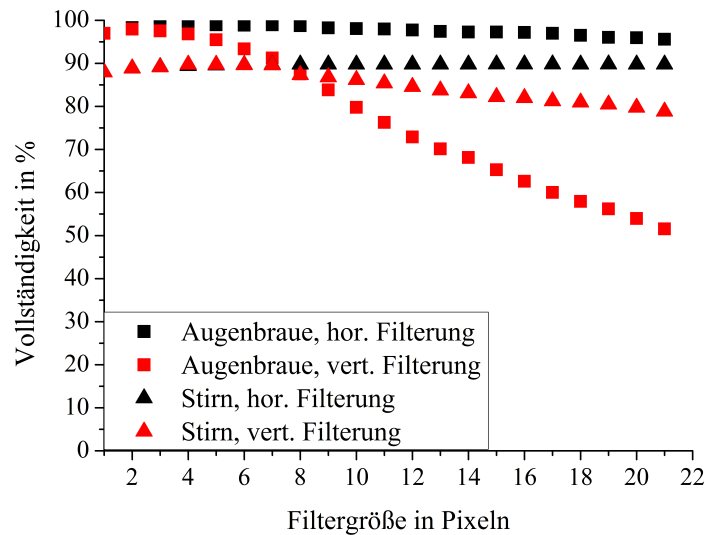
Abbildung 37: Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera, für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mitig), und 21 (rechts).

Auch eine Freiformoberfläche wurde untersucht und dazu die bereits erwähnte (S. 11) Büste des Dichters Friedrich Schiller als Testobjekt verwendet. Es wurden 30 Aufnahmen unter Speckle-Beleuchtung und weitere 300 Aufnahmen unter inkohärenter Beleuchtung mit bandbegrenzten Mustern (BBM) angefertigt. Die unter kohärenter Beleuchtung angefertigten Aufnahmen wurden nachträglich mit dem Sinus-Filter in vertikaler und horizontaler Richtung gefiltert, bevor 3D-Punkte rekonstruiert wurden. Die Abweichungen der nach der Rekonstruktion gefundenen z -Koordinaten von der inkohärenten Vergleichsrekonstruktion sowie die Vollständigkeit der Rekonstruktionen der als "Augenbraue" und "Stirn" gekennzeichneten Bereiche sind in Abbildung 38 dargestellt. Der als "Augenbraue" ausgewiesene Bereich wurde gewählt, da die Struktur durch ihren horizontalen Verlauf im Höhenprofil eine starke Abhängigkeit von vertikaler Filterung zeigte. Der Bereich der "Stirn" bildete dagegen eine mehr oder weniger glatte Referenzfläche ohne Neigungsabhängigkeit. Aus den Ergebnissen in Abbildung 38 ist abzulesen, dass die Abweichungen der gefilterten Rekonstruktionen bis Filtergröße 3 sanken, jedoch danach anstiegen und sich im Vergleich zum Ausgangswert verschlechterten. Dabei blieb die vertikal orientierte Filterung jedoch hinter der horizontalen Filterung zurück. Die Abweichung der aus vertikal gefilterten Bildern erzeugten Rekonstruktionen war also kleiner als bei gleichstarker horizontaler Filterung. Der Bereich der "Stirn" verhielt sich im Wesentlichen ähnlich, wobei die Abweichungen tendenziell kleiner waren und das Optimum für die vertikale Filterung bei Filtergröße 7 lag. Die Vollständigkeit der Rekonstruktionen für die horizontale Filterung war für beide Bereiche gleichbleibend hoch. Die 3D-Punkte im Bereich der "Augenbraue" und der "Stirn" wurden unter geringer, vertikaler Filterung etwas vollständiger rekonstruiert, bei mittlerer und großer Filterung aber zunehmend unvollständiger.

Die Ergebnisse für den Bereich der "Wange", die durch die Ausrichtung des Profils eher durch die horizontale Filterung beeinflusst wurden, sind in Abbildung 39 dargestellt. Die Abweichungen zeigen einen starken Anstieg für die horizontale Filterung bis in den Millimeterbereich, während die vertikale Filterung ein Optimum bei Filtergröße 4 besaß. Die



a)



b)

Abbildung 38: Punktrekonstruktionsabweichung des Bereichs der linken Augenbraue und der Stirn der Büste Friedrich Schillers beim Vergleich der mit Speckle-Beleuchtung und Filterung erzeugten Rekonstruktionen zu der durch inkohärente Beleuchtung erzeugten Referenzrekonstruktion. a) Standardabweichung der Punktwolken im Bereich von Auge und Stirn in μm , b) Vollständigkeit der rekonstruierten Bereiche in %.

Vollständigkeit der Rekonstruktionen war für beide Filterorientierungen für zunehmende Filtergrößen rückläufig, wobei die Abnahme unter horizontaler Filterung größer ausfiel. Um einen Eindruck der Abweichungen der z -Koordinaten durch die Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2, 5 und 21 zu ermöglichen, sind diese aus Sicht der Führungskamera für die horizontale bzw. vertikale Filterung in den Abbildungen 40 bzw. 41 abgebildet.

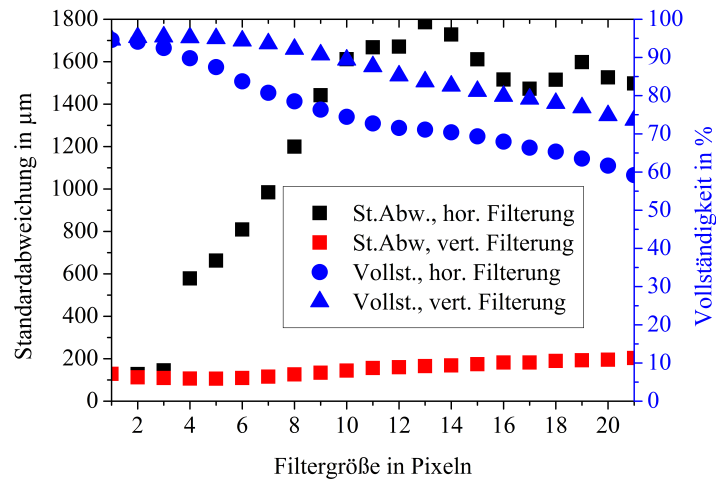


Abbildung 39: Punktrekonstruktionsabweichung des Bereichs der linken Wange der Büste Friedrich Schillers beim Vergleich der mit Speckle-Beleuchtung und Filterung erzeugten Rekonstruktionen zu der durch inkohärente Beleuchtung erzeugten Referenzrekonstruktion. Standardabweichung der Punktwolken im Bereich der Wange in μm und Vollständigkeit des rekonstruierten Bereichs in %.

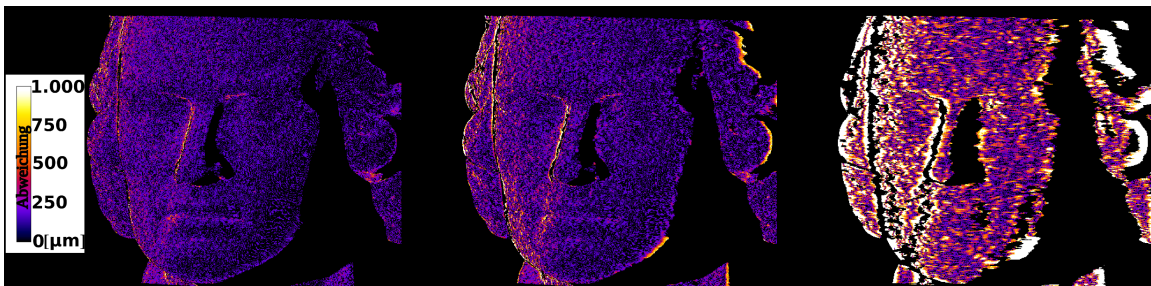


Abbildung 40: Räumliche Verteilung der Abweichung der Rekonstruktionen durch Speckle-Beleuchtung zur Rekonstruktion mit 300 inkohärenten Mustern aus Sicht der Führungskamera in μm . Dargestellt sind die Ergebnisse der horizontalen Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

Die Rekonstruktion der Büste unter horizontaler Filterung (Abbildung 40) zeigte, dass sich bereits bei Filtergröße 5 kleinere Abweichungen an den vertikal orientierten Rändern einstellen. Bei maximaler Filterung waren derartige Abweichungen verstärkt und über den gesamten Objektbereich zu beobachten, wobei im Bereich der "Stirn" vergleichsweise kleine Abweichungen aufgetreten sind. Die Rekonstruktionen der vertikal gefilterten Bilder (Abbildung 41) zeigten dagegen keinen wahrnehmbaren Unterschied zwischen den Filtergrößen 2 und 5. Die maximale Filterung führte wiederum zur Ausbildung von größeren Abweichungen im Bereich der horizontal orientierten Strukturen ("Augenbrauen" und "Lippen"). Insgesamt sind große Teile des Objektes nicht rekonstruiert worden. In den

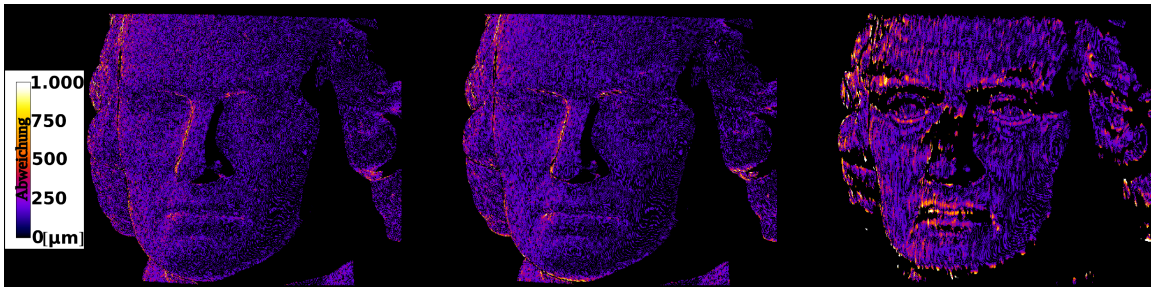


Abbildung 41: Räumliche Verteilung der Abweichung der Rekonstruktionen durch Speckle-Beleuchtung zur Rekonstruktion mit 300 inkohärenten Mustern aus Sicht der Führungskamera in μm . Dargestellt sind die Ergebnisse der vertikalen Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

rekonstruierten Bereichen sind die Abweichungen aber tendenziell deutlich kleiner als bei maximaler horizontaler Filterung.

Die Verteilung des zeitlichen Korrelationskoeffizienten über die Bildbereiche lässt auf die Wirksamkeit des Koeffizienten als Schwellwert schließen. Die "Korrelationskarten" in Ab-

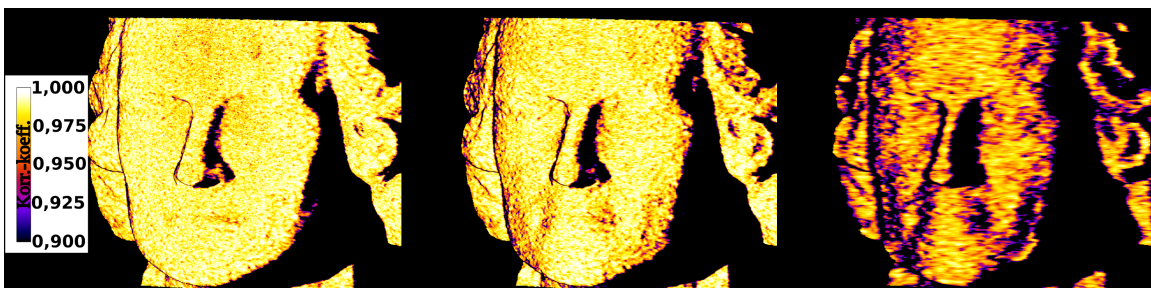


Abbildung 42: Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

Abbildung 42 zeigen die Verteilungen für die horizontale Filterung. Für die kleinen Filtergrößen 2 und 5 ist kaum eine Veränderung zu erkennen. Die maximale Filterung führte dahingegen zur Ausbildung von Arealen mit Werten $< 0,9$ an den vertikal orientierten Objektbereichen und insgesamt zu einer flächigen Senkung des Korrelationskoeffizienten. Die in Abbildung 43 dargestellten Verteilungen zeigen ebenfalls für kleine Filtergrößen kaum eine Abhängigkeit mit Ausnahme des Bereichs der "Augenbrauen", bei denen bei Filtergröße 5 bereits einige Punkte nicht rekonstruiert werden konnten. Bei der Filtergröße 21 wurden große Teile im Bereich der Augen und der Nase mit Werten über 0,9 gefüllt. Auch für dieses Freiformobjekt ließ sich feststellen, dass bei vertikaler Filterung der Korrelationskoeffizient die Aufgabe eines sinnvollen Schwellwertes zur Bewertung der Vertrauenswürdigkeit der Rekonstruktion erfüllte. Im Gegensatz dazu kam es bei horizontaler Filterung zwar zu einem Abfall des Korrelationskoeffizienten, jedoch waren trotzdem



Abbildung 43: Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).

starke Abweichungen von einer Referenzrekonstruktion zu beobachten. Diese konnten bei der vertikalen Filterung zu großen Teilen vermieden werden.

3.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zuerst eine experimentelle Methode zur Reduktion subjektiver Speckles bei der stereophotogrammetrischen 3D-Messung mit Laser-Speckles vorgestellt. Dabei wurden auf Piezoelementen montierte Spiegel verwendet, die gekippt werden konnten und während der Aufnahmen mehrere Bewegungszyklen ausführten. Dies geschah mit verschiedenen Amplituden in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Aufnahme-rate der Kameras wurde dazu auf 70 Hz begrenzt. Dieser Wert lag weit entfernt von aktuell verfügbaren Messgeschwindigkeiten [13, 14], die zum Teil im kHz -Bereich liegen. Das Ziel dieser Untersuchung war es allerdings, grundsätzlich neue Reduktionsmethoden für den Kontrast subjektiver Speckles zu finden und eingehend zu untersuchen. Der Kontrast der sich im Summenbild aus 300 Aufnahmen einer Ebene unter Beleuchtung mit objektiven Speckles ergebenden Verteilung konnte mit der hier vorgestellten Technik von 0,166 auf 0,115 gesenkt werden und der Kontrast subjektiver Speckles konnte auf etwa 0,087 abgeschätzt werden. Durch diese experimentelle Methode konnte die Präzision der 3D-Rekonstruktionen einer Ebene (Rauigkeit $< 2 \mu\text{m}$) um bis zu 20,9% und einer Kugel (Kugelabweichung $< 3 \mu\text{m}$) um bis zu 8,4% gesteigert werden, wobei die vertikale Orientierung der Bewegung zu teils deutlich größeren Verbesserungen führte, insbesondere wenn die größten Filter gewählt wurde.

Im zweiten Teil dieses Kapitels wurde eine numerische Reduktionsmethode subjektiver Speckles für die 3D-Messtechnik angewendet. Dabei wurden Grauwerte räumlich benachbarter Pixel gemittelt. Diese Mittelung war in Analogie zum Experiment auf eindimensionale Ausdehnungen beschränkt und bedeutete einen höheren Rechenaufwand, der pro Bild bis zu 50 ms an Berechnungszeit forderte. Die numerische Filterung führte zur stärker-

ren Senkung des Kontrasts (auf 0,095) der Verteilung im Summenbild als im Experiment, was auf eine erhebliche Reduktion des Kontrast der subjektiven Speckles schließen ließ. Um die optimale Filterorientierung zu bestimmen und einen Zusammenhang zwischen der Geometrie des photogrammetrischen Aufbaus und dieser Ausrichtung zu finden, wurden mit "POV-Ray" Simulationen durchgeführt. Hierzu wurden für die simulierten Detektoren Parameter gewählt, die denen im Experiment entsprechen haben. In verschiedenen Simulationen wurden diese Detektoren sowohl horizontal als auch vertikal zueinander orientiert, um Aufnahmen zu erzeugen. Anschließend wurden diese Bilder gefiltert. Dabei war zu beobachten, dass bei dem Aufbau mit horizontal orientierten Kameras ein klarer Zusammenhang zwischen dem Zuordnungsfehler in der Horizontalen und dem 3D-Rekonstruktionsfehler festgestellt werden konnte, während die vertikal positionierten Detektoren eine Abhängigkeit zwischen der vertikalen Punktzuordnung und dem 3D-Fehler erkennen ließen. Die Aussage, dass die Filterung ab einer Filtergröße > 5 Pixeln möglichst senkrecht zu der Orientierung der Kameras zueinander erfolgen sollte, konnte so belegt werden.

Anschließend wurden die numerischen Filter an verschiedenen Messungen getestet. Dazu wurden die experimentell gewonnenen Aufnahmen ohne Spiegelbewegung verwendet. Die Filterung führte zu einer Reduktion der Ebenenstandardabweichung um knapp 33% und der Kugelstandardabweichung von 9,3%, während die Vollständigkeit im Wesentlichen bei Werten über 90% gehalten werden konnte. Es wurden ferner auch Bauelemente untersucht, deren Kanten vertikal bzw. horizontal orientiert waren. Auch eine Büste des Dichter Friedrich Schillers wurde vermessen und die Aufnahmen nachbearbeitet. Alle Messungen wurden, um eine Referenz zu erhalten, auch mit 300 Aufnahmen unter inkohärenter, strukturierter Beleuchtung mit bandbegrenzten Mustern wiederholt. Die Abweichungen von diesen Referenzen, die Vollständigkeit der Rekonstruktionen und die Verteilung des zeitlichen Korrelationskoeffizienten zeigten, dass auch die Orientierung der Objektoberfläche einen Einfluss auf das Rekonstruktionsergebnis nach der Filterung hatte.

Die numerische wie die experimentelle Filterung konnte für kleine Filtergrößen orientierungsunabhängig zu einer Verbesserung der Präzision und/oder der Vollständigkeit beitragen. Bei größeren Filtern kam es bei der horizontalen Filterung vermehrt zu fehlerhaften Rekonstruktionen, was auf die Geometrie des Aufbaus im Bezug auf die Filterorientierung zurückzuführen war. In den Versuchen mit numerischen Filtern konnte zudem beobachtet werden, dass der normierte, zeitliche Kreuzkorrelationskoeffizient für die horizontale Filterung mit größeren Filtern kein sinnvoller Schwellwert war, wenn er auf dem gleichen Niveau angesetzt wurde wie bei der ungefilterten Messung. Die horizontale Grauwertmittelung lieferte für große Filterwerte generell eine hohe Vollständigkeit der Rekonstruktionen, jedoch wurden auch zunehmend starke Abweichungen zu den Refe-

renzpunktwolken beobachtet. Demgegenüber traten bei der vertikalen Grauwertmittelung bei großen Filterwerten zwar auch Abweichungen auf, diese waren aber weniger zahlreich, da durch den Schwellwert des Korrelationskoeffizienten viele Punkte nicht rekonstruiert wurden, die die Rekonstruktion verzerrt hätten. Die optimale Orientierung der Filterung verlief für größere Filter senkrecht zu den Epipolarebenen, die sich aus der Lage der Kamerazentren zu einander ergaben. Die experimentelle Speckle-Reduktion ermöglichte prinzipiell eine echtzeitfähige Messung, forderte dafür aber einen Mehraufwand im Versuchsaufbau. Die numerische Reduktionsmethode erhöhte den Rechenaufwand, es bedurfte aber keiner Änderungen im Aufbau, und es konnten bereits vorhandene Aufnahmen nachbearbeitet werden.

Die Auslenkung der Spiegel ließ sich auch in eine Filtergröße umrechnen, die mit der der numerischen Filter vergleichbar war. Ebenso wurden über die hier vorgestellten Filterfunktionen hinaus noch Weitere getestet. Im Anhang A.5 und A.6 (S. 111 und S. 112) sind einige Ergebnisse dazu dargestellt.

4 Speckle-basierte 3D-Vermessung im UV

Viele Oberflächen eignen sich nicht zur stereophotogrammetrischen Vermessung, da nicht zwangsläufig vom selben Objektpunkt aus gestreutes Licht von beiden Sensoren in einer vergleichbaren Intensität erfasst werden kann. Diese teils erheblichen Intensitätsunterschiede in den Kameraansichten ergeben sich oft aus der Streuerverteilung des Materials [95]. Eine Grauwertzuordnung, wie sie für die Stereophotogrammetrie notwendig ist, ist folglich nicht mehr oder nur stark eingeschränkt möglich. Die zu vermessende Oberfläche des Objektes kann zum Beispiel stark absorbierend wirken, sodass kaum oder gar kein Licht von ihm zurück geworfen wird, oder auch stark reflektierend sein, sodass der überwiegende Teil des Lichts entsprechend des Reflexionsgesetzes abgestrahlt und damit nicht gestreut wird. Auch transparente oder stark transluzente Objekte können im Allgemeinen nicht stereophotogrammetrisch vermessen werden, da auch hier die notwendige Bedingung nicht erfüllt wird, von denselben Objektpunkten gestreutes Licht auf beiden Sensoren wahrzunehmen. Am IOF Jena wurde in diesem Zusammenhang vorgeschlagen, transparente Objekte, z.B. aus Glas, strukturiert zu erwärmen und dann die Wärmesignaturen zur 3D-Rekonstruktion zu verwenden [96]. Yali et al. [97] stellten ein Verfahren vor, bei dem eine UV-Beleuchtung zur Erwärmung der Objektoberfläche eingesetzt und dann die Infrarotsignatur des Objektes stereophotogrammetrisch ausgewertet wurde. Derart "unkooperative" Oberflächen werden meist mit anderen Techniken untersucht. So können transparente Objekte interferometrisch und reflektierende interferometrisch [30] oder deflektometrisch [32] vermessen werden. Wenn eine optische, kontaktlose Messung nicht möglich ist oder die Messung keine befriedigenden Ergebnisse liefert, kann auch auf taktile Messverfahren zurückgegriffen werden [98].

Allerdings wirken verschiedene Materialien nicht für alle Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung transparent, absorbierend, streuend oder reflektierend. Insbesondere im ultravioletten (UV) Bereich des Lichts ändern viele Oberflächen ihre optischen Eigenschaften im Vergleich zum sichtbaren bzw. visuellen Spektrum (VIS). Die Reflektivität von Edelstahl zum Beispiel sinkt mit abnehmender Wellenlänge [99]. Ein weiteres gemeinhin bekanntes Beispiel für die wellenlängenabhängige Veränderung optischer Eigenschaften bildet Glas, welches im VIS größtenteils transparent wirkt, aber kaum von Wellenlängen unter 350 nm durchdrungen werden kann. Dieses Licht kann absorbiert, gerichtet oder diffus reflektiert, also gestreut werden. Im letztgenannten Fall könnte ein stereophotogrammetrischer Aufbau mit UV-Beleuchtung 3D-Aufnahmen von Objekten erstellen, die im VIS nur schlecht oder gar nicht vermessen werden können. Diffuses Streulicht könnte dabei auch durch Beschädigungen der Oberfläche wie "Kratzern" oder Verunreinigungen herrühren. Die hier untersuchten Oberflächen wiesen beides jedoch nicht auf. Auch eine

Eigenfluoreszenz könnte, insbesondere bei Gläsern, durch die Beleuchtung mit ultraviolettem Licht ausgelöst werden. Die hier untersuchten Gläser zeigten bei Beleuchtung mit ultraviolettem Licht jedoch keine Eigenfluoreszenz.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Übertragung der stereophotogrammetrischen Vermessung mit Speckle-Projektion aus dem VIS in den UV-Bereich vorgestellt. Anschließend wird eine im VIS reflektierende Freiformoberfläche aus Edelstahl im VIS und UV vermessen und die Rekonstruktionsergebnisse anhand von Präzision und Vollständigkeit verglichen. Zuletzt werden im VIS transparente Materialien aus Glas ebenfalls sowohl im VIS als auch im UV vermessen und die Ergebnisse einander gegenübergestellt. Zum Abschluss dieses Kapitels werden die Resultate in einer kurzen Zusammenfassung vorgestellt.

4.1 Kalibrierung und Charakterisierung eines stereophotogrammetrischen Systems im UV-Bereich

Der Aufbau zur 3D-Messung im UV-Bereich bestand aus Detektoren (JAI CM-140 GE-UV, Pixelabstand $4,65 \mu m$) die mit Quarzglasobjektiven (UV2528B, Brennweite: $25 mm$, $F_{\#}=1,8$) bestückt wurden. Die Objektive besaßen eine kleinere Gegenstandsweite als im VIS, um durch einen geringen Arbeitsabstand von $22 cm$ und ein kleineres Messvolumen von $5 \times 5 \times 5 cm^3$ eine möglichst hohe Intensität auf den Detektorelementen zu ermöglichen. Die Kamerasysteme selbst wurden nebeneinander positioniert, sodass geometrisch ein ähnlicher, jedoch räumlich wesentlich kleinerer Aufbau entstand als im Kapitel 3 (S. 26). Der Winkel zwischen den zentralen Sichtstrahlen betrug $32,4^\circ$ und war damit ähnlich groß wie der Winkel der Sichtstrahlen des Aufbaus im sichtbaren Wellenlängenbereich. Vergleichbar war zwischen den Aufbauten auch der kleine maximale Winkel von $4,7^\circ$ zwischen der Horizontalen in den Aufnahmen und den Epipolarlinien. Es konnte daher davon ausgegangen werden, dass eine numerische, eindimensionale Filterung in vertikaler Richtung zur Reduktion der subjektiven Speckles von Vorteil sein würde. Der Aufbau ist in Abbildung 44 skizziert. Eine tabellarische Zusammenstellung der Komponenten und Parameter wird im Anhang in Tabelle 2 S. 108 gegeben. Zur Erstellung des Messaufbaus konnte nicht dasselbe Kalibrierungskonzept verwendet werden wie im sichtbaren Bereich des Lichts (in Kapitel 3). Bevor das von Große et al. vorgeschlagene Kalibrierungskonzept [50] am IAOb verwendet wurde²³, das einen Bildschirm zur Projektion von bandbegrenzten Mustern und das Vorwissen um den Abstand der Pixel des Bildschirms einsetzte, um den Zhang-Algorithmus [51] mit ausreichend vielen Messpunkten zu versorgen, wurden Schachbrettmuster verwendet. Die Seitenlängen der Muster und die Anzahl

²³2020 wurde von Chen et al. ein ähnliches Konzept vorgestellt, bei dem "synthetische" Speckle-Muster eingesetzt werden [100].

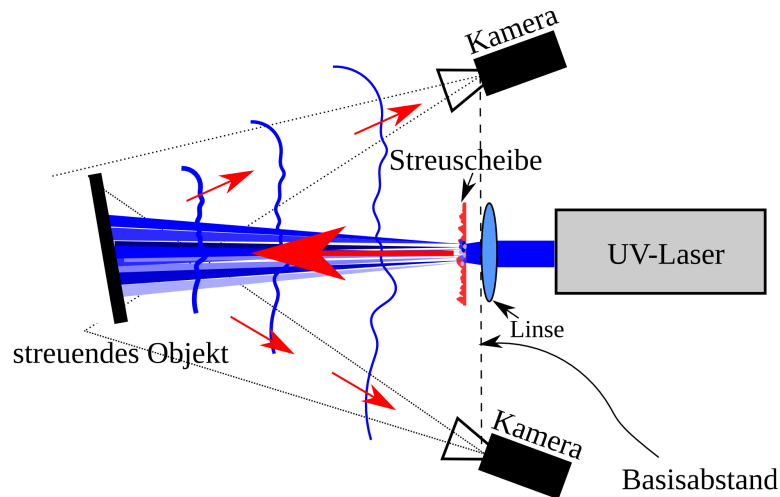


Abbildung 44: Skizze des Messaufbaus zur speckle-basierten 3D-Messung im UV.

der Felder des Schachbrettes mussten dafür bekannt sein. Zudem war es notwendig, dass die Muster hinreichend eben waren. Diese Methode wurde in den UV-Bereich übertragen. Ein Schachbrettmuster mit 7 mal 8 Feldern und einer Feldhöhe und -breite von je $3,6 \text{ mm}$ wurde dazu mit einem handelsüblichen Drucker (HP-Laserjet-1022) auf einfaches Druckpapier aufgebracht²⁴. Anschließend wurde das Muster auf einer geläpften Platte befestigt und in 80 unterschiedlichen Positionen von beiden Kameras unter Beleuchtung einer inkohärenten 254 nm UV-Lampe (UV UVGL-25 4W-254/265NMUVP, Hersteller: Analytik Jena) aufgenommen. Zwei Beispielbilder dieses Prozesses sind in **Abbildung 45 a)** und **b)** dargestellt. Zur Bestimmung der intrinsischen Parameter wurde zuerst eine

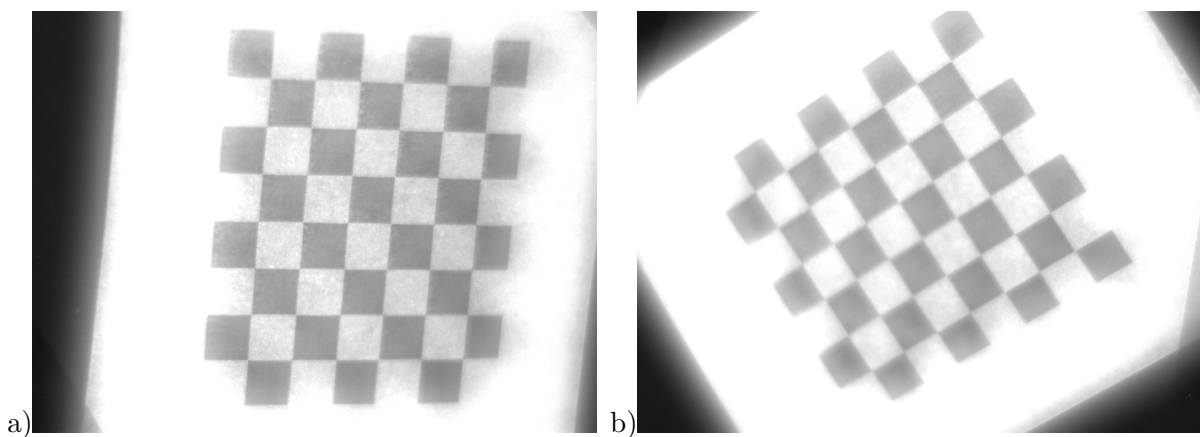


Abbildung 45: Beispielaufnahmen eines mit einem Schachbrett bedruckten Papiers, das auf eine geläppte Platte aufgeklebt wurde. a) Bild des Schachbrettmusters aufgenommen mit der ersten Kamera, b) Bild des Schachbrettmusters aufgenommen mit der zweiten Kamera in einer anderen Position.

²⁴Für die Auswertung wurden letztendlich die Ecken der inneren 6 mal 5 Felder benutzt.

leicht abgewandelte Form des Programmsatzes "toolbox"²⁵ verwendet, um die Ecken der Schachbrettfelder zu identifizieren und für die anschließende Bearbeitung durch das Programm "correlation-expert" vorzubereiten, das auch für alle folgenden Kalibrierungs- und Rekonstruktionsschritte verwendet wurde. So konnten für beide Kameras intrinsische Parameter für den UV-Bereich bestimmt werden.

Durch den UV-Laser (Typ: MPL-N-266-100 mW, cw , $M^2 < 1,2$), eine einfache Bikonvexlinse (Durchmesser: 50 mm, Brennweite: 50 mm) und eine Streuscheibe aus Quarzglas konnten Speckles bei 266 nm erzeugt werden, mit denen eine Miniaturbüste des Dichters Friedrich Schiller beleuchtet werden konnte (siehe Abbildung 46). Linse und Streuscheibe wurden so zu einander gestellt, dass die durchschnittliche Speckle-Größe in den Bildern bei etwa 10 Pixeln lag. Durch die mechanische Verschiebung der Streuscheibe senkrecht zur Propagationsrichtung des Lasers konnten die Speckle-Muster verändert werden. Aus

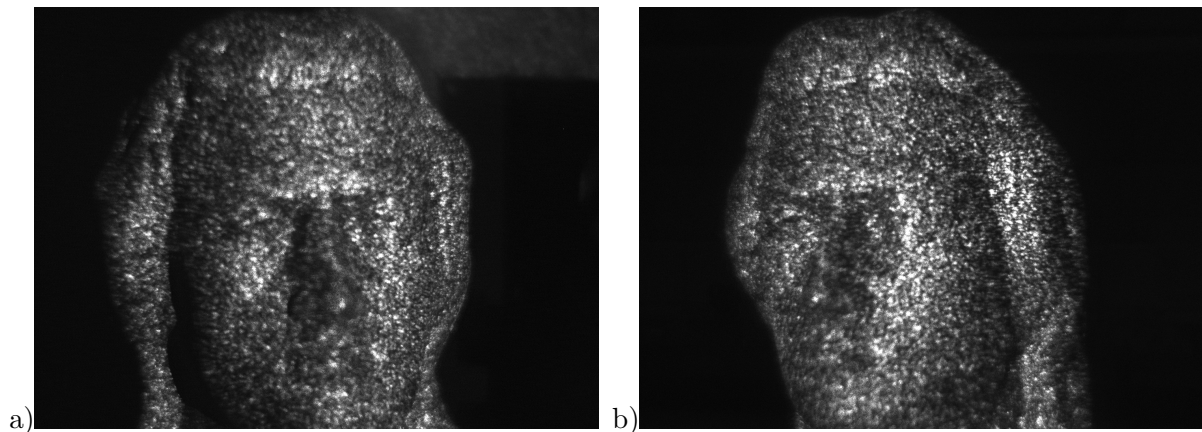


Abbildung 46: Stereoaufnahme einer Miniaturbüste Friedrich Schillers unter Speckle-Beleuchtung bei 266 nm. a) Bild aus Sicht der ersten Kamera, b) Bild aus Sicht der zweiten Kamera.

30 dieser Stereobilder mit unterschiedlichen Speckle-Mustern konnten analog zu den Aufbauten im sichtbaren Wellenlängenbereich über den 8-Punktalgorithmus [52] die äußeren Parameter des Aufbaus bestimmt werden, die die Position und Orientierung der Kameras zueinander beinhalteten.

Anschließend konnten dieselben Objekte vermessen werden, die zur Charakterisierung der Messgenauigkeit bereits im Kapitel 3 (S. 26) untersucht wurden: eine geläppte und zertifizierte Ebene (Messfläche 5 cm × 28 cm) mit einer Messabweichung von $< 2 \mu\text{m}$ und eine Kugel mit einem Radius von 15 mm und einer Höhenabweichung $< 3 \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 47). Aus der Verteilung objektiver Speckles auf der Ebene konnte der Kontrast der objektiven Speckles zu 0,34 bestimmt werden. Der Polarisationszustand des

²⁵Erstellt 2004 von Jean-Yves Bouguet für die Intel Corporation. http://vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

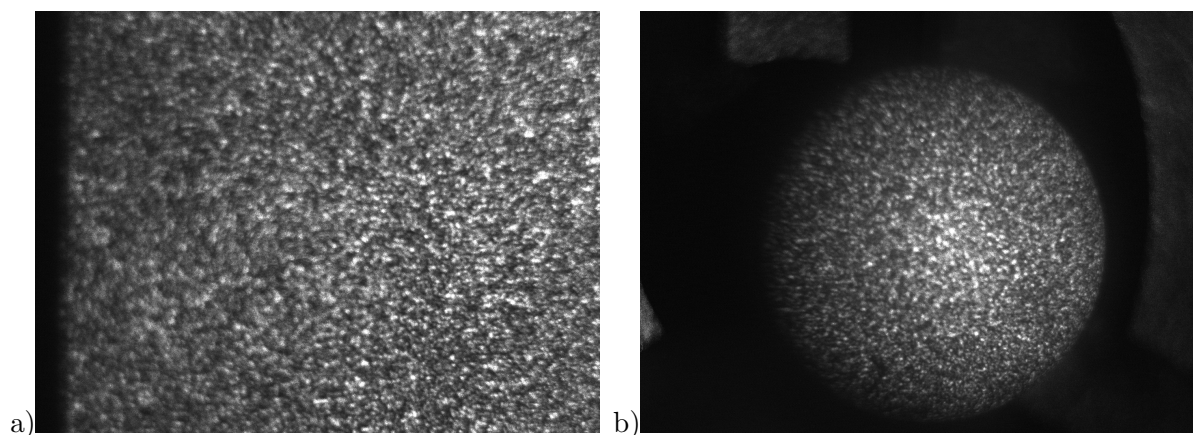


Abbildung 47: Aufnahmen der zertifizierten Messobjekte unter Speckle-Beleuchtung bei 266 nm aus Sicht der Führungskamera. a) Einzelaufnahme der Ebene, b) Einzelaufnahme einer Kugel.

Lasers konnte vor bzw. nach der Streuscheibe nicht überprüft werden. Es wurde allerdings angenommen, dass das Licht linear polarisiert war. Die histogrammische Verteilung und ebenso die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für $N = 9$ aus Gleichung 2.19 (S. 18), angepasst an die Graustufen des Histogramms, wurden in Abbildung 48 aufgetragen. Aus

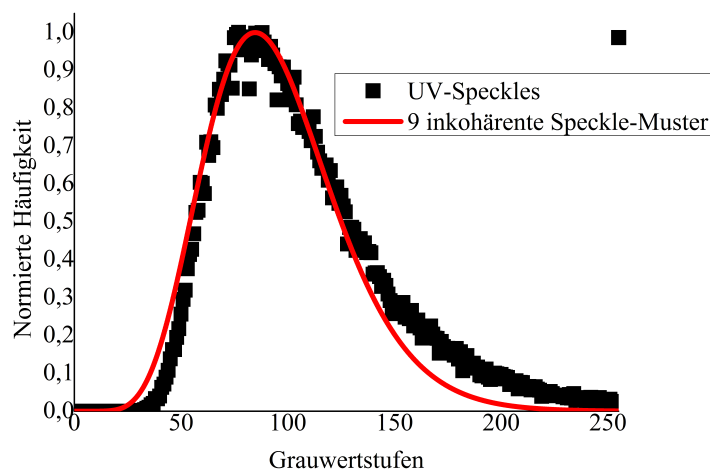
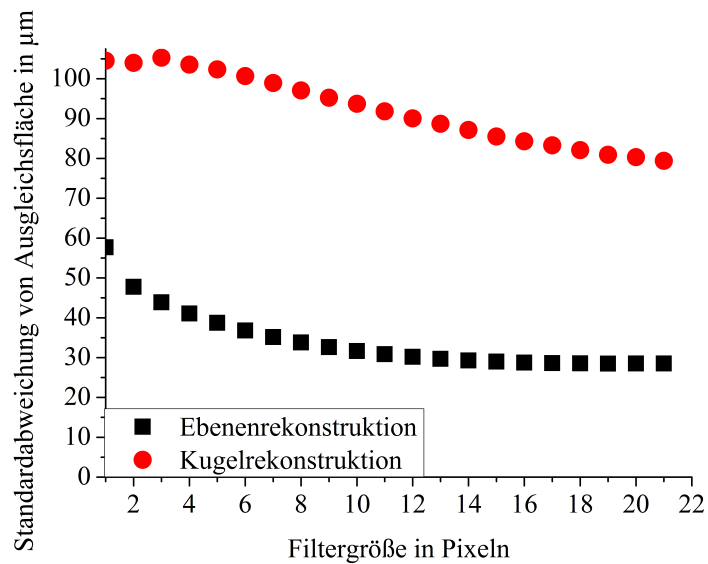


Abbildung 48: Normiertes Histogramm der beobachteten Speckle-Verteilung und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für $N = 9$ als Funktion der Grauwerte. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wurde an die Graustufen angepasst.

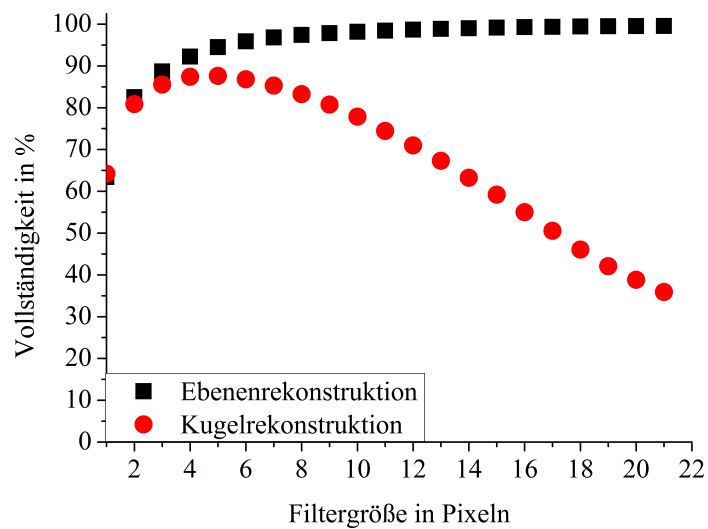
der Abbildung und dem Kontrastwert der objektiven Speckles von 0,34 ist zu entnehmen, dass mehrere Ausgangsverteilungen inkohärent überlagert wurden, sodass ein deutlicher, inkohärenter Untergrund in den Aufnahmen zu beobachten war. Da es sich bei dem Lasermodell MPL-N-266-100mW um einen zweifach frequenzverdoppelten Laser handelte, kann dieser Beobachtung mit dem "Walk-off"-Effekt erklärt werden, der bei derartigen

Geräten auftreten kann.

Die Standardabweichung für die bei verschiedenen Filtergrößen des eindimensionalen, vertikalen Sinus-Filters erzeugten Punktwolken von Ausgleichsflächen (Ebenen oder Kugeln) und die dazugehörige Vollständigkeit sind in Abbildung 49 dargestellt. Die Standardabwei-



a)



b)

Abbildung 49: a) Standardabweichung der Rekonstruktionen über die Filtergröße von Ausgleichsflächen in μm b) Vollständigkeit der Rekonstruktionen bei verschiedenen Filtergrößen in % (rechts), ebenfalls über die Filtergröße aufgetragen.

chung von Ausgleichskugeln wurden auf etwa $100 \mu\text{m}$ bestimmt, während die Vollständigkeit der Rekonstruktionen von der Filtergröße abhängig war und von 64% auf annähernd

90% bei Filtergröße 4 und 5 stieg. Sie sank danach aber mit zunehmender Filterausdehnung auf unter 50%. Die rekonstruierten Punktwolken der vermessenen, zertifizierten Ebene lieferten dagegen Standardabweichung von den Ausgleichsebenen von unter $60 \mu m$ und einer Vollständigkeit von über 80%, wobei größere Filter diese Werte auf über 95% bzw. unter $35 \mu m$ verbesserten. Sowohl die Standardabweichung als auch die Vollständigkeit waren durchaus vergleichbar mit den Ergebnissen, die mit dem Aufbau bei $532 nm$ bestimmt wurden. Es ist allerdings zu bemerken, dass die Messvolumendiagonale in dem Aufbau für den UV-Bereich nur ein Achtel der Länge des Messvolumens im sichtbaren Bereich des Lichtes aufwies. Auch wurde für die intrinsische Kalibrierung eine vergleichsweise geringe Anzahl an als Stützstellen bereitgestellten Punkten verwendet. Hier wurden pro Kamera 2.400 Punkte ($80 \times 5 \times 6$) eingesetzt, während bei der im sichtbaren Bereich angewendeten Technik prinzipbedingt mehr als 4.800.000 Stützstellen herangezogen werden konnten²⁶. Ferner wurde das für die Kalibrierung vorgesehene Schachbrett zwar sorgfältig befestigt, es ist aber nicht davon auszugehen, dass die Ebenheit des Papiers mit der eines kommerziellen Bildschirms vergleichbar war. Diese beiden Faktoren könnten die Güte der intrinsischen Kalibrierung negativ beeinflusst und so zu einer suboptimalen Rekonstruktionsqualität des Systems geführt haben. Der erstellte Aufbau für die 3D-Vermessung im UV-Bereich ist als ein Prototyp zu betrachten, wobei es noch offensichtliches Verbesserungspotential, z.B. durch eine angepasste Kalibrierungstechnik oder im Bezug auf die Messgeschwindigkeit gibt. Die Aufnahmezeit pro Bild lag bei etwa $10 ms$, musste bei der später vorgestellten Vermessung von Glas jedoch auf $500 ms$ erhöht werden, sodass der gesamte Messprozess selbst mit einer automatisierten Streuscheibenbewegung wenigstens einige Sekunden gedauert hätte. Im Experiment wurde die Streuscheibe händisch verschoben, was je nach Umfang der Messung bis zu einigen Minuten in Anspruch nahm. Der Kontrast der subjektiven Speckles entsprach im UV nicht dem im VIS in Kapitel 3 (S. 26). Nach Gleichung 2.35 (S. 25) und den Teilfaktoren $K_{Zeitl} = 1$, $K_{Räuml} = 1$, $K_{Pixel} = 0,144$, $K_{Pol} = 0,707$ und $K_{Obj} = 0,34$ ließ sich der Kontrast der subjektiven Speckles in dem hier untersuchten Aufbau im UV auf etwa 0,035 abschätzen.

4.2 Vermessung einer im VIS reflektierenden Freiformoberfläche aus Edelstahl

Reflektierende Oberflächen aus Edelstahl sind im sichtbaren Bereich des Lichtes (VIS) schwer zu vermessen, da beinahe das gesamte, auf das Objekt projizierte Licht entspre-

²⁶Es wurde in Anwendung des Verfahrens nach Große et al. [50] mit einem Bildschirm ($1920 \cdot 1080$ Pixel) an wenigstens 16 Positionen kalibriert. So konnten fast alle der 307.200 Kamerapixel an verschiedenen Positionen zur Kalibrierung im VIS verwendet werden.

chend dem Reflexionsgesetz abgelenkt wird. So ist es kaum oder meist gar nicht möglich, Licht von ein und demselben Objektpunkt in beiden Kameraansichten aufzuzeichnen, das für eine stereophotogrammetrische Vermessung benötigt wird. Wie zu Beginn von Kapitel 4 beschrieben, sinkt die Reflektivität von Edelstahl mit abnehmender Wellenlänge [99]. Es kann daher vermutet werden, dass sich die Streukeule von Edelstahloberflächen mit abnehmender Wellenlänge zudem verbreitert, also mehr Licht diffus gestreut wird²⁷. So kann bei einer ausreichend kleinen Wellenlänge und in einem für den Wellenlängenbereich passenden Messaufbau genug Streulicht von beiden Detektoren wahrgenommen werden, um eine Vermessung zu ermöglichen. Da keine bezüglich ihrer Oberflächenrauigkeit geprüften Metallobjekte zur Verfügung standen, wurde ein Freiformobjekt vermessen. Um eine Einordnung und einen Vergleich zu ermöglichen, wurden im Folgenden neben den Messungen im UV auch Messungen mit dem im Kapitel 3 bei 532 nm verwendeten und in Tab. 1 (S. 107) spezifizierten Aufbau gezeigt. Als Beispielobjekt für eine Freiformfläche wurde ein Schaumlöffel aus Edelstahl verwendet (Abbildung 50). Vor der Messung wurde das Loch in der Mitte des Schaumlöffels mit Papier geschlossen, um eine Zuordnung zu erleichtern. In Abbildung 51 *a*) und *b*) ist das Freiformobjekt (Schaumlöffel) in beiden



Abbildung 50: Bild des untersuchten Schaumlöffels aus Edelstahl.

Kameraansichten unter Speckle-Beleuchtung bei 532 nm dargestellt. Die Teile des Bildes, in denen der Hauptreflex der Speckle-Beleuchtung zu sehen ist, waren stark überbelichtet. Lediglich die eine der Öffnungen ausfüllende Papierscheibe ist in beiden Ansichten (im Bildzentrum) etwa gleich hell zu sehen. In den anderen Bildbereichen hing die Intensität

²⁷Es konnte vermutet werden, dass die Plasmafrequenz der Elektronen, die an das Metallatomgitter gebunden waren, überschritten wird.

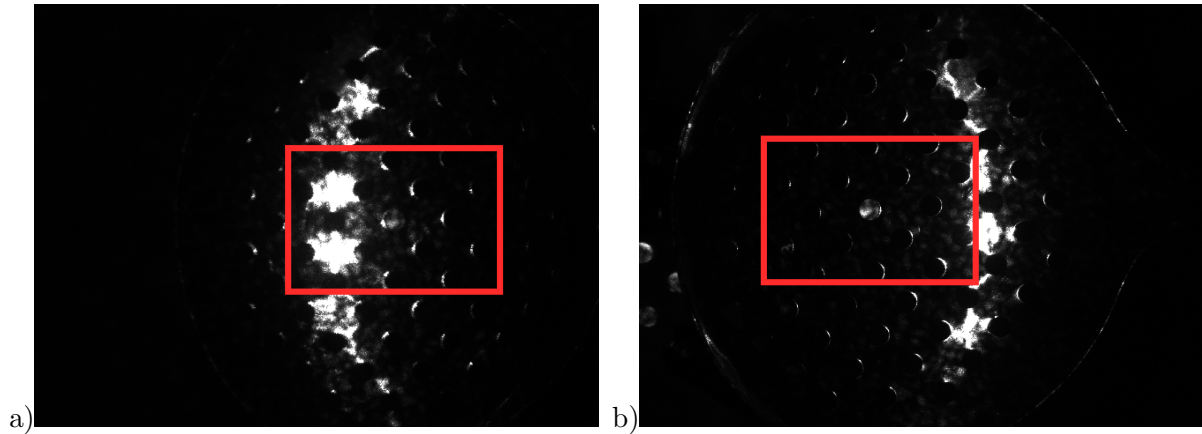


Abbildung 51: Aufnahmen eines Schaumlöffels unter Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im VIS unter Verwendung des in Kapitel 3 spezifizierten Aufbaus. Der im UV untersuchte Bereich ist rot eingrahmt. a) Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera b) Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera.

von dem Winkel der Oberfläche zur Beleuchtungsrichtung und der Speckle-Struktur ab. Vor der Rekonstruktion wurde erneut der im Kapitel 3 (S. 26) vorgestellte eindimensionale, vertikale Sinus-Filter der Filtergröße 10 verwendet. Die bei verschiedenen Filtergrößen bestimmten Rekonstruktionen des Schaumlöffels waren den Intensitätsverhältnissen entsprechend sehr unvollständig und gaben nur bedingt die Form des Objektes wieder, wie in der Abbildung 52 a) und b) zu sehen ist. In Falschfarben sind hier die in der Rekonstruktion bestimmten z -Koordinaten aus der Sicht der Führungskamera als sogenannte *Höhenkarten* dargestellt. Der rot eingrahmte Bereich entspricht dem vollen Sichtfeld des

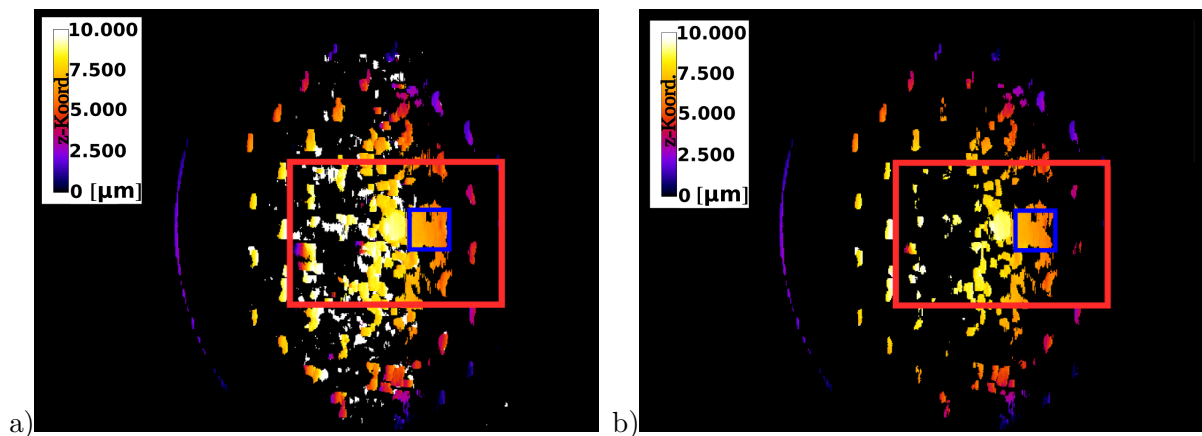


Abbildung 52: Ermittelte Höhenkoordinaten der Rekonstruktion des Schaumlöffels im VIS in μm . Der Ausschnitt, der bei 266 nm betrachtet wurde, ist rot eingrahmt. Ein Ausschnitt zur Bewertung der Standardabweichung zu Ausgleichsflächen ist blau hervorgehoben. a) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizienten: 0,5) b) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,9).

UV-Aufbaus (in diesem Fall mit 240×162 Pixeln dargestellt). Um eine Angabe über die

Höhenauflösung und die Vollständigkeit zu geben, wurde ein annähernd vollständig rekonstruierter Bereich neben der mit Papier gefüllten Öffnung ausgewertet, der blau umrahmt dargestellt ist (50×50 Pixel). In Abbildung 53 werden Aufnahmen desselben Objektes unter Beleuchtung mit Speckles bei 266 nm (100 mW Maximalleistung, *cw*) wiedergegeben. Auch hier sind deutliche Unterschiede in den Ansichten der Kameras zu beobachten,

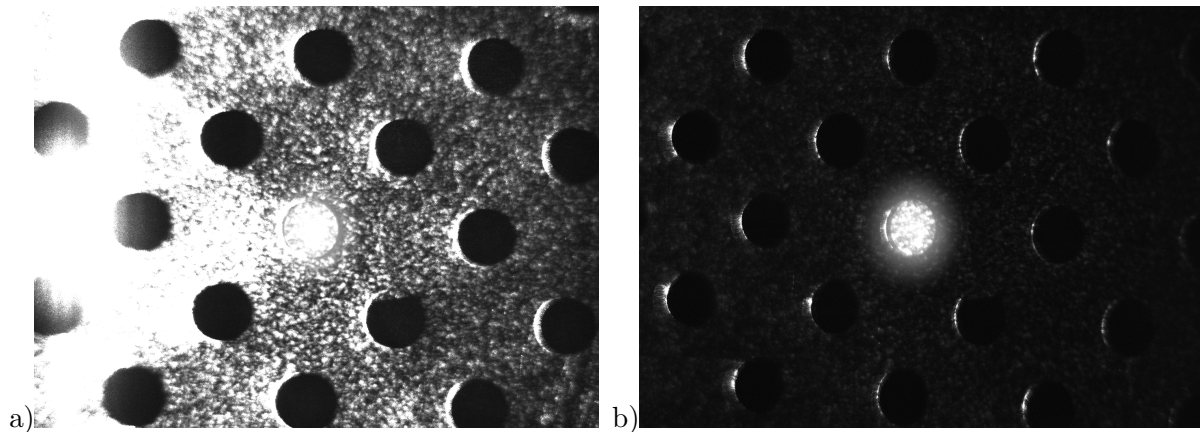


Abbildung 53: Aufnahmen eines Schaumlöffels unter Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im UV. a) Bild aus der Perspektive der ersten Kamera b) Bild aus der Perspektive der zweiten Kamera.

allerdings lag der Bereich des Objektes außerhalb des Sichtfeldes der zweiten Kamera, in dem der Hauptreflex aus ihrer Perspektive zu sehen gewesen wäre. Der Hauptreflex der Beleuchtung ist allerdings deutlich am linken Bildrand (Abbildung 53 a)) zu erkennen und führte auch hier zur Überbelichtung des Bildes. Das Papier, das eine der Öffnungen verschloss, ist in beiden Ansichten gut zu erkennen.

Vor der Rekonstruktion wurde wiederum der vertikale Sinus-Filter der Größe 10 eingesetzt. Zu bemerken ist, dass durch die verschiedenen Abbildungsmaßstäbe der Aufbauten, die Filterung im VIS und im UV unterschiedlich große Bereiche erfasste. Da für beide Aufbauten aber eine Speckle-Größe von etwa 10 Pixeln bestimmt werden konnte, war das Verhältnis der Filtergröße zur Speckle-Größe vergleichbar. Allerdings unterschied sich das Verhältnis des Krümmungsradius des Objektes im Bezug auf die Filter. Da der Krümmungsradius im Dezimeterbereich lag, konnte jedoch davon ausgegangen werden, dass die Filterung (über Bereiche von $0,48 \text{ mm}$ im UV-Bereich bzw. $2,1 \text{ mm}$ im VIS) die Krümmung nicht wesentlich beeinflusste.

In den Abbildungen 54 a) und b) sind die Höhenkarten der Rekonstruktion des Schaumlöffels im UV-Bereich dargestellt. In der Abbildung 55 sind die Standardabweichung der Rekonstruktionen im VIS und UV im Bezug auf Ausgleichskugeln bzw. -ebenen über die verwendeten Filtergrößen aufgetragen. Für die Kugelanpassung an den Ausschnitt zeigte sich, dass die Rekonstruktion eine deutlich größere Standardabweichung aufwies als

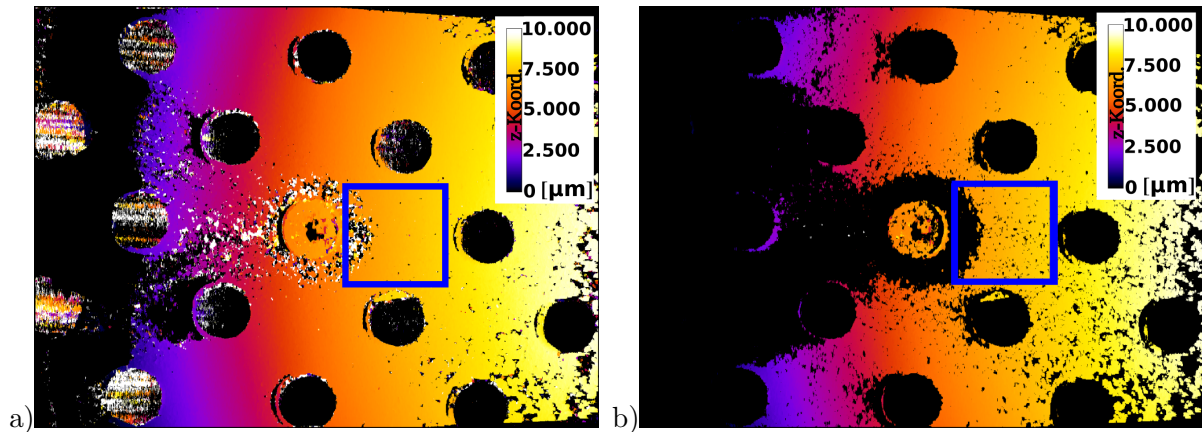
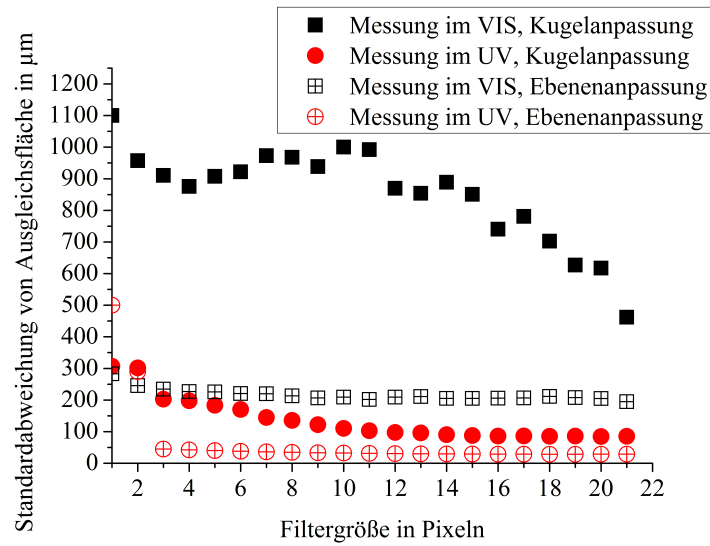
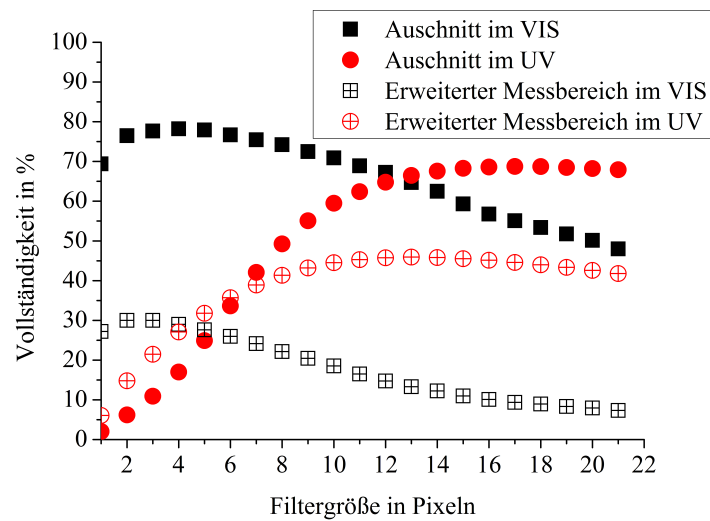


Abbildung 54: Ermittelte Höhenkoordinaten der Rekonstruktion des Schaumlöffels im UV in μm . Ein Ausschnitt zur Bewertung der Standardabweichung zu Ausgleichsflächen ist blau hervorgehoben. a) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,5) b) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,9).

bei der Ebenenanpassung im VIS oder einer der Anpassungen an die Rekonstruktion im UV. Auch für die Ebenenabweichung konnten, mit Ausnahme der kleinsten Filtergrößen, geringere Werte für die Standardabweichung für den UV-Bereich als für den sichtbaren Bereich des Lichts (VIS) bestimmt werden. Für die Ebenenanpassung wurden für den untersuchten Teilausschnitt sogar Werte unter $50 \mu m$ bestimmt. Auch die Vollständigkeit stieg für beide untersuchten Bereiche bei zunehmender Filtergröße für die Rekonstruktionen, die bei einer Beleuchtung von 266 nm durchgeführt wurden. Damit wurde für diese Oberfläche sowohl eine lokale als auch eine globale Erhöhung von vertrauenswürdig rekonstruierten Punkten gezeigt. Zusammen mit der gleichzeitig abnehmenden Standardabweichung konnte daher eine Verbesserung der Rekonstruktionsqualität dieser Oberfläche durch die Vermessung im UV mit anschließender Filterung im Vergleich zur Vermessung im VIS mit anschließender Filterung, festgestellt werden.



a)



b)

Abbildung 55: a) Standardabweichung der rekonstruierten Punktwolken von Ausgleichsflächen (Kugeln und Ebenen) in μm über der Filtergröße in Pixeln, b) Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken in % über der Filtergröße in Pixeln. Der erweiterte Messbereich bezeichnet den vollen Messbereich aus der Messung im UV.

4.3 Vermessung von im VIS transparenten Oberflächen aus Glas

Bei den Versuchen mit dem UV-Speckle-System konnte beobachtet werden, dass Oberflächen aus Glas im Vergleich zum VIS im UV einen bemerkenswerten Anteil des zur Beleuchtung verwendeten Lichts streuten. Dieser Streulichtanteil stammte nicht von Beschädigungen oder Verunreinigungen der Oberflächen, und auch Fluoreszenz, die durch die UV-Beleuchtung ausgelöst worden sein könnte, konnte ausgeschlossen werden. In diesem Zusammenhang wurde ein Patentantrag erstellt, der sich mit der Vermessung komplexer Objekte, also solcher, die zum Beispiel aus verschiedenen Teilen mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften zusammengesetzt sind, beschäftigt [101]. Um die Möglichkeit der Vermessung von im VIS transparentem Glas zu demonstrieren, wurde zuerst ein Satz von sechs gestuft angeordneten Deckgläschen untersucht, die nach Herstellerangabe eine Dicke von $175 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ aufwiesen. Da die einzelnen Plättchen direkt aneinander gedrückt befestigt wurden, konnte davon ausgegangen werden, dass die Stufenhöhen mit den Dicken der Plättchen vergleichbar waren. Ein weiteres Testobjekt bildete eine antireflexbeschichtete, sphärische Linse (Durchmesser: 32 mm , Krümmungsradius: $72 \mu\text{m} \pm 4 \text{ mm}$). Diese Linse wurde auf beiden Seiten halbseitig besprüht, wobei die Trennlinie zwischen besprühtem und unbesprühtem Bereich auf der Rückseite horizontal und auf der Vorderseite vertikal verlief.

4.3.1 Vermessung von gestuften, unbeschichteten Deckgläschen

Die Deckgläschen wurden im VIS bei 532 nm vermessen. Eine Skizze der Anordnung der Deckgläschen ist in Abbildung 56 dargestellt. Es ist zu bemerken, dass die Aufnah-

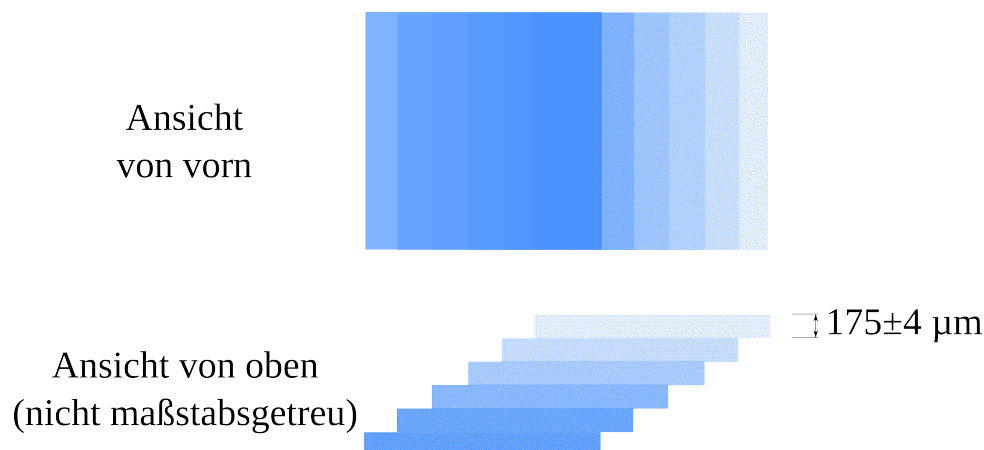


Abbildung 56: Skizze des untersuchten Satzes an Deckgläschen, die stufenartig zusammengesetzt wurden. Jedes Deckgläschen hat eine Dicke von $175 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$.

men aufgrund des schwachen Signals im Vergleich zum vorherigen Kapitel, der Vermessung des Schaumlöffels und der besprühten Linse mit einer erhöhten Aufnahmezeit von

100 ms angefertigt wurden²⁸. Zwei Beispielaufnahmen sind in Abbildung 57 dargestellt. Vor der Rekonstruktion wurden die Bilder mit vertikal orientierten Sinsusfiltern verschie-

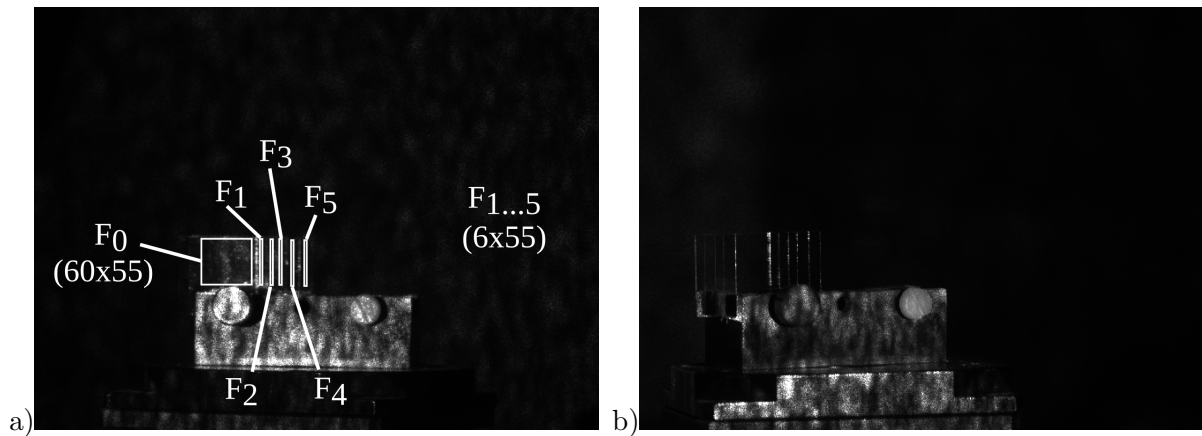


Abbildung 57: Aufnahmen des Satzes von Deckgläschen unter Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im VIS. a) Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera. Die für die Auswertung herangezogenen Bereiche sind weiß hervorgehoben und beschriftet. b) Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera.

dener Größen bearbeitet. Eine der sich daraus ergebenden Punktwolken ist in Abbildung 58 dargestellt, wobei eine Korrelation von 0,5 bzw. 0,9 als Schwellwert für die Rekonstruktion angesetzt wurde. Aus den im Bereich F_0 bei der Filtergröße 10 rekonstruierten

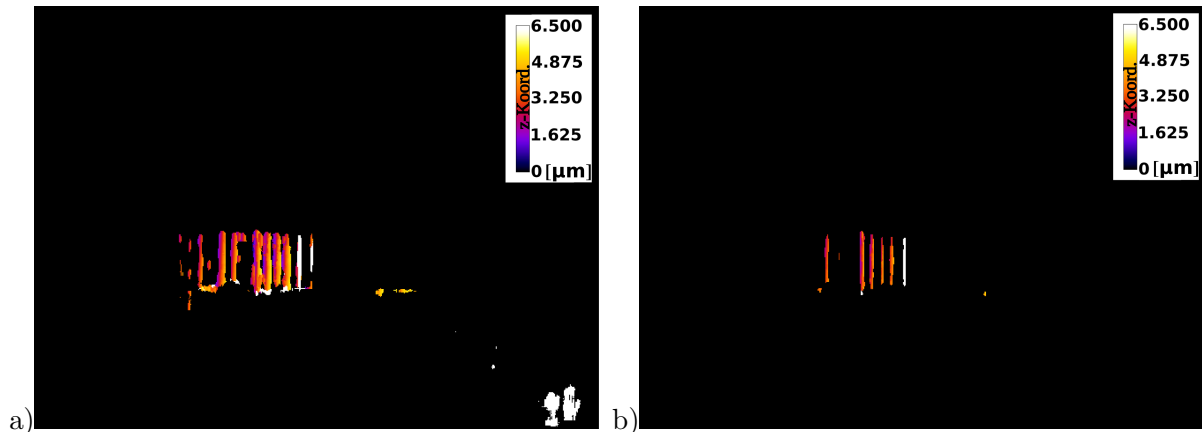


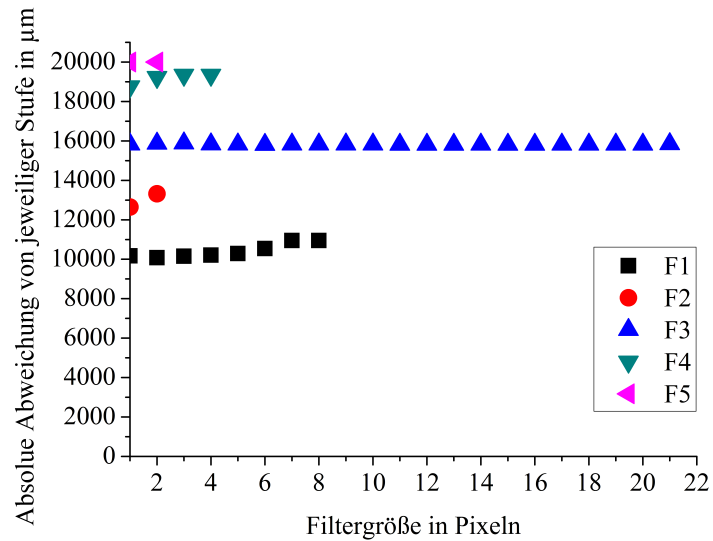
Abbildung 58: Ermittelte Höhenkoordinaten der rekonstruierten Punktwolken in μm (Messung im VIS). a) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,5) b) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,9).

Punkten wurde eine Ausgleichsfläche bestimmt und anschließend die durchschnittlichen Abstände der in den Bereichen F_1 bis F_5 liegenden Punkte zu dieser Fläche und deren Vollständigkeit berechnet. Der Schwellwert des Korrelationskoeffizienten wurde dafür

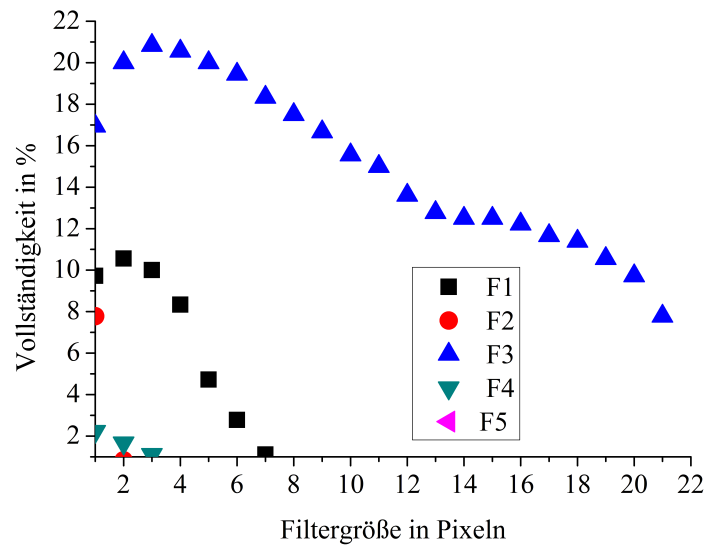
²⁸Die Ausgangsintensität des Lasers wurde im Vergleich zum vorherigen Kapitel nicht verändert, sondern nur die Aufnahmezeit angepasst, bis sich im Histogramm der Grauwerte in den Aufnahmen der Deckgläschen eine typische Speckleverteilung bis zum höchstmöglichen Grauwert einstellte.

wieder auf 0,9 gesetzt. Aus der Herstellerangabe der Plättchendicke und der Annahme, dass die Plättchen dicht aneinander lagen, konnten die Positionen der Stufen im Bezug auf die Ausgleichsfläche bestimmt werden, die sich aus den Punkten aus dem Bereich F_0 ergaben. Die Differenz der durchschnittlichen Abstände der Punkte in den einzelnen Bereichen F_1 bis F_5 zu diesen Stufen und die Vollständigkeit der Rekonstruktionen sind in Abbildung 59 dargestellt. Die Plättchen wurden nur äußerst unvollständig rekonstruiert und die Punktwolken wiesen einen erheblichen Abstand zu den bestimmten Stufenpositionen auf. Eine wesentliche Ursache kann in der Bestimmung der Ausgleichsfläche im Bereich F_0 gelegen haben. Glas wirkt im VIS größtenteils transparent, der Hauptanteil des zurückgeworfenen Lichts stammte von den Grenzflächen zwischen den Plättchen. Da sich im untersuchten Bereich mehrere Schichten von Deckgläschen befanden und so Licht aus verschiedenen (Tiefen-)Ebenen zurückgeworfen wurde, konnte die Ebene nicht zuverlässig als Referenzfläche verwendet werden, und es zeigte sich insgesamt, dass die stereophotogrammetrische Vermessung von Glasoberflächen im VIS mit erheblichen Schwierigkeiten behaftet war. In diesem Abbildungsmaßstab wurden die ausgewählten Ausschnitte nur mit wenigen Stützstellen wiedergegeben. Der Satz aus Deckgläschen wurde ebenfalls bei 266 nm untersucht. Hier wurde, ähnlich wie im sichtbaren Bereich, die Aufnahmezeit auf $0,5\text{ s}$ erhöht und pro Position der Streuscheibe fünf Einzelaufnahmen angefertigt, die nach der Aufnahme summiert worden sind. Die effektive Aufnahmezeit betrug damit etwa $2,5\text{ s}$. Zwei Beispielbilder dieser Aufnahmen sind in Abbildung 60 dargestellt.

Die Aufnahmen wurden vor der Rekonstruktion gefiltert. In Abbildung 61 sind die Höhenkarten einer Rekonstruktion der Szene aus Abbildung 60 dargestellt, bei der die Filtergröße 10 verwendet worden ist. Aus den gefundenen Punktwolken konnte für eine Filtergröße von 10 wiederum eine Ausgleichsfläche für die Punkte aus dem Bereich F_0 bestimmt werden. Die hier errechneten, durchschnittlichen Abstände zu den abgeschätzten "Stufen" der Deckplättchen in μm in Abhängigkeit von der verwendeten Filtergröße sind in Abbildung 62 dargestellt. Im Gegensatz zur Messung bei 532 nm liegen die Abweichungen der bestimmten 3D-Punkte im Mittel unter $500\ \mu\text{m}$ und mit Ausnahme des Bereiches F_5 für Filterstärken größer 9 sogar unter $100\ \mu\text{m}$. Die Vollständigkeit der Rekonstruktionen in den untersuchten Bereichen werden in Abbildung 63 wiedergegeben. Für zunehmende Filtergröße stieg zudem die Vollständigkeit der Rekonstruktionen beinahe auf 100%, und die Standardabweichung von Ausgleichsebenen sank in allen untersuchten Bereichen ebenfalls mit steigender Filtergröße. Die gestuft angeordneten Deckgläschen konnten somit durch den Einsatz eines stereophotogrammetrischen Systems mit UV-Beleuchtung nicht nur vollständiger, sondern auch akkurater und präziser und damit genauer vermessen werden.



a)



b)

Abbildung 59: a) Durchschnittliche Abweichung der rekonstruierten Punkte in den Bereichen F_1 bis F_5 von Stufen, die aus der Position der Ausgleichsebene für den Bereich F_0 und der Herstellerangabe der Plättchendicke von $175 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ geschlossen wurden (Korrelationskoeffizient $> 0,9$). b) Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken in den Bereichen F_1 bis F_5 in % (Korrelationskoeffizient $\geq 0,9$). Alle Werte wurden über die Filtergröße aufgetragen.

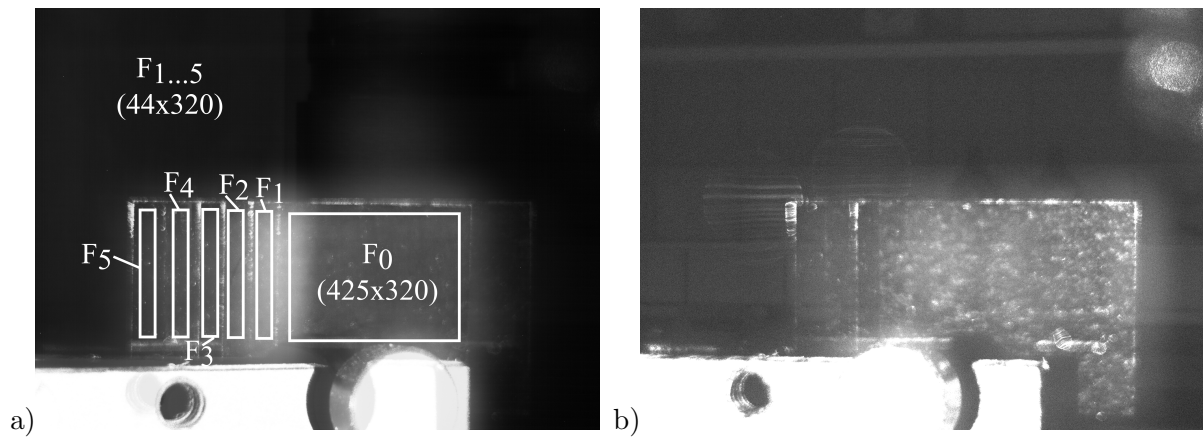


Abbildung 60: Aufnahmen des Satzes von Deckgläschen unter Beleuchtung mit einem Speckle-Muster bei 266 nm . a) Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera. Die für die Auswertung herangezogenen Bereiche sind weiß hervorgehoben und beschriftet. b) Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera.

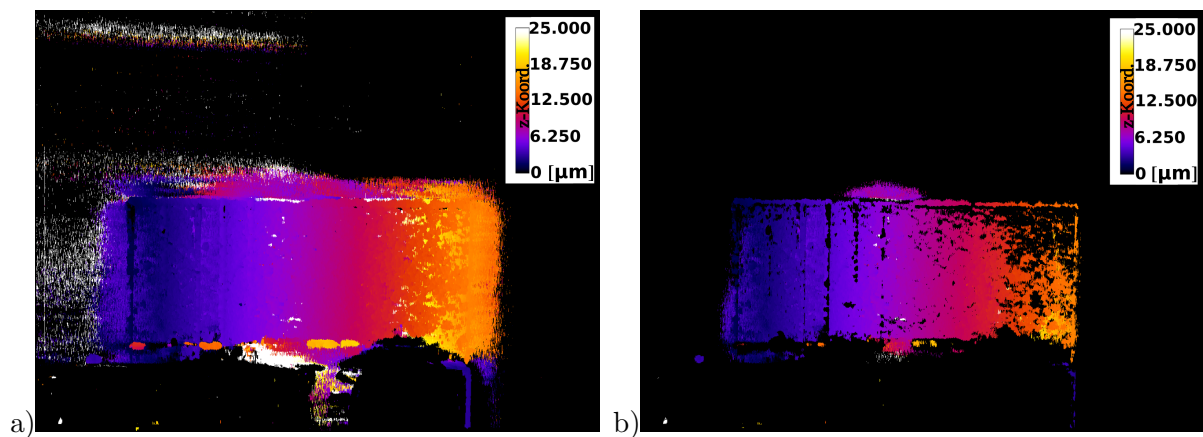


Abbildung 61: Aus den rekonstruierten Punktwolken ermittelte Höhenkoordinaten in μm (Messung im UV). a) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,5) b) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,9).

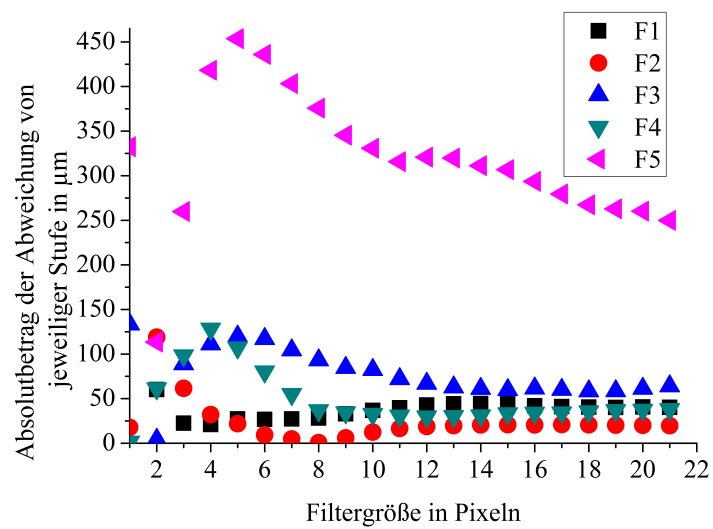


Abbildung 62: Durchschnittliche Abweichung der rekonstruierten Punkte in den Bereichen F_1 bis F_5 von Stufen, die aus der Position der best passenden Ebene für den Bereich F_0 und der Herstellerangabe der Plättchendicke von $175 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ geschlossen wurde (Korrelationskoeffizient $> 0,9$).

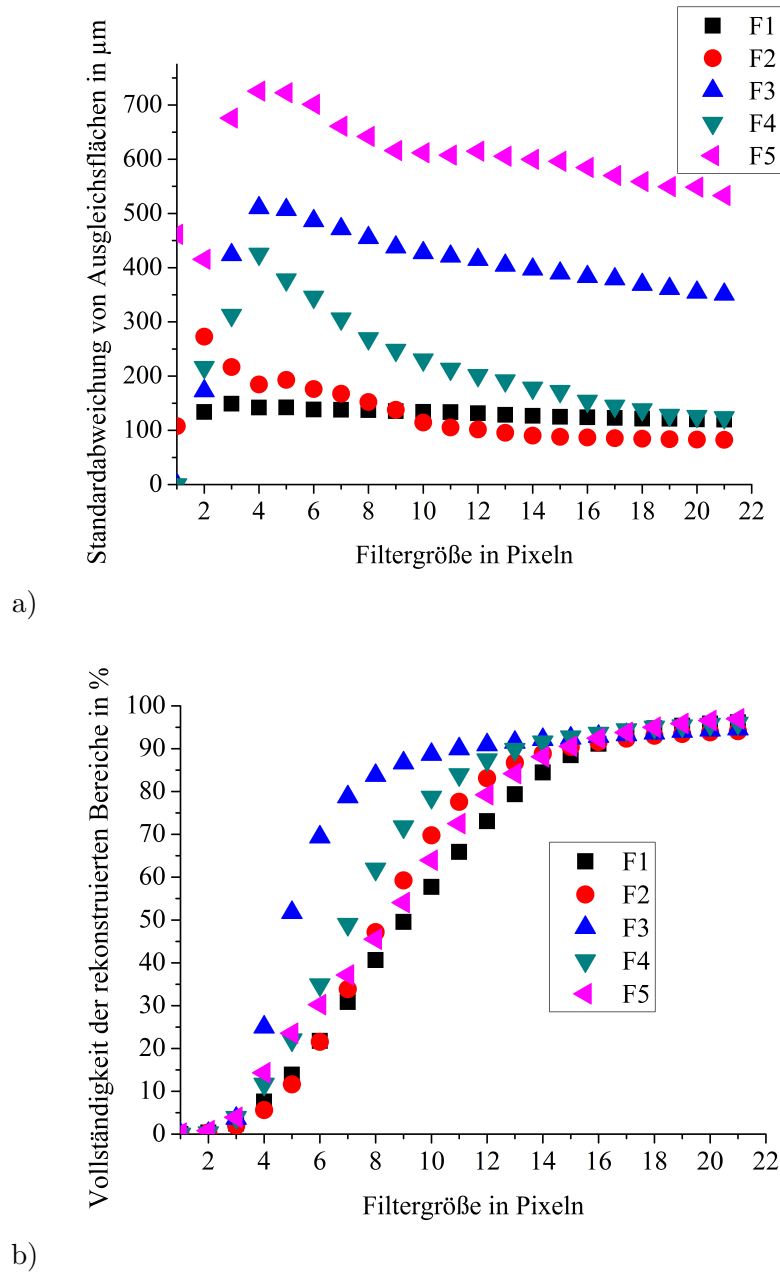


Abbildung 63: a) Standardabweichung der rekonstruierten Punktwolken in den Bereichen F_1 bis F_5 in μm b) Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken in den Bereichen F_1 bis F_5 in % (Korrelationskoeffizient $> 0,9$). Alle Werte wurden über die Filtergröße aufgetragen.

4.3.2 Vermessung einer antireflex-beschichteten Linse

Als Rekonstruktionsobjekt wurde eine antireflex-beschichtete, sphärische Linse verwendet. Die geometrische Berechnung des Krümmungsradius²⁹ aus dem Durchmesser von 32 mm und der Höhe der gekrümmten Oberfläche von $1,8\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ ergab $72\text{ mm} \pm 4\text{ mm}$. Um die Linse bezüglich ihrer Form überhaupt im VIS vermessen zu können, wurde sie mit handelsüblichem butylacetat- und dimethyletherhaltigem Plastiksprühmittel ("RUBBER comp", Hersteller "MASTON") halbseitig vor- und rückseitig besprüht. Dabei wurde die Vorderseite vertikal in einen besprühten und einen unbesprühten Bereich geteilt, während die Rückseite entlang der Horizontalen halbseitig besprüht worden ist (vgl. Abbildung 64).

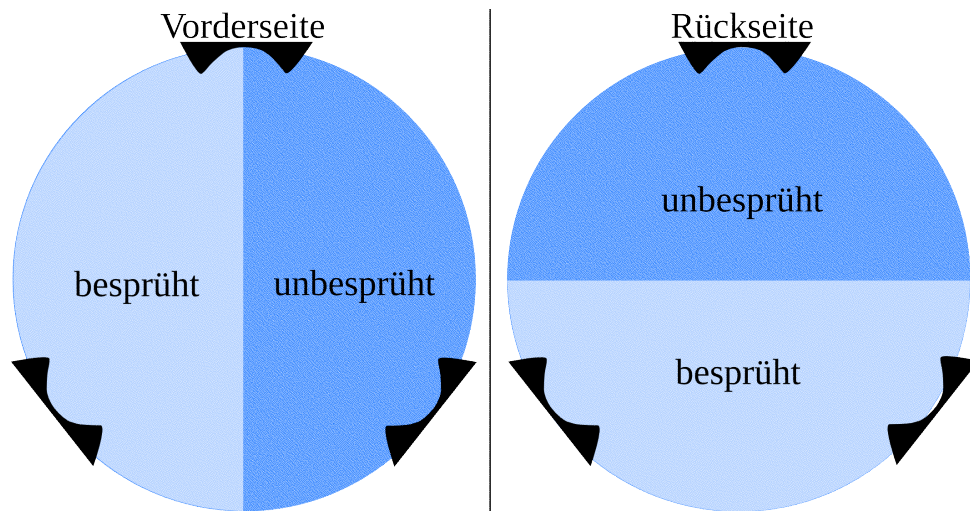


Abbildung 64: Skizze der besprühten und unbesprühten Bereiche der Linse auf der Vor- und Rückseite. Die Halterung der Linse an drei Punkte ist schwarz angedeutet.

So war im VIS auch ein Teil der besprühten Rückseite von vorne zu sehen. Zwei Aufnahmen unter Speckle-Beleuchtung bei 532 nm mit dem in Kapitel 3 (S. 26) vorgestellten Aufbau sind in Abbildung 65 dargestellt. Die mit dem Sprühmittel behandelten Bereiche waren in den Aufnahmen gut von den freien Bereichen zu unterscheiden, die wiederum kaum Licht zu den Detektoren streuten. Eine Ausnahme bildete der Hauptreflex der Beleuchtung, der in der Mitte der Linse zu sehen war. 90 solcher Stereobilder wurden insgesamt aufgezeichnet, gefiltert (eindimensionaler, vertikaler Sinus-Filter) und anschließend rekonstruiert. Die Rekonstruktionen bei der Filtergröße 10 wurden benutzt, um für die Schwellwerte 0,5 und 0,9 die in Abbildung 66 gezeigten Höhenkarten zu erzeugen.

Es ist zu erkennen, dass die besprühten und sichtbaren Teile der Linse gut rekonstruiert werden konnten. Von der transparenten Glasoberfläche wurde allerdings nichts

²⁹Über den Krümmungsradius war zum Zeitpunkt der Messung keine Herstellerangabe bekannt.

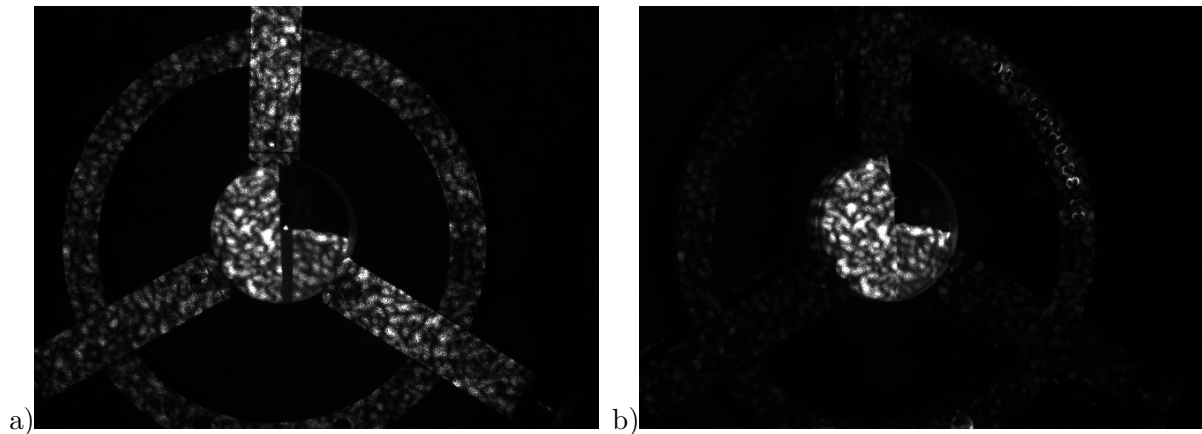


Abbildung 65: Aufnahmen einer halbsseitig besprühten Linse in einer Halterung bei Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im VIS. Auch die Rückseite der Linse wurde halbsseitig besprüht, allerdings um 90° zur Vorderseite gedreht. a) Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera b) Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera. Die Linse wurde von einer Halterung an drei Punkten gefasst.

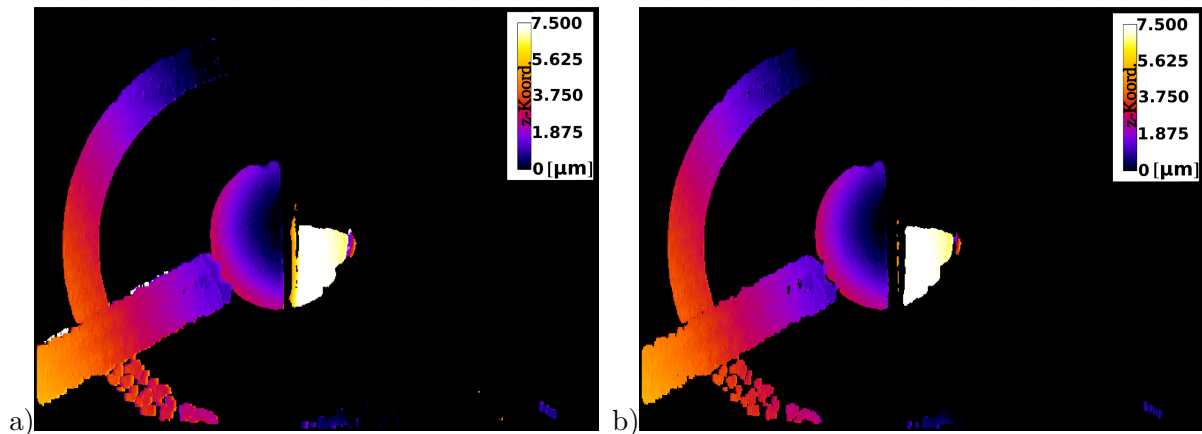


Abbildung 66: Ermittelte Höhenkoordinaten der Rekonstruktion der Linse in μm im VIS. Auch der sichtbare Teil der Rückseite wurde teilweise rekonstruiert. a) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,5) b) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,9).

rekonstruiert, vielmehr wurde der durch die Linse sichtbare rückseitige Bereich wiedergegeben.

Dieselbe Linse wurde erneut mit dem UV-Aufbau bei 266 nm vermessen. Zwei Aufnahmen dieser Messung sind in Abbildung 67 dargestellt. Schon aus den Aufnahmen ist zu erkennen, dass kein Licht von der Rückseite der Linse aufgezeichnet werden konnte. Außerdem war der Hauptreflex der Beleuchtung hier so stark, dass deutlich Bereiche der Linse sowohl der unbesprühten wie der besprühten Seite überbelichtet worden sind. Auch ist eine deutliche Ungleichheit der Durchschnittsintensitäten in beiden Kameraansichten zu beobachten. Nachdem auch in dieser Konstellation 90 Stereoaufnahmen angefertigt wurden, wurden die Bilder wie in den bereits gezeigten Fällen mit verschiedenen Filter-

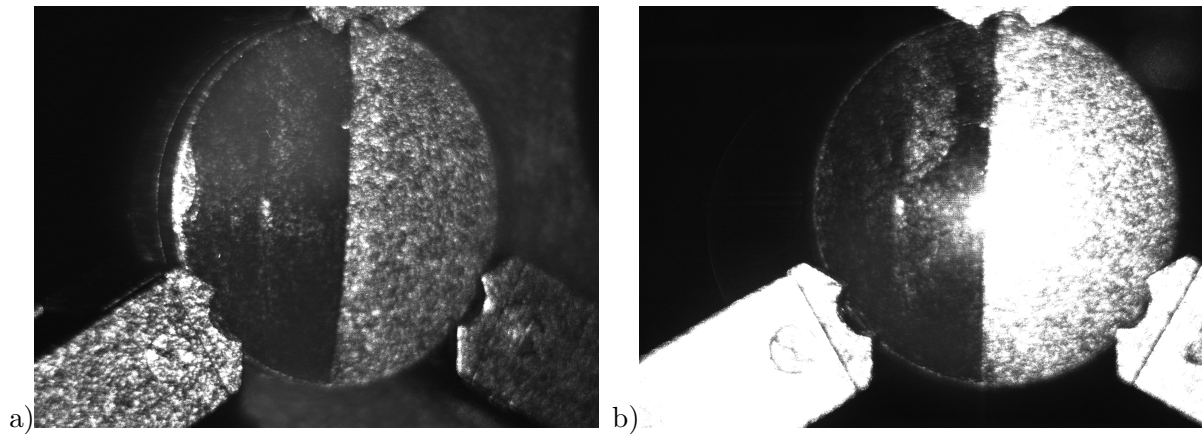


Abbildung 67: Aufnahmen einer halbspeckel besprühten Linse in einer Halterung bei Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im UV. Auch die Rückseite der Linse wurde halbspeckel besprüht, allerdings um 90° zur Vorderseite gedreht. a) Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera b) Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera.

größen bearbeitet und anschließend 3D-Punktwolken mit dem Programm "correlation-expert" berechnet. Für die bei der Filtergröße 10 bestimmten Rekonstruktionen wurden Höhenkarten für die Schwellwerte des Korrelationskoeffizienten 0,5 und 0,9 erstellt, die in Abbildung 68 zu sehen sind. Die Höhenkarten zeigen, dass sowohl die besprühte als auch

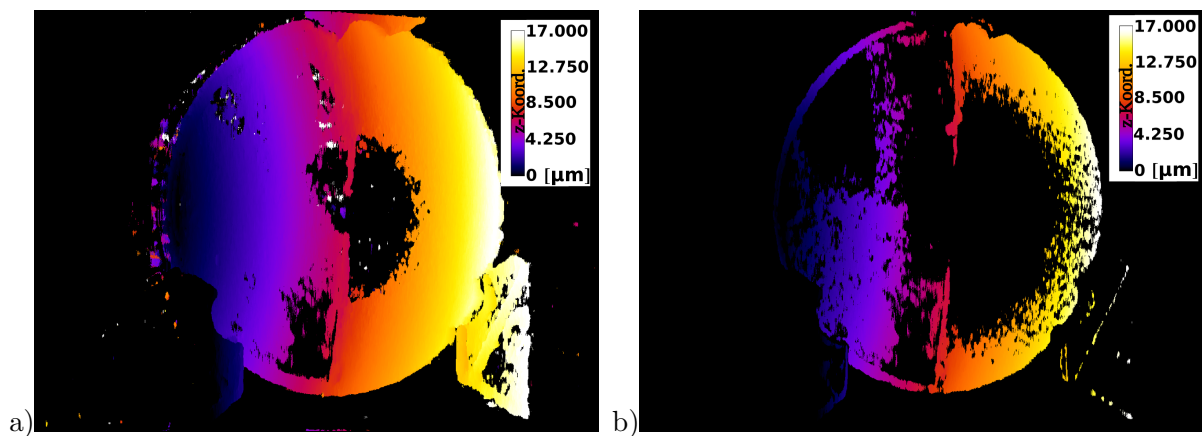


Abbildung 68: Ermittelte Höhenkoordinaten der Linse in μm . a) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,5) b) Höhenkarte (Filterung: 10; Korrelationskoeffizient: 0,9).

die unbesprühte Seite der Linse bei 266 nm und der betrachtete Teil der Halterung aus geläpftem Metall rekonstruiert werden konnte. Der oben erwähnte, stark überbelichtete Bereich im Zentrum der Linsenvorderseite wurde nur äußerst unvollständig rekonstruiert. Um eine zahlenmäßige Bewertung der Rekonstruktionsergebnisse zu ermöglichen, wurden die Radien der numerisch bestimmten Ausgleichskugeln über die Filtergröße in Pixeln aufgetragen und diese in Abbildung 69 dargestellt. Die Ausgleichsradien aller drei dargestellten Rekonstruktionsausschnitte näherten sich mit zunehmender Filtergröße dem Wert

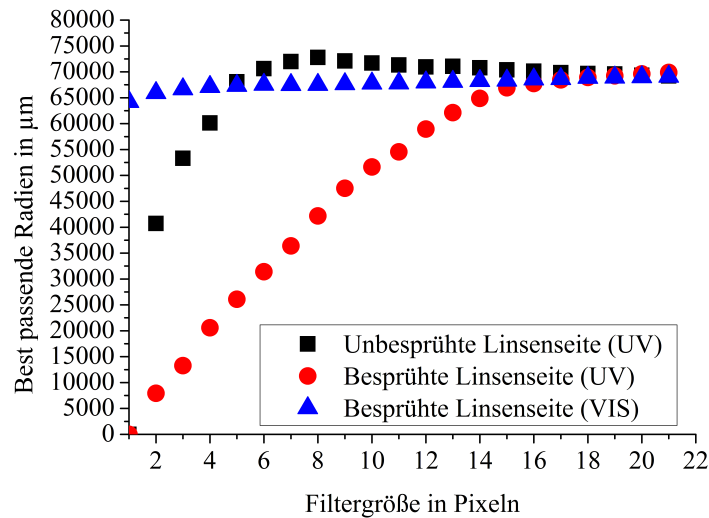
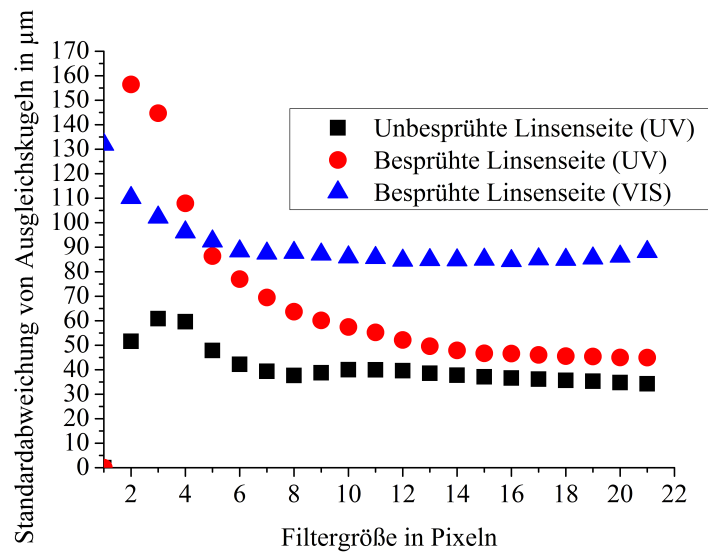
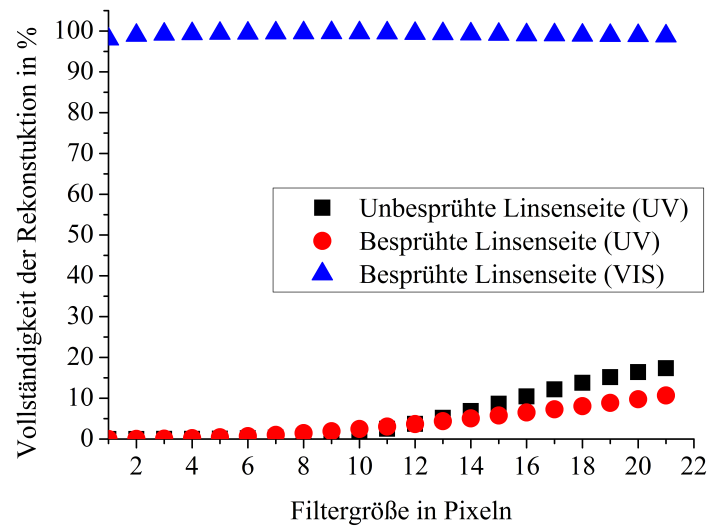


Abbildung 69: Ermittelte Radien der Ausgleichskugeln aus den Rekonstruktionen der Linse in μm aufgetragen über die Filtergröße.

70 mm an. Die Standardabweichung von den Ausgleichskugeln und die Vollständigkeit der Rekonstruktionen wurden in Abhängigkeit der verwendeten Filtergröße in Abbildung 70 aufgetragen. Die Standardabweichung war für die drei Messbereiche durchaus vergleichbar, wobei die Messung im VIS mit zunehmender Filtergröße Werte von $\approx 90 \mu m$ ergab, die Messungen im UV dagegen Werte $< 60 \mu m$. Im Gegensatz dazu hat die Vollständigkeit der 3D-Punktwolken sich deutlich unterschieden, da für die Rekonstruktionen der besprühten Linsenseite im VIS von beinahe vollständigen Rekonstruktionen gesprochen werden konnte, während sowohl die besprühte als auch die unbesprühte Seite des Objektes im UV nur äußerst unvollständig und im besten Fall mit einer Vollständigkeit von 15% rekonstruiert wurden. Die geringe Vollständigkeit der rekonstruierten Punkte ist zum Teil auf die großen überbelichteten Bereiche in den Aufnahmen zurück zu führen. Eine zweite Messung bei verringerter Beleuchtungsintensität oder verringerter Aufnahmezeit könnte hier Abhilfe schaffen. Jedoch würden solche Nachholmessungen zusätzliche Messzeit und experimentelle Anpassungen, wie die Senkung der Beleuchtungsintensität oder der Aufnahmezeit, erfordern. Aus der Abbildung 68 a) ist allerdings zu ersehen, dass der Korrelationskoeffizient von $> 0,9$ vertrauenswürdig rekonstruierte Punkte ausschloss und so die Vollständigkeit verringerte. Letztendlich ist davon auszugehen, dass weder die besprühte noch die unbesprühte Seite der Linse im UV ideal streuten und sich auch dadurch Schwierigkeiten in der Rekonstruktion ergeben haben. Allerdings war es trotzdem möglich, zumindest einen Teil der Linsenoberfläche zu rekonstruieren, der im VIS nicht detektiert werden konnte, und sich für diesen Bereich auch ein gut passender Krümmungs-



a)



b)

Abbildung 70: a) Verlauf der Standardabweichung der rekonstruierten Punktwolken von den Ausgleichskugeln in μm über Filtergröße b) Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken in % (Korrelationskoeffizient: 0,9) aufgetragen über die Filtergröße.

radius bestimmen ließ. In Abbildung 71 ist die Höhenkarte zweier Messungen der Linse bei unterschiedlichen Aufnahmezeiten wiedergegeben. Der Schwellwert des Korrelationskoeffizienten wurde auf 0,4 gesetzt. So ergab sich eine beinahe vollständige Rekonstruktion der Linse.

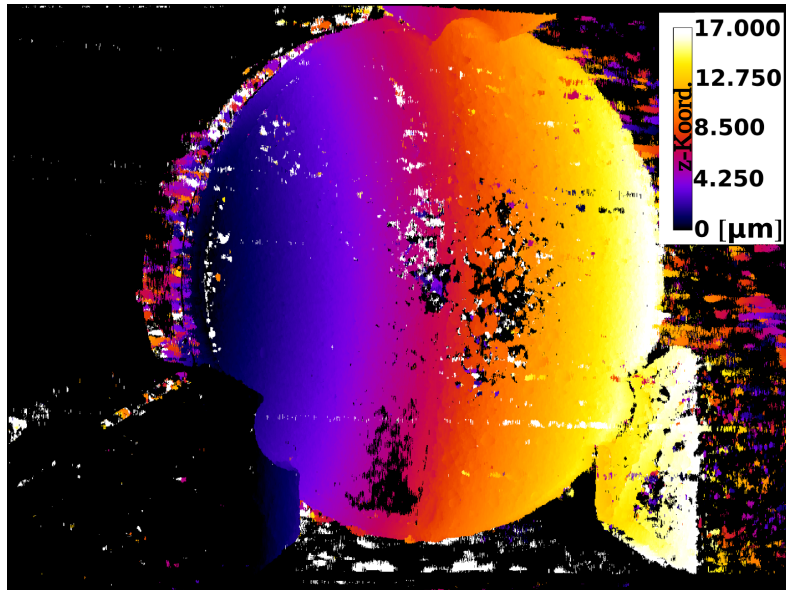


Abbildung 71: Höhenkarte der Rekonstruktion der besprühten Linse durch Beleuchtung mit Speckles bei 266 nm . Hier wurden zwei Sätze von je 90 Aufnahmen verwendet, wobei die Aufnahmezeit der zweiten Messung deutlich reduziert wurde, um den Bereich der Überbelichtung klein zu gestalten. Der Schwellwert des Korrelationskoeffizienten lag hier bei 0,4.

4.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel behandelt die erstmalige Erstellung und Bewertung eines Prototyps zur stereophotogrammetrischen 3D-Vermessung mit aktiver Speckle-Beleuchtung bei einer Wellenlänge von 266 nm . Dazu wurde ein Kalibrierprozess im UV-Bereich unter Zuhilfenahme einer inkohärenten Beleuchtungsquelle bei 254 nm angepasst bzw. entwickelt. Für die aktive Beleuchtung wurden Speckle-Strukturen im UV-Bereich bei 266 nm durch einen Laser mit einer Maximalleistung von 100 mW erzeugt. Es konnte gezeigt werden, dass dieses System mit an die Bildaufnahme anschließender numerischer Filterung senkrecht zu den Epipolarebenen Ebenenabweichungen um $35\text{ }\mu\text{m}$ und Kugelabweichungen um $100\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Vollständigkeit $> 90\%$ realisieren konnte, wenn optisch kooperative Objekte zur Messung herangezogen wurden. Damit war das System in seiner Messqualität vergleichbar zu dem stereophotogrammetrischen Systemen im VIS, das in Kapitel 3 (S. 26) verwendet wurde. In der Folge wurden verschiedene Objekte mit im sichtbaren Bereich des Lichtes optisch unkooperativen Oberflächen vermessen und diese Messungen mit solchen, im VIS angefertigten Messungen, verglichen. Zuerst wurde ein Freiformobjekt aus Edelstahl (Schaumlöffel) aufgenommen. Dieses konnte unter Verwendung von Filtern vollständiger und präziser im UV-Bereich als im VIS vermessen werden. Die Standardabweichung von Ausgleichsflächen war kleiner als $150\text{ }\mu\text{m}$, während die Vollständigkeit für einen beispielhaften Teilbereich auf über 65% und für den gesamten Rekonstruktionsbereich auf über

40% stieg.

Ferner wurden gestuft angeordnete Deckgläschen untersucht, die jeweils, nach Herstellerangabe, eine Dicke von $175 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ besaßen. Aufgrund des schwachen Signals, das von den Detektoren von diesem Objekt aufgefangen wurde, mussten die Aufnahmezeiten sowohl im VIS wie im UV um ein Vielfaches erhöht werden. Auch wurden hier jeweils Sätze von 90 Stereoaufnahmen angefertigt. Die Messungen bei 532 nm ergaben nur geringe Werte für die Vollständigkeit der Rekonstruktionen und um Größenordnungen verschiedene durchschnittliche Abstände der Punktwolken von einer Ausgleichsfläche. Im Gegensatz dazu wurden die Punktwolken mit zunehmender Filterung vollständiger rekonstruiert und auch die durchschnittlichen Abstände der "Stufen" unterschieden sich, bis auf eine, nur um maximal $75 \mu\text{m}$ von der Herstellerangabe. Die Standardabweichung der Punktwolken war, mit einer Ausnahme, kleiner als $500 \mu\text{m}$, drei der fünf untersuchten Bereiche konnten dahingehend sogar mit einem Wert $< 150 \mu\text{m}$ bestimmt werden.

Zuletzt wurde eine antireflex-beschichtete, sphärische Linse mit einem Durchmesser von 32 mm und einem Krümmungsradius von $72 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$ untersucht. Die Linse wurde beidseitig und jeweils halbseitig besprüht. Im VIS lieferte die besprühte Seite vollständige Rekonstruktionen während im unbesprühten Teil der Linse keine 3D-Punkte rekonstruiert werden konnten. Die im UV angefertigten Aufnahmen waren teilweise überbelichtet und lieferten daher unvollständige Rekonstruktionen. Allerdings ermöglichte diese Überbelichtung auch ein erhöhtes Signal aus Bereichen, von denen nur wenig Licht zurückgestreut wurde. Die Messungen lieferten im Vergleich zur Untersuchung im VIS im besprühten Teil des Objektes deutlich unvollständigere Rekonstruktionen, jedoch konnten auch Bereiche aus antireflex-beschichtetem Glas vermessen werden, für die im VIS keine 3D-Punkte gefunden werden konnten. Die Krümmungsradien sowie die Standardabweichung der Rekonstruktionen dieser Ausgleichskugeln waren im VIS und im UV durchaus vergleichbar und lagen nahe an dem unabhängig bestimmten Wert von $72 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$.

5 Erzeugung wiederholbarer Speckles

3D-Messsysteme werden nicht nur in wachsenden Stückzahlen, sondern auch zunehmend vielen Anwendungsfeldern genutzt. Jedes Anwendungsfeld stellt dabei andere Anforderungen an das verwendete Verfahren und kann beispielsweise auf eine hohe Aufnahmezeit [14] oder eine möglichst kleine Bauform [62] angewiesen sein. In vielen Fällen ist es sinnvoll, nur eine Kamera zu verwenden, da so ein Großteil der Kosten und ein nicht unerheblicher Teil der Baugröße vermieden werden kann. Eine wesentliche Voraussetzung bei der Verwendung einer aktiven Beleuchtung und nur eines Detektors zur 3D-Formvermessung ist dabei die strenge Wiederholbarkeit der Muster [33, 34, 63–65].

Am Institut für Angewandte Optik und Biophysik wurde maßgeblich durch E. Wong in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Feinmechanik und Optik (IOF) Jena ein Konzept entwickelt, mit dem auch Multiaperturprojektoren genutzt werden können, um mit nur einem Detektor 3D-Messungen durchzuführen [35, 66–68]. Das grundlegende Konzept dazu wurde im Abschnitt 2.1.4 (S. 12) vorgestellt.

Es wurde eine Methode [102] entwickelt, um auch objektive Speckles sequentiell und streng wiederholbar zu generieren. Durch die Verwendung des von Wong et al. entwickelten Konzepts konnten so Oberflächen dreidimensional vermessen werden, wobei wiederholbare, objektive Speckles und nur eine Kamera verwendet wurden. Im folgenden Unterkapitel wird dazu der erste Prototyp eines derartigen Messsystems vorgestellt, wobei auf Teile der in [103] publizierten Ergebnisse zurückgegriffen wird. Dabei wurde ein Speckle-Projektor erstellt, der wiederholbar dieselben Muster erzeugen konnte, sodass der Messbereich volumenelementweise (Voxel) kalibriert und 3D-Rekonstruktionen erstellt werden konnten. Im zweiten Unterkapitel wird der Prototyp eines miniaturisierten Aufbaus zur Erzeugung wiederholbarer, objektiver Speckles zur 3D-Messung mit nur einer Kamera vorgestellt und der Machbarkeitsnachweis einer Miniaturisierung erbracht. Anschließend werden die Ergebnisse dieses Kapitels kurz zusammengefasst.

5.1 Prototyp des Projektors wiederholbarer Speckles

Jedes spezifische Muster objektiver Speckles wird durch die individuelle Streuung, also die statistische Variation der Wellenfront, generiert. Um dieses Muster wiederherzustellen, muss eine gleiche Wellenfront dieselbe Streuung erfahren. Das im Patentantrag [102] festgehaltene Verfahren beinhaltet die Verwendung von Lichtleitern, hier Monomodenglasfasern, deren Enden an bzw. in einem kleinen Abstand vor einer Streuscheibe fixiert wurden. Durch jede Faser wurde ein eigenes Speckle-Muster erzeugt. Um den Wechsel zwischen den Fasern und eine effektive Einkopplung zu ermöglichen, wurde ein Galvanometer-Spiegelsystem verwendet. Der Strahl wurde dazu durch eine Linse über die beiden Spiegel des Systems auf das Bündel der offenen Monomodenglasfasern fokussiert. Durch die Bewegung der Spiegel konnten verschiedene Faserenden angesteuert und so verschiedene, aber wiederholbare Speckle-Muster erzeugt werden. Es wurde eine Kamera (AVT-Pike F-032b, Pixelabstand: $7,4 \mu\text{m}$) mit einem Objektiv der Firma *Cosmicar* (Brennweite: 25 mm , $F_{\#}:1,8$) für die Messungen eingesetzt. Die Laserquelle bildete der in Kapitel 3 verwendete Laser des Typs MGL-F-532-2W. Die Komponenten des Messsystems sind im Anhang in Tabelle 3 (S. 109) aufgelistet. Der konzeptionelle Aufbau ist in Abbildung 72 dargestellt. Es wurden 20 Fasern mit der Streuscheibe verbunden, wobei Glaskeile verwendet wurden, um die Fasern stabil zu führen. Ferner wurde zur Stabilisierung ein zweikomponentiges

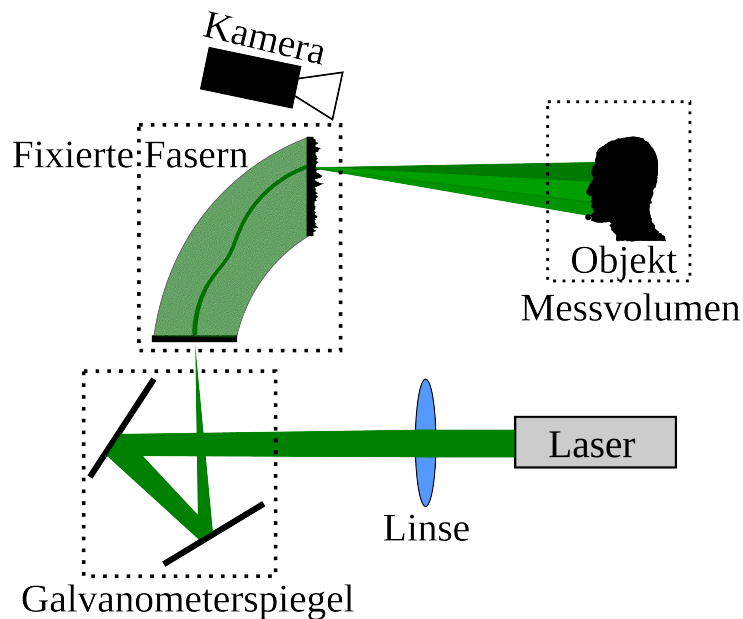


Abbildung 72: Messaufbau zur Erzeugung wiederholbarer Speckles. Über einen Galvanometerspiegel wurde jeweils eine Monomodens-Faser angesteuert. Diese beleuchtete die Streuscheibe wiederholbar an denselben Stellen und erzeugte so ein objektives Speckle-Muster. Durch jede Faser konnte auf diese Weise wiederholbar ein Muster generiert werden.

Epoxidharz eingesetzt, mit dem die Zwischenräume zwischen den Glasblöcken und den Fasern ausgefüllt wurden. In Abbildung 73 a) und b) sind Aufnahmen des Projektions-systems zu sehen. Das von Wong et al. verwendete Verfahren wurde umgesetzt, indem ein

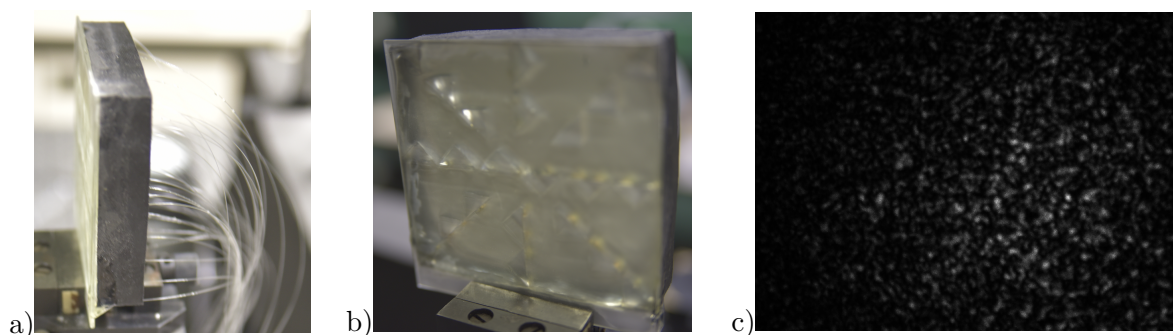


Abbildung 73: a) Streuscheibe und angeschlossene Fasern von der Seite
 b) Streuscheibe und angeschlossene Fasern von vorn
 c) Einzelaufnahme eines Speckle-Musters, das auf die Ebene projiziert wurde, über die das Volumen zur Messung mit nur einer Kamera kalibriert wurde.

Lineartisch mit einer Schrittweite von 1 mm eine Ebene durch das Messvolumen verschob. An jeder Position wurden die 20 objektiven Speckle-Muster als Bild aufgenommen, was in der Konsequenz die Kalibrierung der Voxel ermöglichte. Eine Aufnahme aus diesem Kalibriervorgang ist in Abbildung 73 c) dargestellt. Die für die Kalibrierung verwendete Ebene wurde in eine Position gebracht, die nicht zur Kalibrierung verwendet wurde, und

dort mit 6 der 20 möglichen Muster vermessen. Der Umschaltvorgang von einer Faser zur anderen war durch die Spiegelkonstruktion zwar präzise möglich, jedoch auch zeitaufwendig, sodass die Aufnahme- und Umschaltzeiten etwa 1 Sekunde in Anspruch nahmen. Der Schwellwert des Korrelationskoeffizienten wurde für diese und für alle Messungen mit den vorgestellten Ein-Kamerasystemen aus Erfahrungen mit dem *MAAP*-Systemen heraus auf 0,99 gesetzt. Zum Vergleich wurde die Ebene auch mit einem stereophotogrammetrischen System (kurz: Stereosystem) und je 30 Aufnahmen mit kohärenten, objektiven Speckles und inkohärenten bandbegrenzten Mustern vermessen (Schwellwert des Korrelationskoeffizienten = 0,9). Die Abweichungen von Ausgleichsebenen sind in Abbildung 74 dargestellt. Die Standardabweichung von der Ausgleichsfläche für das Ein-Kamerasystem

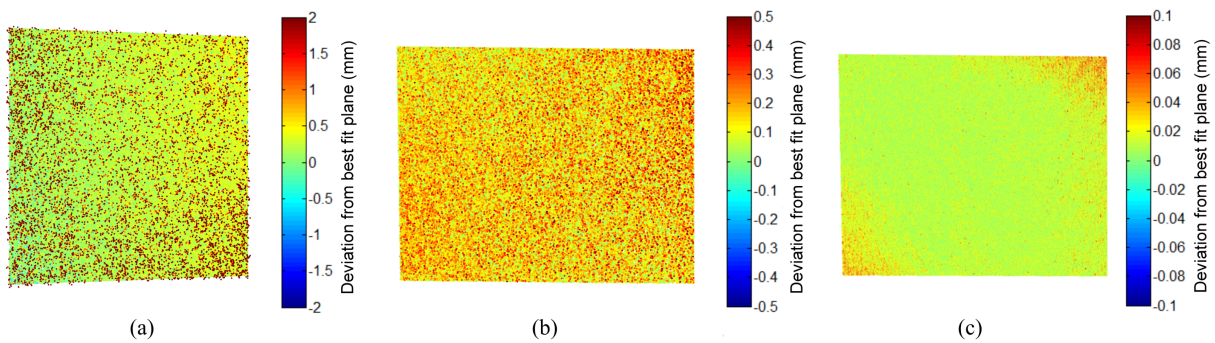


Abbildung 74: Punktweise Abweichung der rekonstruierten Punktwolke einer Ebene von einer Ausgleichsebene unter Verwendung des Projektors wiederholbarer Speckles (a), eines Stereosystems mit Speckles (b) und eines Stereosystems mit bandbegrenzten Mustern (c) in Falschfarben. Diese Darstellung wurde unter [103] veröffentlicht.

lag bei $1,7 \text{ mm}$, während das Stereosystem für 30 objektive Speckle-Muster eine Rekonstruktion mit einer Standardabweichung von $110 \mu\text{m}$ ermöglichte. Die Rekonstruktion der Ebene durch die Beleuchtung mit bandbegrenzten Mustern lieferte eine Standardabweichung von $10 \mu\text{m}$. Alle Rekonstruktionen waren annähernd vollständig. Bei diesem ersten Laboraufbau zur 3D-Messung mit sequentiell wiederholbaren objektiven Speckles wurden recht große Werte für die Standardabweichung bestimmt. Dies lässt sich nur durch weitere Untersuchungen zur Optimierung der Parameter (der idealen Strukturgröße, dem Speckle-Rauschen, dem Winkel zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung) verbessern. Das Ziel war jedoch der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Messprinzips. Eine mit Kreidepulver bestrichene Skulptur einer Elster diente als Rekonstruktionsobjekt. Die gezeigten 3D-Punktwolken wurde mit dem von E. Wong entwickelten Verfahren von E. Wong erzeugt. Die Erstellung des Projektors wurde von D. Weigel in Zusammenarbeit mit dem Autor dieser Arbeit und die Aufbereitung der Daten vom Autor durchgeführt. In Abbildung 75 werden eine Photographie der Skulptur sowie die gefundenen z -Koordinaten in μm bei 6 und 20 verwendeten Mustern wiedergegeben. Durch die Verwendung von meh-

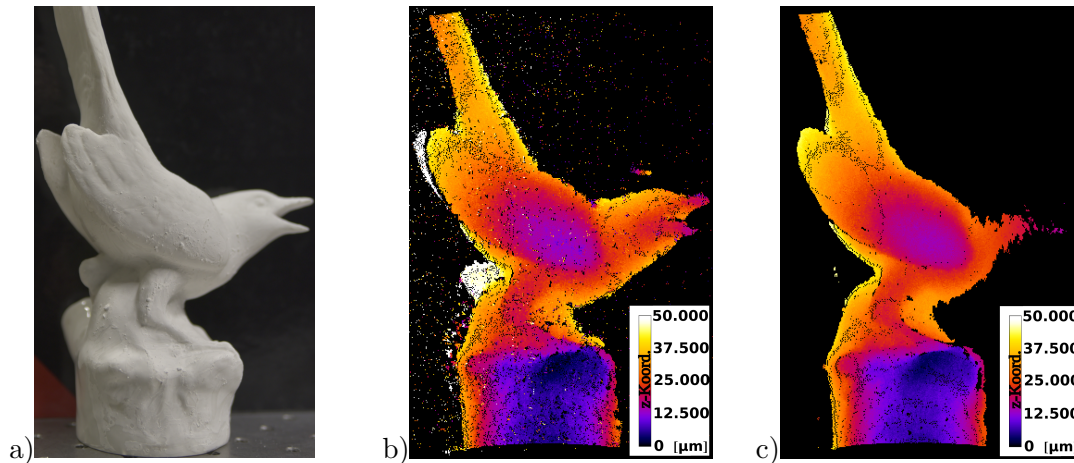


Abbildung 75: a) Photographie des Objektes (Figur: Elster), b) Höhenkarte des Objektes aus der Rekonstruktion mit nur einer Kamera unter Verwendung von 6 Mustern, c) Höhenkarte aus der Rekonstruktion unter Verwendung von 20 Mustern.

renen Mustern wurde die Zahl an Ausreißern und abseits liegenden Punkten reduziert. Gleichzeitig sank die Menge an rekonstruierten 3D-Punkten insgesamt.

5.2 Miniaturisierung

Das im Unterkapitel 5.1 vorgestellte Konzept bot die Option der Verkleinerung des Messsystems, da für die Erzeugung der Speckle-Strukturen prinzipiell nur Fasern und Flächen mit dem Durchmesser D des Beleuchtungskegels (vgl. Gl. 2.21 S. 20) nötig waren. Die maßgebliche Baugröße eines derartigen Systems ist damit im Wesentlichen durch die Kamera bzw. den Sensor begrenzt und nicht durch das Projektionssystem. Das Konzept eines Aufbaus zur Miniaturisierung der 3D-Messung mit nur einer Kamera und einem Projektor wiederholbarer Speckles ist in Abbildung 76 dargestellt. Das Licht eines fasergekoppelten Lasers (Typ: IOP 0532L-13B-NI-AT-NF, "Matchbox2", Hersteller: Integrated Optics, 100 mW, $\lambda = 532 \text{ nm}$, CW) wurde dazu durch einen optischen Schalter (Typ: FO Switch eol 1x12 VIS HP, Hersteller: LEONI) in verschiedene Fasern geführt. Diese waren jeweils fest mit einer Streuscheibe verbunden bzw. fest mit einer Konstruktion, mit der auch die Streuscheibe fixiert war. Je nachdem welche Faser angesteuert wurde, konnte so ein eigenes Speckle-Muster erzeugt werden. Die Kamera (Typ: XIMEA MU9PM-MH, CMOS, Hersteller: XIMEA; Objektiv: Edmund Optics 7,2 mm FL f/1.8 Red M12, Brennweite: 7,2 mm, $F_{\#}$: 1,8) war in der Mitte der ringförmig angelegten Fasern auf Höhe der Streuscheibe im Messkopf platziert. Die Streuscheibe selbst besaß ein kreisförmiges Loch in der Mitte, sodass die Kamera einen unverstellten Blick auf das Messvolumen hatte, das von den Speckle-Mustern beleuchtet wurde. Über einen Computer wurde dabei sowohl die Kamera als auch der Faserschalter und der Laser kontrolliert.

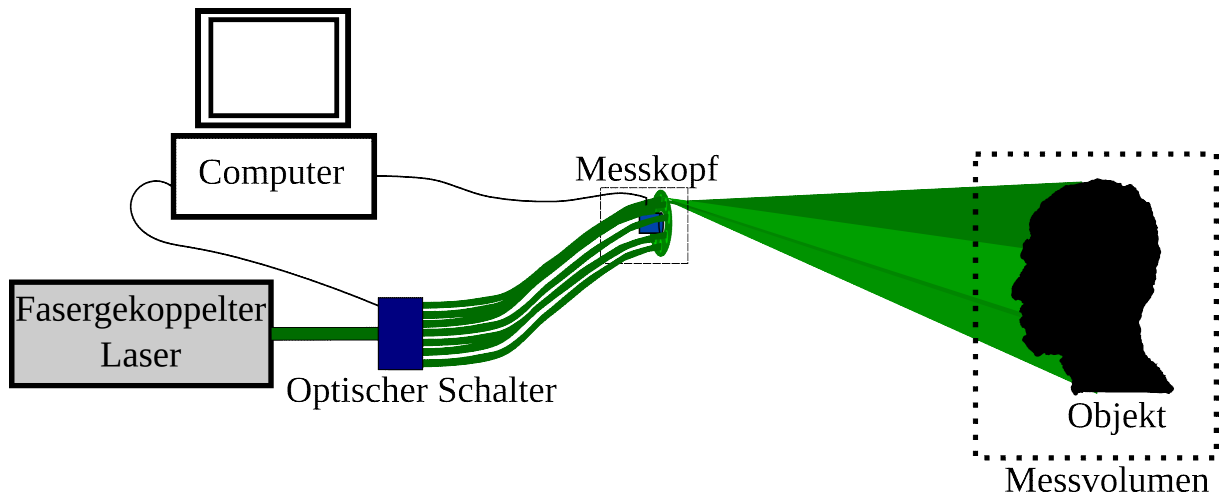


Abbildung 76: Skizze des miniaturisierten Aufbaus zur 3D-Messung mit wiederholbaren, objektiven Speckles. Im Messkopf sind sowohl die Kamera als auch die Projektionszentren untergebracht. Der Messkopf wird in Abbildung 77 a) vergrößert wiedergegeben.

Die Spezifikationen des zum Zweck der 3D-Messung mit wiederholbaren Speckles konzipierten, miniaturisierten Aufbaus sind in Tabelle 4 (S. 110 im Anhang beschrieben. Das

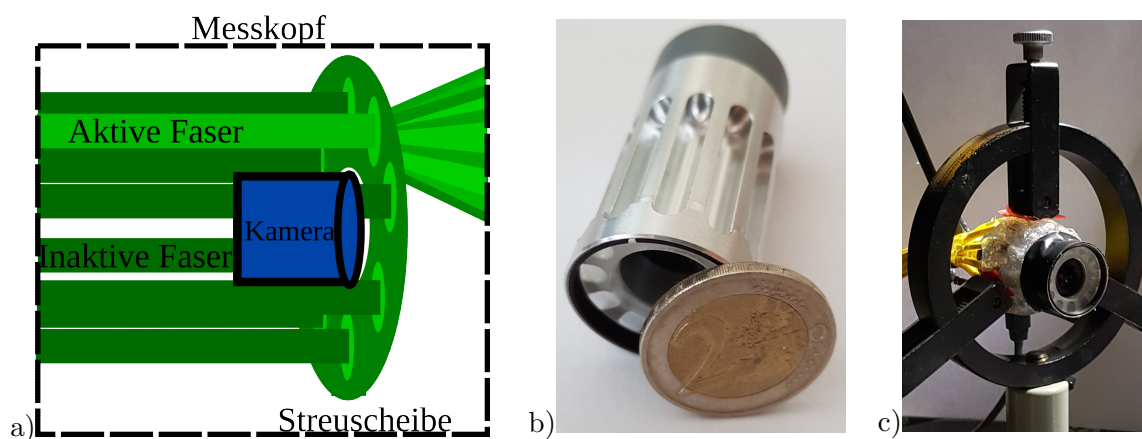


Abbildung 77: a) Skizze des Messkopfes mit einer zur Beleuchtung verwendeten („aktiven“) Faser, b) Photographie des Messkopfes ohne Fasern mit einem 2€-Stück als Größenvergleich, c) Bild des Messkopfes mit angeschlossenen Fasern in einer Dreipunkthalterung.

zentrale Bauelement bildete dabei der Messkopf (Abbildung 77 a)), in den sowohl die Kamera integriert als auch die Fasern mit der Streuscheibe verbunden werden mussten. Der in Abbildung 77 b) gezeigte Prototyp der Halterung ohne Fasern war eine Sonderanfertigung der wissenschaftlichen Werkstätten (M2) der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der FSU Jena und besaß einen Durchmesser von 2,5 cm an der breitesten Stelle. Zum Vergleich ist dazu eine 2€-Münze abgebildet. In Abbildung 77 c) ist der Messkopf mit angeschlossenen Fasern und Kamera in einer Dreipunkthalterung zu sehen.

Die Umschaltfrequenz des verwendeten Faserschalters lag nach Herstellerangaben zwar

bei 5 *ms*, diese konnte jedoch im Experiment nicht bestätigt werden. Stattdessen wurden Aufnahme- und Umschaltzeiten von etwa 1 *s* beobachtet. Ein Freiformobjekt, in diesem Fall eine Miniaturbüste des Dichters Johann Wolfgang von Goethe, wurde vermessen. Eine Photographie des Objektes, eine Beispielaufnahme und ein Bild der Rekonstruktion sind in Abbildung 78 a), b) bzw. c) dargestellt. Diese Umsetzung des Prinzips war noch

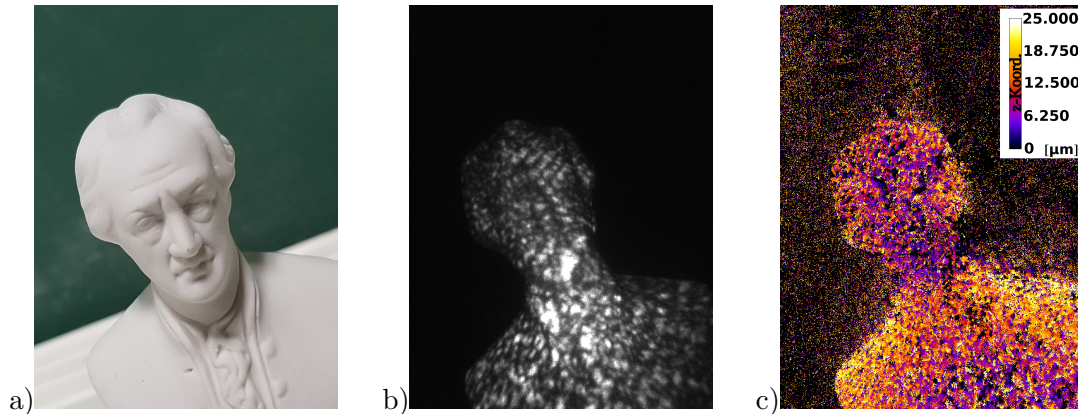


Abbildung 78: a) Photographie der Büste des Dichters Johann Wolfgang von Goethe, b) Einzelaufnahme der Büste unter Speckle-Beleuchtung, c) Höhenkarte der 3D-Rekonstruktion (Angaben in μm).

weit entfernt vom Stand der Technik anderer optischer 3D-Messverfahren im Bezug auf Präzision und Messgeschwindigkeit, allerdings wurde sie an dieser Stelle nach Wissen des Autors erstmalig erfolgreich miniaturisiert realisiert. Der Vergleich zur theoretisch optimalen Präzision der Lasertriangulation (2.2) lieferte einen Wert von $\frac{1}{2\pi} 98 \mu\text{m}$. Der geringe "Basisabstand", der Abstand zwischen Kamerazentrum und Projektionszentren, könnte die Ursache für die geringe hier realisierte Präzision gewesen sein, doch auch die geringe Zahl an objektiven Speckle-Mustern und wahrscheinlich eine zu kleine Ortsfrequenz der Muster für die 3D-Messung mit nur einer Kamera und aktiver Beleuchtung könnte dazu beigetragen haben. Durch die Verwendung mehrerer oder optimierter Muster, z.B. im Bezug auf ihre Ortsfrequenz, und eine Verbesserung der Projektionstechnik könnten sich diese Rückstände aber reduzieren lassen.

5.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Methode vorgestellt, wiederholbar gleiche Speckle-Muster zu erzeugen, sodass sie für die 3D-Messmethode nach Wong et al. [35] eingesetzt werden konnten. Die Wiederholungsmethode selbst war dabei in ihrer Geschwindigkeit nur vom Wechselmechanismus abhängig [102], konnte hier allerdings nur mit Aufnahme- und Umschaltzeiten von etwa 1 *s* umgesetzt werden [103]. Dabei wurde zuerst ein Projektor wiederholbarer Speckles unter Verwendung eines Galvanometerspiegelsystems erstellt.

Dieser ermöglichte die Projektion von bis zu 20 für die 3D-Messung geeigneten Mustern. Es konnte eine Standardabweichung von $1,7\text{ mm}$ für die Ebenenrekonstruktion nachgewiesen werden, wobei dieser Wert sich um zwei Größenordnungen von den Werten etablierter stereophotogrammetrischer Methoden unterschied. Bei diesem ersten Prototypen war wahrscheinlich die geringe Zahl an Mustern (6 bzw. 20) und deren große Ortsfrequenz für diese Differenz verantwortlich. Es wurden keine Untersuchungen zum Einfluss der lateralen Größe der objektiven Speckles auf den Rekonstruktionsprozess bei nur einer Kamera angefertigt. Trotzdem konnte die Form einer dreidimensionalen Freiformoberfläche rekonstruiert und so der Machbarkeitsnachweis erbracht werden.

Darüberhinaus wurde ein Aufbau zur Erzeugung wiederholbarer Speckles zur 3D-Messung miniaturisiert ausgeführt. Der Durchmesser des Messkopfes, in dem sowohl die Beleuchtungszentren als auch die Kamera untergebracht wurden, war dabei kleiner als 3 cm . Die mit diesem Aufbau und der in [35] beschriebenen Technik erzeugten 3D-Rekonstruktionen lieferten allerdings wesentlich stärker verrauschte Rekonstruktionen als schon die im ersten Abschnitt dieses Kapitels dargestellten Messungen.

Insgesamt konnte eine neue 3D-Messmethode experimentell validiert und auch die Möglichkeit der Miniaturisierung prinzipiell vorgestellt werden. Die Präzision und Vollständigkeit sollten in weiteren Untersuchungen verbessert werden, indem die Größe der objektiven Speckles angepasst oder auch das Mustererzeugungskonzept variiert wird. Zukünftig könnten auch andere Muster als Speckles Verwendung finden, wie zum Beispiel Streifenmuster oder bandbegrenzte Muster, und diese könnten zur Verbesserung der Rekonstruktionseigenschaften beitragen. Auch könnten inkohärente Quellen verwendet und zum Beispiel Breitbandquellen oder Weißlichtlaser zum Einsatz gebracht werden, wobei wiederum andere Muster und Mustererzeugungsverfahren, wie beispielsweise Schattenwurfverfahren, genutzt werden müssten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Weiterentwicklung der auf kohärenten Beleuchtungsstrukturen, sogenannten objektiven Speckles, basierenden 3D-Vermessung. Diese Muster besitzen einen guten Kontrast über einen großen Raumbereich, eine hohe Lichtintensität und ermöglichen die Verwendung von Spektralfiltern, um störendes Umgebungslicht auszublenken. Allerdings entsteht bei der Abbildung kohärent beleuchteter Flächen ein kohärentes Rauschen, sogenannte subjektive Speckles, das eine geringere Vollständigkeit bzw. höhere Standardabweichung von 3D-Rekonstruktionen verursacht. Um die speckle-basierte 3D-Messung weiterzuentwickeln, wurden experimentelle und numerische Filtermethoden untersucht, die das Rauschen reduzierten und dadurch die Rekonstruktionsqualität verbessern konnten. Das Verfahren wurde außerdem in den ultravioletten Bereich elektromagnetischer Strahlung übertragen, sodass auch unkooperative Oberflächen, also Oberflächen, die im sichtbaren Bereich eine starke gerichtete Reflektion oder Transparenz aufwiesen, vermessen werden konnten. Darüberhinaus wurde ein Konzept zur sequentiellen Wiederholung objektiver Speckle-Muster erstellt, das es erstmalig ermöglichte, ein 3D-Messsystem mit nur einer Kamera und diesen Mustern als Beleuchtung zu realisieren und dieses Verfahren anschließend zu miniaturisieren.

Nach einem Einleitungskapitel wurde die kontaktlose, stereophotogrammetrische 3D-Vermessung mit aktiver Beleuchtung beschrieben, wobei neben der Korrelationssuche ein besonderes Augenmerk auf die sich aus dem Grundprinzip der Triangulation ergebende Epipolargeometrie gelegt wurde. Ferner wurden die Grundzüge einer neuen Methode nach Wong et al. dargelegt, nach der 3D-Rekonstruktionen von Oberflächen durch die Beobachtung mit nur einer Kamera und die Beleuchtung durch ein Multi-Apertur-System erzeugt werden konnten. Dafür war die strenge Wiederholbarkeit der verwendeten Muster eine Grundvoraussetzung. Im zweiten Teil der Grundlagen wurde dann das sich aus der Kohärenz elektromagnetischer Strahlung ergebende Phänomen der Speckles beschrieben. Dabei wurden sowohl das Zustandekommen der Muster selbst als auch ihre räumliche Verteilung und Reduktionsmöglichkeiten ihres Kontrasts erläutert.

Im dritten Kapitel wurden Methoden zur Reduktion des kohärenten Rauschens (subjektive Speckles) angewendet. Die erste Methode bestand in der periodischen Bewegung von Spiegeln, über die die Kameras das Messvolumen erfassten. Diese Bewegung konnte in vertikaler oder horizontaler Richtung erfolgen und senkte den Kontrast in Summenbildern von 300 Einzelaufnahmen objektiver Speckles von 0,166 auf 0,115 für die maximale Bewegungsamplitude. Gleichzeitig konnte die Standardabweichung der aus je 30 Stereoaufnahmen rekonstruierten Punktwolken einer Ebene und einer Kugel um bis zu 20,9% bzw. 8,9% verringert werden. Die Vollständigkeit blieb dabei zwischen 95% und 99%.

Es konnte beobachtet werden, dass die vertikal orientierte Filterung stärker ausgeprägte Minima der Standardabweichung der rekonstruierten 3D-Punkte im Bezug auf Ausgleichsflächen verursachte als die horizontale Bewegung.

Anschließend wurden numerische Filter untersucht, die zu einer Reduktion des subjektiven Speckle-Kontrastes und damit zur Verbesserung der 3D-Rekonstruktionsqualität beitragen sollten. Es wurde dabei auf mittelungsbasierte Intensitätsfilter zurückgegriffen, die linear, also jeweils nur in einer Raumrichtung, ausgedehnt waren. Diese Mittelungsmethode entsprach der experimentellen Filterung, die sich aus der periodischen Bewegung der Spiegel während der Aufnahme ergab.

Verschiedene Filterarten wurden numerisch implementiert und ihre Auswirkung auf durch eine *Matlab*-Simulation erzeugte subjektive Speckle-Verteilung untersucht. Alle Filter führten zu einer starken Reduktion des Kontrasts der Speckles. Es wurde anschließend ausschließlich auf die Sinus-Filterung zurückgegriffen, da diese der experimentellen Spiegelbewegung entsprach. Diese Filterfunktion wurde auf simulierte Speckle-Verteilungen verschiedener Größe angewendet und der resultierende Kontrast bestimmt. Dabei zeigte sich, dass die räumlich kleinsten Speckles bereits bei niedrigen Filtergrößen erheblich in ihrem Kontrast reduziert wurden, während der Kontrast größerer Speckle-Strukturen selbst bei maximalem Filterumfang nur knapp unter 70% des Ausgangswertes gesunken war.

In einer weiteren Simulation, die mit dem Programm *POV-Ray* erzeugt wurde, konnte gezeigt werden, dass zwischen der Orientierung der Filterung und der Position der Kameras zueinander ein Zusammenhang bestand. Die Verwendung des Vorwissens über die Epipolareometrie war nicht nur geeignet, die Zahl der zu überprüfenden Pixel bei der Korrelationssuche zu reduzieren, sondern gab auch die Vorzugsrichtung der Filterung an. Da durch die Kalibrierung des Stereosystems bereits alle Epipolarebenen und -linien festgelegt wurden, war nur eine Filterung senkrecht zu diesen Ebenen, entlang derer die Korrelationssuche durchgeführt wurde, sinnvoll. Eine weitere *POV-Ray*-Simulation zeigte, dass auch die Rekonstruktion einer idealen Stufe durch numerische Mittelungen der Grauwerte senkrecht zu den Epipolarebenen bei starker räumliche Filterung besser gelang als bei starker Filterung entlang der Epipolarebenen bzw. -linien.

Auch auf experimentelle Messungen konnte dieses Vorwissen über die Filterung angewendet werden. Die Standardabweichung der Rekonstruktionen, die aus den im Experiment gewonnenen Aufnahmen durch die Bearbeitung mit verschiedenen Filterausdehnungen erzeugt wurden, konnten um bis zu 33% bei Ebenenrekonstruktionen und um bis zu 9,3% bei Kugelrekonstruktionen verringert werden. Dabei bestätigte sich die Vorzugsrichtung der Filterung, und es konnte gezeigt werden, dass der Korrelationskoeffizient bei räumlichen Mittelungen entlang der Vorzugsrichtung weiterhin als Merkmal vertrauenswürdig

rekonstruierter Punkte herangezogen werden konnte. Bei der Filterung senkrecht zur Vorzugsrichtung wurden Ausreißer durch den Schwellwert des Korrelationskoeffizienten nicht mehr zuverlässig von der Rekonstruktion ausgeschlossen.

Auch zwei geläppte Bauelemente und eine Büste Friedrich Schillers wurden stereophotogrammetrisch vermessen, wobei sich zeigte, dass Objektstrukturen, die orthogonal zur Filterrichtung orientiert waren, wesentlich stärker von der Filterung beeinflusst wurden, als solche, die in dieser Richtung ausgedehnt waren. Auch Flächen, die um die entsprechende Achse gedreht, also nicht senkrecht zur z -Achse orientiert waren, wurden jeweils stärker verzerrt rekonstruiert. Hier wirkte sich die Vorzugsrichtung der Filterung dahingehend aus, dass bei zu großer Filterung geneigte Objektbereiche oder zur Filterung senkrecht orientierte Kanten zunehmend unvollständiger rekonstruiert wurden. Da der Kreuzkorrelationskoeffizient als Bewertungsmaß weiterhin funktionierte, wurden fehlerhaft rekonstruierte Objektpunkte nicht ausgegeben, wenn die numerische Mittelung in Vorzugsrichtung erfolgte. Bei der Filterung senkrecht zu dieser Vorzugsorientierung wurden stattdessen viele Ausreißer rekonstruiert, da der Korrelationskoeffizient hier über dem Schwellwert blieb. Deshalb traten bei den Rekonstruktionen deutliche Abweichungen auf. Im Vergleich der experimentellen und numerischen Filterung lässt sich als Resultat dieser Arbeit feststellen, dass die räumliche, mittelungsbasierte Filterung unabhängig von Orientierung und Methode den Kontrast subjektiver Speckles reduzieren und dadurch das Rekonstruktionsergebnis verbessern konnte. Es war jedoch darauf zu achten, die Filterausdehnung nicht zu groß zu wählen und sie idealerweise in ihrer Orientierung an den Aufbau anzupassen, sodass in Vorzugsrichtung gefiltert werden konnte, die senkrecht zu den Epipolarebenen verlief. Für kleine Filtergrößen war dies aber unerheblich. Die experimentelle Methode ermöglichte ferner eine echtzeitfähige Anwendung ohne numerische Nachbearbeitung. Dafür war sie methodisch aufwendiger als die numerische Filterung. Diese wiederum war zeitintensiver bzw. benötigte eine höhere Rechenkapazität (pro Bild bis zu 50 *ms*). Geeignete Umsetzungen, zum Beispiel parallelisiert, und eine ausreichende Rechnerleistung könnten diesen Nachteil allerdings wieder ausgleichen. Mit dieser Methode konnte der bereits vorhandene Messaufbau ohne Umbauten verwendet werden, sodass die Messdaten nachbearbeitet werden konnten. Im Vergleich zur Reduktionsmethode durch eine zweite Streuscheibe nach Schaffer et al. [22] musste für diese Lösungsansätze die Art der Beleuchtung nicht verändert werden, sodass die objektiven Speckles weiterhin in einem großen Volumen mit deutlichem Kontrast zu sehen waren.

Das Konzept der Speckle-Beleuchtung zum Zweck der 3D-Vermessung von Oberflächen wurde erstmalig in den ultravioletten (UV) Bereich des Lichtes übertragen, wobei zur Kalibrierung ein bereits aus dem sichtbaren Bereich (VIS) bekanntes Verfahren verwendet wurde. Dazu wurde ein Schachbrettmuster in verschiedenen Positionen unter UV-

Beleuchtung vom Messsystem aufgenommen. Nach der vollständigen Kalibrierung des Systems konnten 3D-Rekonstruktionen bei 266 nm erstellt werden. Die Ebenen- und Kugelrekonstruktionen besaßen eine vergleichbare Präzision und Vollständigkeit zu den Ergebnissen im VIS.

Bei dieser kürzeren Wellenlänge zeigten verschiedene Oberflächenarten andere optische Eigenschaften als im sichtbaren Bereich des Lichtes, wo sie für die stereophotogrammetrische 3D-Messung wie "unkooperative Oberflächen" wirkten. Es stellte sich heraus, dass sowohl ein untersuchtes Objekt aus Edelstahl (Schaumlöffel), als auch ein Satz Deckgläschen und eine antireflex-beschichtete Linse im UV deutlich streuender wirkten als bei einer Beleuchtungswellenlänge von 532 nm . In der Folge konnten diese Objekte bei Speckle-Beleuchtung bei 266 nm und der numerischen Sinus-Filterung vollständiger und präziser rekonstruiert werden als im VIS. Die photogrammetrische 3D-Vermessung von Objekten aus Glas im UV-Bereich wurde nach Wissen des Autors hier erstmalig realisiert. Damit könnten zukünftig Objekte aus Glas oder Objekte, deren Oberflächen verschiedene optische Eigenschaften besitzen, vermessen werden.

Kapitel 5 behandelte die Verwendung sequentiell wiederholbarer, objektiver Speckles zum Zweck der 3D-Messung mit nur einer Kamera. Dazu wurde eine Streuscheibe durch mehrere einzeln ansteuerbare, fixierte Fasern beleuchtet. Mit einem ersten, experimentell realisierten Aufbau zur sequentiellen Wiederholung objektiver Speckles konnte so ein 3D-Messsystem mit nur einer Kamera erstellt werden, das eine Ebenenstandardabweichung von $1,7\text{ mm}$ ermöglichte. In dem kalibrierten Messvolumen von etwa $20 \times 20 \times 5\text{ cm}^3$ war es außerdem möglich, komplexe Objekte zu vermessen, was in dieser Form erstmalig mit wiederholbaren Speckle-Mustern und nur einer Kamera geschehen ist.

Die erfolgreiche Entwicklung des 3D-Messsystems mit wiederholbaren Speckle-Mustern und nur einer Kamera ermöglichte die Miniaturisierung, da nun nur die Abmessungen der Kamera maßgeblich für die Baugröße des Systems waren. Der dazu erstellte Aufbau lieferte erste Rekonstruktionsergebnisse, diese waren aber unpräziser als in der stereophotogrammetrischen Messung. Eine mögliche Erklärung bestand in dem kleinen Abstand zwischen Kamera- und Projektionszentren, aber auch in den für die 3D-Messung mit nur einer Kamera vermutlich zu großen objektiven Speckles. Beide Parameter waren bei diesem Prototypen allerdings fixiert, sodass keine Analyse ihres Einflusses möglich war. Hierzu müssen zukünftig weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Es konnte gezeigt werden, dass 3D-Messungen mit einem Messkopfdurchmesser $< 3\text{ cm}$, einer Kamera und die Verwendung wiederholbarer, objektiver Speckles durchgeführt werden konnten. Durch kleinere Kameras könnte perspektivisch die Größe der Messsysteme weiter reduziert werden.

Die vorliegende Arbeit trägt zur Weiterentwicklung der Speckle-Projektion zur 3D-Messung

in drei Bereichen bei:

1. Der Kontrast subjektiver Speckles konnte durch räumliche Filterung reduziert und die 3D-Rekonstruktionsergebnisse verbessert werden. Ein Zusammenhang zwischen der Filterorientierung und der Epipolareometrie konnte gefunden und begründet werden.
2. Das Prinzip der Speckle-Projektion zur stereophotogrammetrischen 3D-Messung wurde in den UV-Bereich übertragen und ermöglichte die Vermessung von im VIS unkooperativen Oberflächen.
3. Speckle-Muster konnten wiederholbar erzeugt werden, sodass die 3D-Messung mit nur einer Kamera und objektiven Speckles möglich wurde. Dadurch wurde die Option geschaffen, das Messsystem zu miniaturisieren und erfolgreich 3D-Rekonstruktionen zu erzeugen.

Zukünftig ist neben einer Beschleunigung des Filterverfahrens insbesondere eine zweidimensionale, elliptische Ausführung der numerischen Mittelungsbereiche von Interesse, bei der die Filter unterschiedliche räumliche Ausdehnungen besitzen. Außerdem sollte der Einfluss einer räumlichen Filterung auf die Ein-Kamera-Anwendung untersucht werden. Um die Filterung zu beschleunigen, könnte auf dem Kamerasensor bereits eine Mittelung der Grauwerte benachbarter Pixel erfolgen. Diese könnte zum Beispiel nur zwischen vertikalen Nachbarn stattfinden. Ansätze zu "intelligenten Sensoren" wurden bereits durch das *Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltung* Dresden vorgestellt [104]. Die in der vorliegenden Dissertation verwendeten Methoden in Hochgeschwindigkeitsmessungen zu erproben, ist ein wesentliches Anliegen zukünftiger Forschungen.

Die Vermessung von Objektoberflächen im UV setzt grundsätzlich nicht die Kohärenz des verwendeten Lichts voraus, wie sie für die Speckle-Projektion nötig ist. Ähnliche Ergebnisse könnten gefunden werden, wenn ein inkohärentes System im UV-Bereich verwendet werden würde. Die Quellen dafür sind wesentlich kostengünstiger als vergleichbare kohärente Quellen. Derartige 3D-Messsysteme mit denen Objekte, die aus mehreren Oberflächentypen bestehen, erfasst werden können, wären für viele Anwendungen von Interesse und würden den Vorteil bieten, dass keine subjektiven Speckles entstehen würden und für die Messung optimierbare Muster eingesetzt werden könnten.

Die miniaturisierte 3D-Messung mit nur einer Kamera beinhaltet ein ähnlich hohes Potential zum Beispiel für die industrielle Produktkontrolle oder die automatisierte Positionierung von Objekten an schwer zugänglichen Orten. Das verminderte Gewicht, das mit einer Miniaturisierung einhergeht, wäre ebenfalls für viele Einsatzgebiete von Vorteil.

Diese Methode muss aber noch intensiver untersucht werden, um sie näher an den Stand der Genauigkeit und Aufnahmegeschwindigkeit anderer Verfahren heranzuführen.

Die Reduktion subjektiver Speckles half, einen der entscheidenden Nachteile der Projektion objektiver Speckles einzuschränken, während die Vorteile kohärenter Beleuchtung weitestgehend erhalten blieben. Die Übertragung des Prinzips in den Infrarot- oder noch weiter in den UV-Bereich könnte zukünftig weitere Einsatzszenarien erschließen. Ferner bietet die Möglichkeit der Miniaturisierung ein erheblich vergrößertes Einsatzfeld, zum Beispiel an Robotern und Vehikeln aller Art. Die Projektion objektiver Speckles zur 3D-Messung könnte so zukünftig breitere Anwendung finden.

A Anhang

A.1 Kohärenz und räumliche Speckle-Verteilung

A.1.1 Kohärenz

Die Theorie der Speckles ist mit der Kohärenztheorie eng verknüpft. Die Kohärenztheorie untersucht Quellen und die von ihnen ausgesandten Feldverteilungen, während die Speckle-Theorie sich mit den statistischen Eigenschaften streuender Elemente und den Eigenschaften gestreuter Feldverteilungen auseinandersetzt [69]. In diesem Sinne ist das Prinzip der Kohärenz mit den Lösungswegen und Problemstellungen gestreuter Feldverteilungen verbunden. Im Allgemeinen wird die Kohärenz elektromagnetischer Wellen als ihre Fähigkeit verstanden, miteinander zu interferieren, also sich konstruktiv und destruktiv zu überlagern. Die Intensität I_{EM} einer elektromagnetischen Welle lässt sich als zeitliches Mittel ihrer Amplitude \vec{E} nach

$$I_{EM} = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \langle \vec{E}^2 \rangle \quad (\text{A.1})$$

auffassen. Hier beschreiben ϵ und μ die elektrische bzw. die magnetische Leitfähigkeit und c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Die Amplitude einer monochromatischen Welle wird durch

$$\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} [\vec{A}(\vec{r}) e^{-i\omega t} + \vec{A}^*(\vec{r}) e^{i\omega t}] \quad (\text{A.2})$$

wiedergegeben, wobei ω die Winkelgeschwindigkeit der Welle angibt und durch $\omega = 2\pi\nu$ mit ihrer Frequenz ν und durch $\lambda = 2\pi\frac{c}{\omega}$ mit ihrer Wellenlänge λ verbunden ist. Das Quadrat der Amplitude lässt sich nach

$$\vec{E}^2 = \frac{1}{4} (\vec{A}^2 e^{-2i\omega t} + \vec{A}^{*2} e^{2i\omega t} + 2\vec{A}\vec{A}^*) \quad (\text{A.3})$$

beschreiben. Das zeitliche Mittel über einen Zeitraum, der groß ist im Vergleich zur Periode T der Schwingung ($T = 2\pi/\omega$), ergibt sich nach

$$\langle \vec{E}^2 \rangle = \frac{1}{2} \vec{A}\vec{A}^* = I. \quad (\text{A.4})$$

Dieser Ausdruck wird mit der Intensität I der Welle identifiziert [23, 105].

Soll eine einzelne Quelle bezüglich ihrer Kohärenz beschrieben werden, kann die Überlagerung der von ihr ausgesendeten Strahlung grundsätzlich durch die *Methode der Teilung der Wellenfront* oder die *Methode der Teilung der Amplitude* erfolgen [105]. Durch die jeweilige Methode kann dabei die zeitliche bzw. die räumliche Kohärenz der Quelle gemessen werden. Unabhängig davon, ob monochromatische elektromagnetische Wellen aus derselben Quelle oder aus verschiedenen Quellen stammen und dann überlagert werden, lässt sich die Überlagerung zweier Wellen \vec{E}_1 und \vec{E}_2 am Punkt $P(x, y, z)$ nach

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (\text{A.5})$$

wiedergeben. Das Betragsquadrat dieser Amplitude liefert damit

$$\vec{E}^2 = \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2\vec{E}_1\vec{E}_2. \quad (\text{A.6})$$

Die sich aus den Teilintensitäten I_1 , I_2 und $J_{1,2}$ ergebende Intensität I wird durch

$$I = I_1 + I_2 + J_{12} \quad (\text{A.7})$$

gebildet. Diese Gleichung (A.7) lässt sich mit den Annahmen $J_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta_k$ und $I_1 = I_2$ zum Ausdruck:

$$I = 2I_1(1 + \cos \delta) = 4I_1 \cos^2 \frac{\delta_k}{2} \quad (\text{A.8})$$

umformen. Die dimensionslose Größe δ_k beschreibt den Phasenversatz, der sich aus dem Wegunterschied $\Delta \mathbf{s}$ und der Wellenlänge λ nach

$$\delta_k = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \mathbf{s} \quad (\text{A.9})$$

ergibt. Die Zeit τ gibt den Zeitversatz wieder, den das Licht benötigt, um $\Delta \mathbf{s}$ zurückzulegen. Der normierte, komplexe Kohärenzgrad im stationären Fall $\gamma_{12}(\tau)$ gibt die Fähigkeit der Wellenfelder zur Interferenz wieder und wird nach

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{\Gamma_{11}(0)}\sqrt{\Gamma_{22}(0)}} \quad (\text{A.10})$$

bestimmt. Dabei wird mit $\Gamma_{12}(\tau)$ die wechselseitige Kohärenzfunktion der überlagerten elektrischen Felder, nach

$$\Gamma_{12}(\tau) = \langle \vec{E}_1(\vec{r}_1, t) \vec{E}_2^*(\vec{r}_2, t + \tau) \rangle \quad (\text{A.11})$$

berechnet. Für die Ausdrücke $\Gamma_{11}(0)$ und $\Gamma_{22}(0)$, den sogenannten Autokorrelationsanteilen, folgt aus Gleichung A.11 das $\Gamma_{11}(0) = I_1$ und $\Gamma_{22}(0) = I_2$ gilt. Damit vereinfacht sich die Darstellung für den normierten, komplexen Kohärenzgrad zu

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{I_1}\sqrt{I_2}}. \quad (\text{A.12})$$

Für $\gamma_{12}(\tau) = 1$ wird der Begriff der vollständigen Kohärenz und für $0 < \gamma_{12}(\tau) < 1$ der Begriff der teilweisen oder partiellen Kohärenz verwendet. Ist $\gamma_{12}(\tau) = 0$, bezeichnet man die Feldverteilungen als zueinander inkohärent. Die zeitliche Kohärenz wird durch Gleichung A.12 für den Fall, dass $\gamma_{12}(\tau) = \gamma(\tau)$ ist, beschrieben. Dieser Fall tritt ein, wenn die Phasendifferenz nicht durch räumliche Trennung, sondern durch eine Laufzeitdifferenz verursacht wird, also die Methode der Teilung der Amplituden angewendet wurde. Wenn die Wellenfronten sich ohne Zeitversatz im Raum überlagern, indem der Ansatz der Trennung der Wellenfronten verfolgt wird, so ist $\tau = 0$, $\gamma_{12}(\tau) = \gamma_{12}(0)$, und der Kohärenzgrad trifft eine Aussage über die räumliche Kohärenz der Wellenfelder zueinander.

Bei Verwendung der Methode der Teilung der Amplituden ergibt sich eine weitere Größe, die *Kohärenzlänge* genannt wird. Diese beschreibt die räumliche Länge, über die der

Kohärenzgrad zweier überlagerter Wellenpakete einer Frequenz $\nu = \frac{c}{\lambda}$ über dem Wert von $1/e$ liegt. Über den Kohärenzgrad und das Wiener-Chintschin-Theorem kann die Formel

$$\gamma(\tau) = \frac{\int_0^{\infty} S(\nu) e^{-2\pi i \nu \tau} d\nu}{\int_0^{\infty} S(\nu)} \quad (\text{A.13})$$

hergeleitet werden. Dabei beschreibt $S(\nu)$ die spektrale Dichteverteilung der untersuchten elektromagnetischen Strahlung. Der Zeitbereich $\Delta\tau$ in dem der Kohärenzgrad über dem Wert von $1/e$ liegt, kann über

$$l_{Ko} = c \cdot \Delta\tau \quad (\text{A.14})$$

in die Kohärenzlänge l_{Ko} umgerechnet werden.

A.1.2 Räumliche Verteilung von Speckles

Das Zustandekommen von Speckles ist ein durch kohärentes Licht erzeugter Effekt, der sich durch Raumbereiche konstruktiver und destruktiver Interferenz manifestiert. Dazu ist allerdings die statistische Variation der Phase eines kohärenten Lichtbündels nötig. An dieser Stelle soll darauf eingegangen werden, wie sich die räumliche Form der die Speckles erzeugenden Verteilung $G(\xi, \eta)$ auf deren Aussehen im Ortsraum auswirkt.

Wird eine kohärente Wellenfront in der Ebene Σ_0 gebeugt, so entspricht die Intensitätsverteilung der Wellenfront in der Ebene Σ_1 (Fernfeld) in der Fraunhofer-Näherung der Fouriertransformierten der Verteilung bei Σ_0 . Dieser Zusammenhang wird durch

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Sigma_0} G(\xi, \eta) e^{-i(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta = \mathfrak{FT}\{G(\xi, \eta)\} \quad (\text{A.15})$$

ausgedrückt. Eine Multiplikation der Fouriertransformierten von Verteilungen im Ortsraum entspricht nach dem Faltungstheorem der Fouriertransformierten der Faltung der entsprechenden Ausgangsverteilungen und umgekehrt. Das Faltungstheorem für zwei Verteilungen im Ortsraum $G(x, y)$ und $H(x, y)$ kann dementsprechend als

$$\mathfrak{FT}\{G(x, y) * H(x, y)\} = \mathfrak{FT}\{G(x, y)\} \cdot \mathfrak{FT}\{H(x, y)\} \quad (\text{A.16})$$

formuliert werden. Die im Fernfeld entstandene Amplitudenverteilung $G(x, y)$ erlaubt es die Intensitätsverteilung in der Ebene Σ_0 nach

$$I(x, y) = \frac{1}{2} \vec{G} \cdot \vec{G}^* = \frac{1}{2} U(x, y) \cdot G(x, y) = \frac{1}{2} \mathfrak{FT}\{G(\xi, \eta)\} \cdot \mathfrak{FT}\{G(\xi, \eta)\} \quad (\text{A.17})$$

zu ermitteln. Unter Zuhilfenahme des Faltungstheorems folgt für die Fouriertransformierte der Intensität $I(x, y)$

$$\mathfrak{FT}\{I(x, y)\} = I_{\mathfrak{FT}} = G(\xi, \eta) * G(\xi, \eta). \quad (\text{A.18})$$

Das Ortsfrequenzspektrum der Intensität ist somit die Faltung der die Struktur erzeugenden Blende mit sich selbst. Für die Erzeugung von Speckle-Verteilungen eröffnet dies die Möglichkeit die Größe und Form von Speckles zu bestimmen. Umgekehrt kann die Intensitätsverteilung I_{Sp} eines Speckle-Feldes benutzt werden, um auf die sie erzeugende Verteilung Rückschlüsse ziehen zu können. Eine Anwendung besteht dabei in der Bestimmung der räumlichen Größe von Speckles, die durch die Autokorrelation eines Specklefeldes bestimmt wird³⁰.

³⁰Die Faltung einer Verteilung mit sich selbst entspricht nur ihrer Autokorrelation, wenn sie realwertig und inversionssymmetrisch ist. Da Intensitäten zwar realwertig, aber nicht zwangsläufig inversionssymmetrisch sind, folgt für die Praxis mit Speckle-Verteilungen, dass eine einzelne Aufnahme eines objektiven Speckle-Feldes zur Bestimmung der durchschnittlichen Größe durch die Autokorrelation im Allgemeinen nicht ausreicht. Ein zweites objektives Speckle-Feld mit gleichen Eigenschaften muss dafür herangezogen und die Korrelationsverteilung des zweiten Speckle-Feldes mit dem ersten von der Autokorrelationsverteilung der ersten Intensitätsverteilung subtrahiert werden.

A.2 Ortsfrequenzspektrum von Bessel-Speckles

Im Grundlagenkapitel der vorliegenden Arbeit wird auf die von D. Weigel als "Bessel-Speckles" bezeichneten Muster Bezug genommen. Nach J. W. Goodman [72] lässt sich die histogrammische Verteilung von Speckle-Strukturen nicht durch die Änderung der sie erzeugenden Blende beeinflussen, sehr wohl aber deren räumliche Verteilung. Es kann Vorteile mit sich bringen, von einer kreisförmigen Blende abzuweichen, um Speckles zu erzeugen. Im Bereich der Messtechnik wäre hier die Erzeugung von streifenförmigen Speckles zu nennen, und im Bereich der Mikroskopie die hier vorgestellten Bessel-Speckles. Im Folgenden sind zwei Blenden und Speckle-Verteilungen dargestellt. Die Speckle-Verteilungen wurden durch die Blendenverteilungen erzeugt.

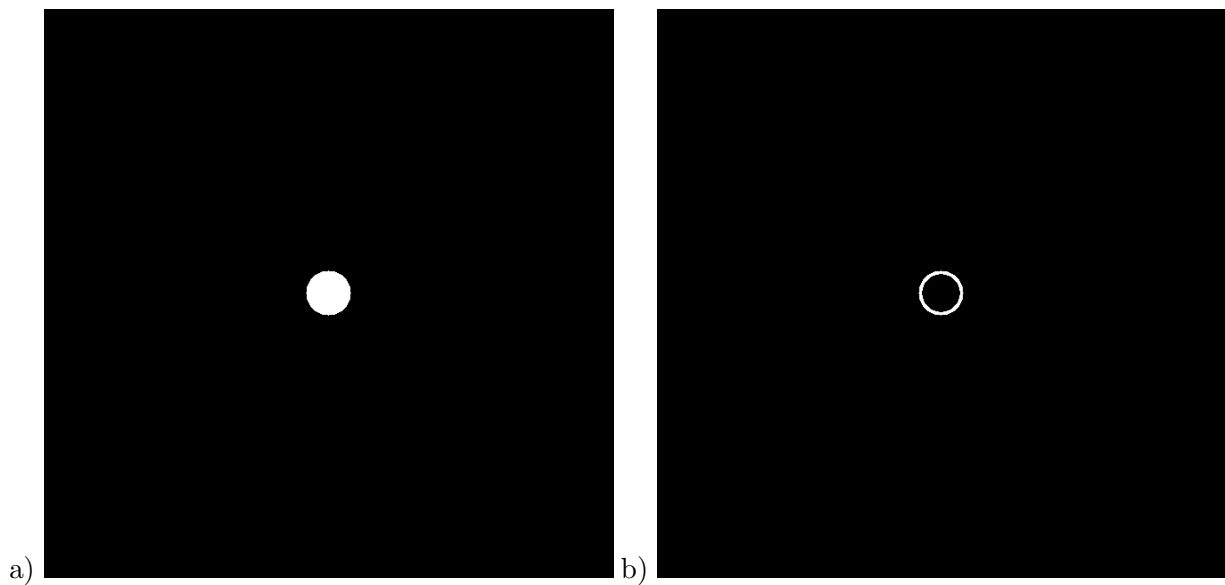


Abbildung 79: Speckles erzeugende Blenden. a) Kreisblende zur Erzeugung von einfachen Speckle-Verteilungen, b) Ringblende zur Erzeugung von Besselspeckles.

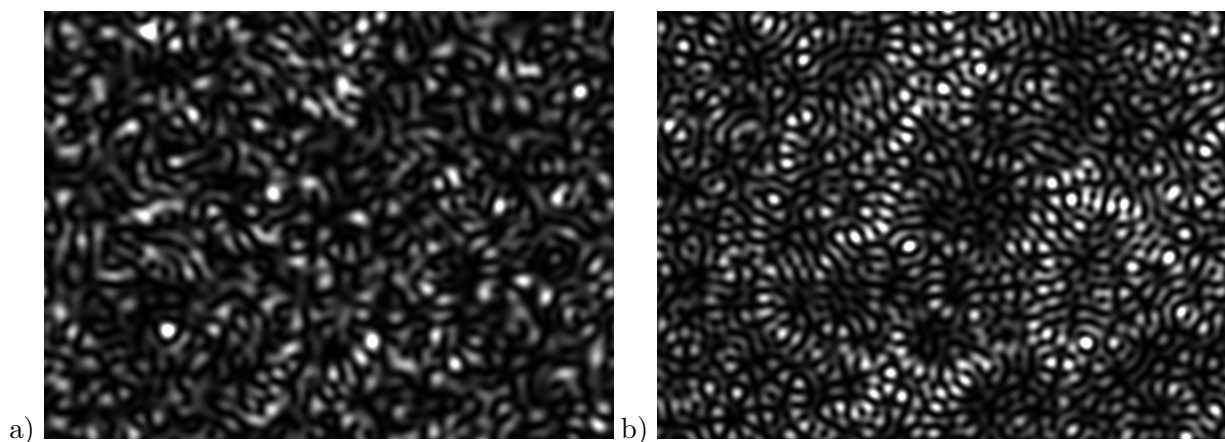


Abbildung 80: Beispiele der durch die Kreis- bzw. Ringblende erzeugten Speckle-Verteilungen. a) Einfaches Speckle-Muster und b) Bessel-Speckle-Muster.

Die durch die Ringblende erzeugten Muster haben im Vergleich zu den durch eine Kreisblende erzeugten Speckles ein verändertes Aussehen, wobei die Häufigkeit der Grauwerte gleich geblieben ist. Für die Mikroskopie, insbesondere die Fluoreszenzmikroskopie mit strukturierter Beleuchtung ist die Qualität der verwendeten Muster entscheidend, wobei vor allem die Ausprägung hoher Ortsfrequenzen von Bedeutung ist. Der sich mit der hoch- und höchstauflösenden Fluoreszenzmikroskopie auseinandersetzen Patentantrag [76] beruht neben anderen Teilen auch auf der Verwendung von mit einander multiplizierten Speckle-Verteilungen. Im Folgenden sind die oben gezeigten Muster mit statistisch unabhängigen Mustern multipliziert dargestellt. Diese Multiplikation führt zwar zur

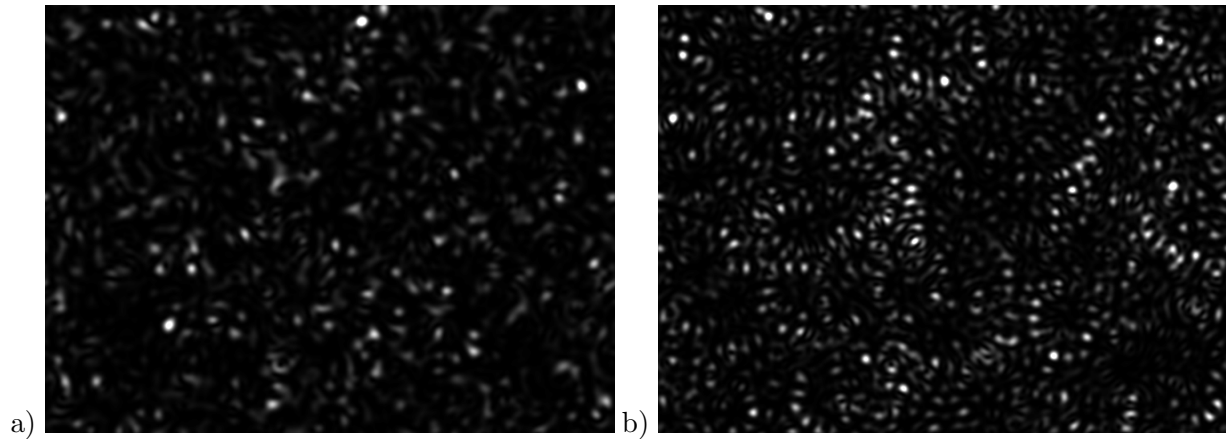
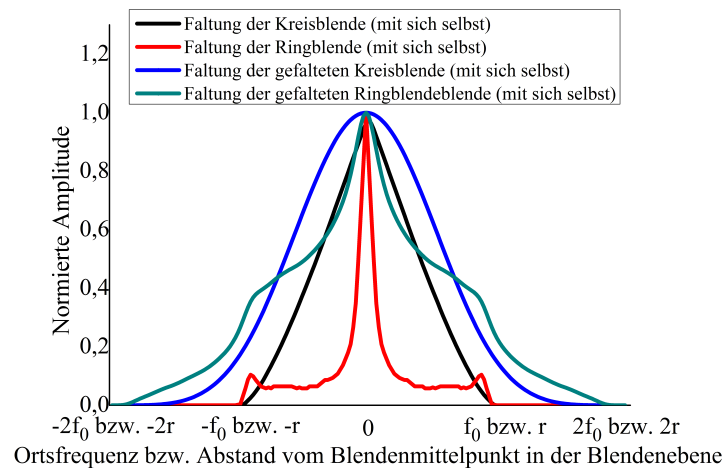
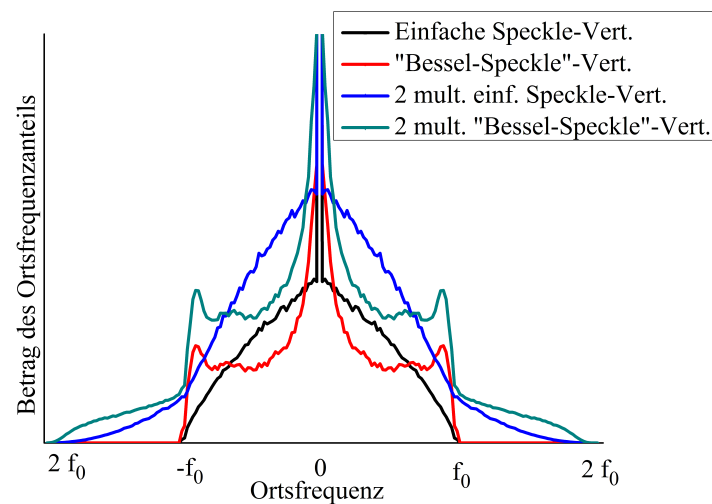


Abbildung 81: Beispielhafte Darstellung durch Multiplikation von statistisch unabhängigen Ausgangsverteilungen erzeugten Speckle-Verteilungen. a) Zwei Multiplizierte "einfache" Speckle-Muster und b) zwei multiplizierte Bessel-Speckle-Muster.

Verbreiterung des Ortsfrequenzspektrums der sich ergebenden Verteilung, jedoch sind die größten Ortsfrequenzen deutlich abgeschwächt, was Nachteile für die Mikroskopie mit sich bringen kann. Der Vorschlag von D. Weigel bezog sich in diesem Zusammenhang auf die Verwendung von Bessel-Speckles, bei denen höhere Ortsfrequenzen schon in einem einzelnen Muster stärker ausgeprägt sind, da sich das Ortsfrequenzspektrum aus der Faltung der die Speckle erzeugenden Blende mit sich selbst ergibt. Auch die "Seitenbänder" in der durch Multiplikation entstandenen Verteilung sind daher stärker ausgeprägt, wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist.



a)



b)

Abbildung 82: a) Beträge der normierten Amplitude der Faltung der Blenden mit sich selbst. b) Ortsfrequenzanteile der untersuchten vier Mustersorten. Dazu wurde ein Schnitt durch die Ortsfrequenzspektren gelegt und über 1.000 Muster gemittelt. Dargestellt sind die Werte für einfache Speckle-Verteilungen und Bessel-Speckle-Verteilungen bis zur durch die Blende vorgegeben Grenzfrequenz f_0 und die Ergebnisse für die Multiplikation zweier solcher Muster.

A.3 M^2 -Wert und Modenzahl

Der M^2 -Wert liefert nur für den Fall, dass $M^2 = 1$ eine eindeutige Aussage über die Zusammensetzung der transversal Moden. In diesem Fall liegt nur die Grundmode vor. In allen anderen Fällen lässt sich aus der Angabe des M^2 -Wertes kein Rückschluss auf die Anzahl und die Gewichtung von zueinander inkohärenten Moden eines Laserstrahlbündels ziehen.

Dies hat im Zusammenhang mit der Thematik dieser Arbeit zur Folge, dass aus dem

M^2 -Wert eines Lasers nicht zwangsläufig auf den Kontrast der sich ergebenden Speckles geschlossen werden kann. Anhand der folgenden Ausführung soll diese Aussage belegt werden [106].

Ein Wellenfeld, das aus zueinander inkohärenten Wellenfeldern zusammengesetzt ist, kann in *Gauß-Hermite*-Moden aufgeteilt werden, wobei die Moden zueinander eine Gewichtung besitzen. Die Amplituden der transversalen *GH*-Moden $\varphi_{mn}(x, y)$ lassen sich nach

$$\varphi_{mn}(x, y) = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2}{2^{m+n} \pi m! n!}} H_m\left(\frac{\sqrt{2}}{w} x\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}}{w} y\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \quad (\text{A.19})$$

beschreiben. Hierbei stellt w den Radius des Wellenfeldes bzw. Strahls dar. Die H_k repräsentieren die *Hermite*-Polynome k -ter Ordnung.

Für die Intensität I_W des Wellenfeldes folgt

$$I_W = \frac{c\epsilon_0}{2} |E|^2 = \frac{c\epsilon_0}{2} |E_0|^2 \sum_{mn} |c_{mn}|^2 \varphi_{mn}^2. \quad (\text{A.20})$$

Hier beschreiben die $|c_{mn}|^2$ die relativen Gewichtungen der einzelnen *GH*-Moden, sodass $\sum_{mn} |c_{mn}|^2 = 1$ erfüllt ist. Das Verhältnis des Wellenfelddurchmessers in einer Richtung $w_{x,echt}$ zum idealen Durchmesser der Grundmode $w_{x,ideal}$ liefert den M^2 -Wert in dieser Raumrichtung M_x^2 , sodass

$$M_x^2 = \frac{w_{x,echt}^2}{w_{x,ideal}^2} \quad (\text{A.21})$$

erfüllt ist. Unter Verwendung der Strahlleistung $P(z)$ mit $P = \iint I_W(x, y, z) dx dy$ lässt sich

$$M_x^2 = \sum_{mn} |c_{mn}|^2 (2m + 1) \quad (\text{A.22})$$

bestimmen. Da bei der Bildung des M^2 -Wertes letztlich über die einzelnen Beiträge summiert wird, ist aus dem Wert selbst weder die Anzahl noch die Gewichtung der einzelnen transversal Moden zu entnehmen, es sei denn $M^2 = 1$.

A.4 Spezifizierungen der Aufbauten

Spezifikation des stereophotogrammetrischen Aufbaus für 532 nm	
Gerät/Parameter	Spezifikation
Kameras	
Kameratyp	AVT-Pike F-032b
Auflösung	640 × 480
Pixelpitch	7,4 μm
Maximale Aufnahme­rate	204 Bilder/s
Objektive	
Objektivtyp	Cosmicar Television Lens
Brennweite	50 mm
$F_{\#}$	1,8
Laser	
Lasertyp	MGL-F-532-2W
Zentralwellenlänge	532 nm
Maximalintensität	2 W
Betriebsart	kontinuierlich
Beugungsmaßzahl (M^2)	< 1,2
Geometrische Abmessungen	
Basis	79,2 cm
Messvolumen (MV)	10 × 10 × 10 cm ³
Abstand des MV von der Basis	128 cm
Winkel zwischen den zentralen Sichtstrahlen	30,5°
Maximaler Winkel zwischen den Epipolarlinien und der Horizontalen	3,1°

Tabelle 1: Spezifikation für den stereophotogrammetrischen Aufbau zur Objektvermessung bei 532 nm.

Spezifikation des stereophotogrammetrischen Aufbaus für den UV-Bereich (266 nm)	
Gerät/Parameter	Spezifikation
Kameras	
Kameratyp	JAI CM-140 GE-UV
Auflösung	1392 × 1040
Pixelpitch	4,65 μm
Abbildungsmaßstab	$\approx 0,097$
maximale Aufnahmezeit	16,14 Bilder/s
Objektive	
Objektivtyp	UV2528B
Brennweite	25 mm
$F_{\#}$	1,8
Laser	
Lasertyp	MPL-N-266-100mW
Zentralwellenlänge	266 nm
Maximalintensität	100 mW
Betriebsart	quasi-kontinuierlich
Beugungsmaßzahl (M^2)	< 1,2
Geometrische Abmessungen	
Basis	12,9 cm
Messvolumen (MV)	5 · 5 · 5 cm ³
Abstand des MV von der Basis	22 cm
Winkel zwischen den zentralen Sichtstrahlen	32,4°
Maximaler Winkel zwischen den Epipolarlinien und der Horizontalen	4,7°

Tabelle 2: Spezifikation für den stereophotogrammetrischen Aufbau zur Objektvermessung im UV-Bereich.

Spezifikation des Aufbaus zur 3D-Messung mit wiederholbaren Speckles	
Gerät/Parameter	Spezifikation
Kamera	
Kameratyp	AVT-Pike F-032b
Auflösung	640×480
Pixelpitch	$7,4 \mu\text{m}$
maximale Aufnahme­rate	204 Bilder/s
Objektiv	
Objektivtyp	Cosmicar Television Lens
Brennweite	25 mm
$F_{\#}$	1,8
Laser	
Lasertyp	MGL-F-532-2W
Zentralwellenlänge	532 nm
Maximalintensität	2 W
Betriebsart	kontinuierlich
Beugungsmaßzahl (M^2)	$< 1,2$
Geometrische Abmessungen	
Basis (Projektor-Kamera)	20 cm
Messvolumen (MV)	$20 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$
Abstand des MV von der Basis	90 cm
Winkel zwischen dem zentralen Sichtstrahl und der Hauptbeleuchtungsrichtung	$\approx 11^\circ$

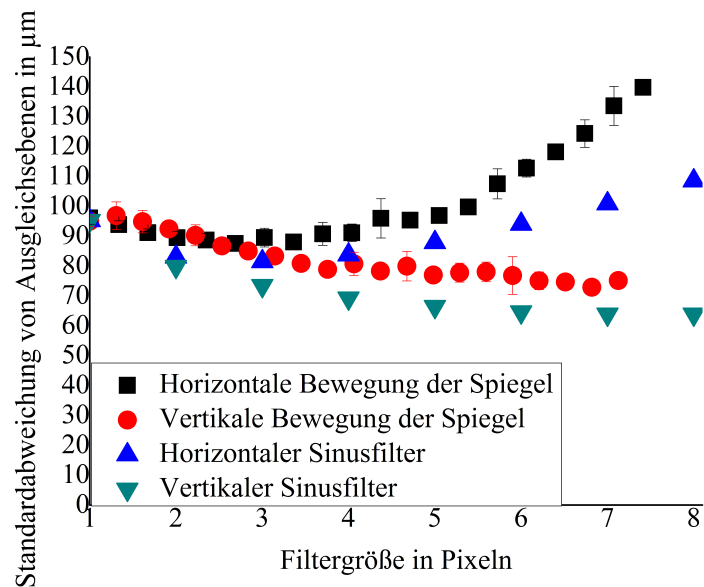
Tabelle 3: Spezifikation für den Aufbau zur Objektvermessung mit einem Projektor wiederholbarer Speckles und einer Kamera.

Spezifikation des miniaturisierten Aufbaus zur 3D-Messung mit wiederholbaren Speckles	
Gerät/Parameter	Spezifikation
Kamera Kameratyp Auflösung Pixelpitch maximale Aufnahmezeit	XIMEA MU9PM-MH, CMOS 640 × 480 2,2 μm 5 Bilder/s
Objektiv Objektivtyp Brennweite $F_{\#}$	Edmund Optics 7,2 mm FL f/1.8 Red M12 7,2 mm 1,8
Laser Lasertyp Zentralwellenlänge Maximalintensität Betriebsart Beugungsmaßzahl (M^2)	0532L-13B/ 532 nm Laser (DPSS, SM Fiber) 532 nm 0,1 W kontinuierlich $\leq 1,1$
Optischer Schalter Typ Wellenlängenbereich Maximaler Koppelverlust Maximale Schaltfrequenz Maximale optische Leistung	FO Switch eol 1x12 VIS HP 400 – 650 nm 3 dB 5 ms > 100 mW
Geometrische Abmessungen Basis (Projektor-Kamera) Messvolumen (MV) Abstand des MV von der Basis Winkel zwischen dem zentralen Sichtstrahl und der Hauptbe- leuchtungsrichtung	1,5 cm 5 × 5 × 5 cm ³ 10 cm $\approx 8,5^\circ$

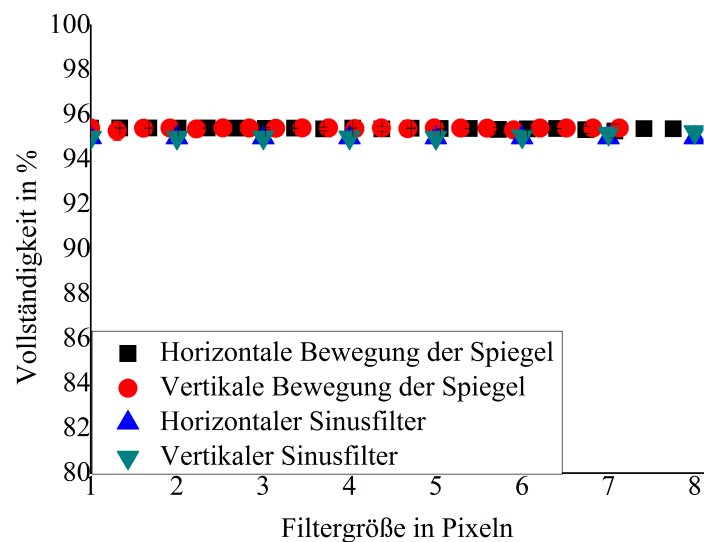
Tabelle 4: Spezifikation des miniaturisierten Aufbaus zur 3D-Messung mit wiederholbaren Speckles.

A.5 Vergleich der experimentellen und numerischen Speckle-Reduktion

Es war möglich, die Bewegung der Spiegel in Filtergrößen analog zur numerischen Filterung umzurechnen. In den folgenden Darstellungen werden die Ergebnisse bis zur maximalen experimentellen "Filtergröße" zusammengefasst.

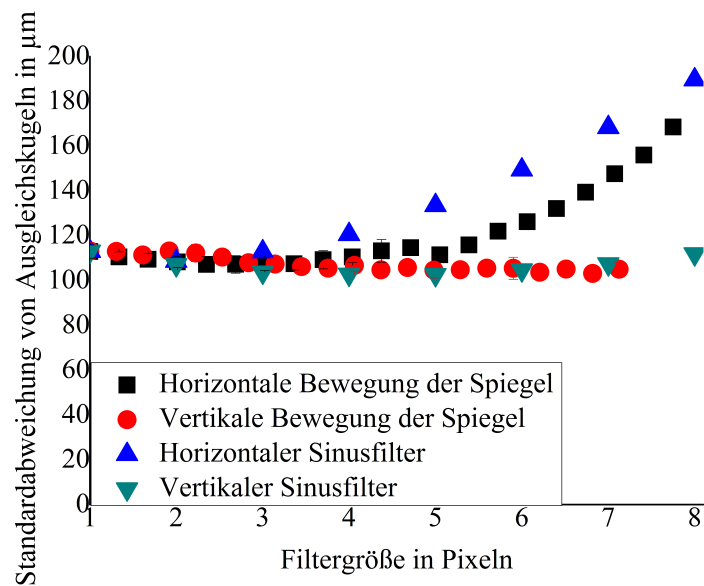


a)

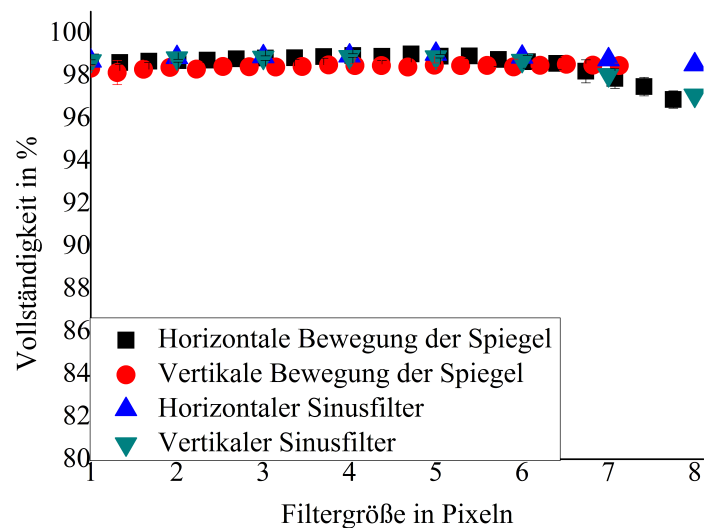


b)

Abbildung 83: a) Standardabweichung der Ebenenrekonstruktionen von Ausgleichsebenen, experimentelle und numerische Filter. b) Vollständigkeit der Ebenenrekonstruktionen, experimentelle und numerische Filter.



a)



b)

Abbildung 84: a) Standardabweichung der Kugelrekonstruktionen von Ausgleichskugeln, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter. b) Vollständigkeit der Kugelrekonstruktionen, experimentelle und numerische Filter.

A.6 Weitere Filter zur Reduktion subjektiver Speckles

An dieser Stelle sollen einige Ergebnisse von alternativen Filtern vorgestellt werden, die keinen Platz in der Arbeit gefunden haben, aber trotzdem interessante Aussagen lieferten. Insbesondere handelte es sich um den "klassischen" zweidimensionalen Gaußfilter sowie Medianfilter, die ebenfalls linear oder flächig verwendet wurden. Zuerst soll der Kontrastverlauf für das Summenbild aus 300 statistisch unabhängigen Einzelaufnahmen bewertet

werden. Dazu wurde dieses mit den genannten Filtern verschiedener Größe bearbeitet und der sich ergebende Kontrast über die Filtergröße aufgetragen.

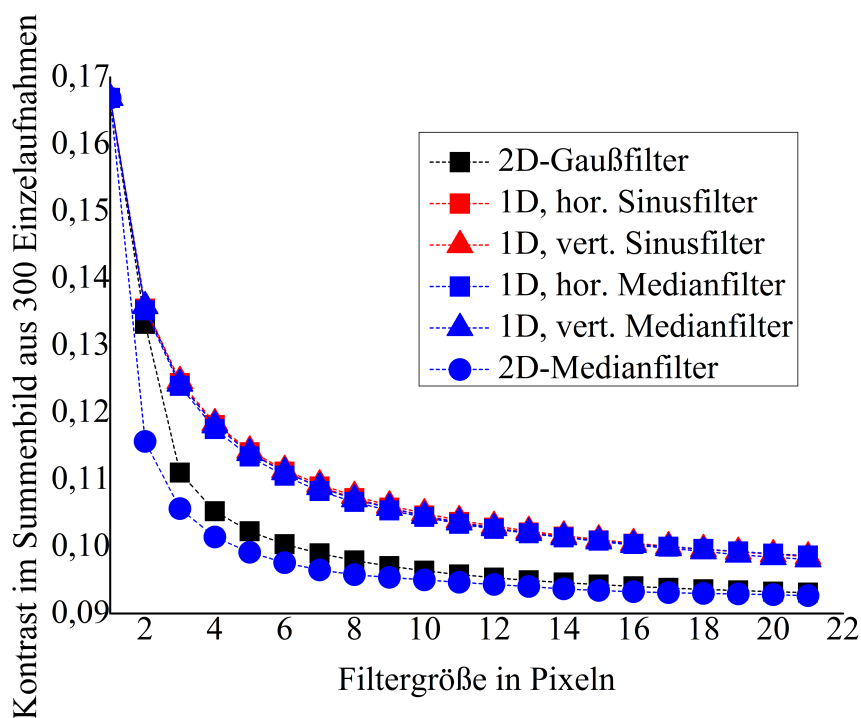
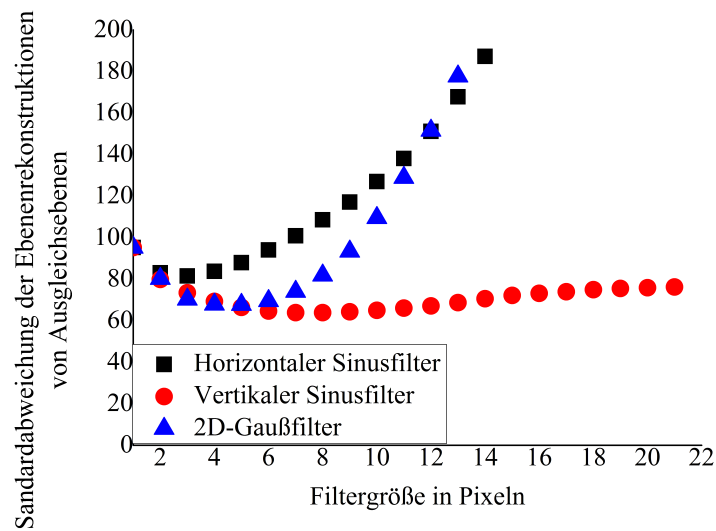


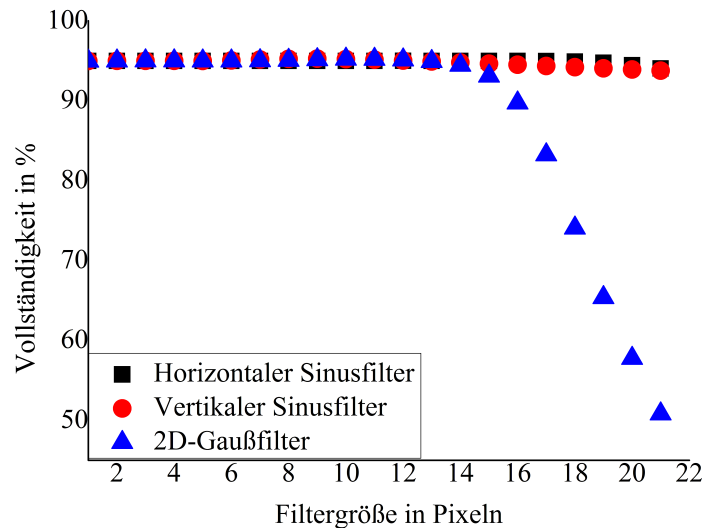
Abbildung 85: Das aus den 300 Einzelaufnahmen erstellte Summenbild wurde mit verschiedenen Filtern bearbeitet, und der Kontrast wurde über die Filtergröße aufgetragen. Verwendet wurden ein zweidimensionaler Gaußfilter, zwei linearen Sinus-Filter und drei Medianfilter, wobei wieder horizontal und vertikal, aber auch zweidimensional gefiltert wurde. Die Ausdehnung der 2D-Filter war symmetrisch in beide Raumrichtungen.

Es ist zu erkennen, dass die zweidimensionalen Filter einen schnelleren Abfall des Kontrastes verursachten. Da bei ihrer Verwendung auch mehr Pixel herangezogen wurden, war diese Feststellung nicht überraschend. Die linearen Medianfilter führten zu einem sehr ähnlichen Kontrastverlauf wie die linearen Sinusfilter. Ein Vorzug für eine mittelungsbasierte Filterung oder sogar lineare Filter war aus diesen Grafiken noch nicht abzuleiten. Auch die 3D-Rekonstruktionen, die unter Verwendung von 2D-Gaußfiltern gewonnen wurden, konnten zum Vergleich mit den linearen Sinusfiltern herangezogen werden. In den folgenden Abbildung sind die Standardabweichung der Ebenen- bzw. Kugelrekonstruktionen und deren Vollständigkeit dargestellt.

Der 2D-Gaußfilter lieferte für kleine ($< \text{Filtergröße } 6$) Filter ähnlich gute Ergebnisse wie der lineare Sinusfilter in vertikaler Richtung, näherte sich für größere Filter aber dem Verlauf der horizontalen Filterung an, wobei sowohl die Präzision als auch die Vollständigkeit stark abnahmen. Da eine flächige Filterung wesentlich rechenaufwendiger ist als eine lineare, war die mögliche Verbesserung durch einen 2D-Gaußfilter eingeschränkt. Es wurden auch andere 2D-Filter auf Mittelungsbasis getestet, diese lieferten allerdings ähnliche



a)

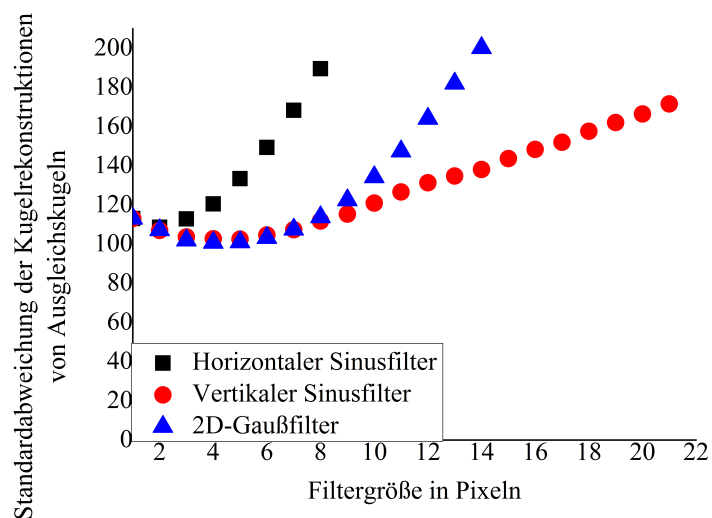


b)

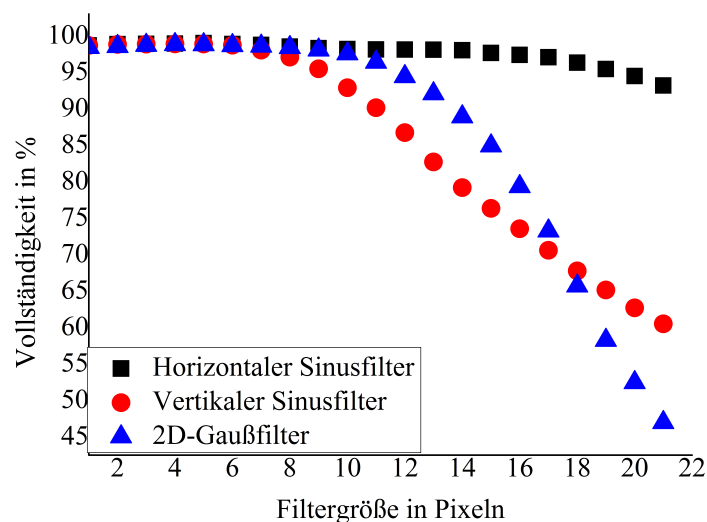
Abbildung 86: a) Standardabweichung der Ebenenrekonstruktionen von Ausgleichsebenen, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter. b) Vollständigkeit der Ebenenrekonstruktionen, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter.

Ergebnisse, daher wurde hier nur dieser Filter exemplarisch dargestellt. Unterschiedliche räumliche Ausdehnungen der Filter in horizontaler und vertikaler Richtung wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Wie im Ausblick geschildert, könnten solche Untersuchungen jedoch zu noch besseren Ergebnissen führen.

Auch die Bilder, die unter Verwendung der Medianfilter erstellt wurden, wurden zur 3D-Rekonstruktion herangezogen. Analog zu den Ergebnissen des 2D-Gaußfilters sind in den folgenden Abbildungen die sich ergebenden Standardabweichung der Ebenen- bzw. Kugelrekonstruktionen und deren Vollständigkeit dargestellt.



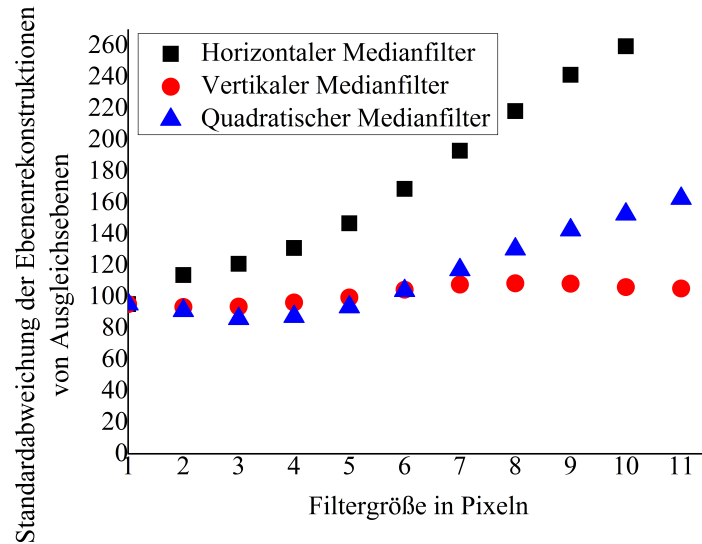
a)



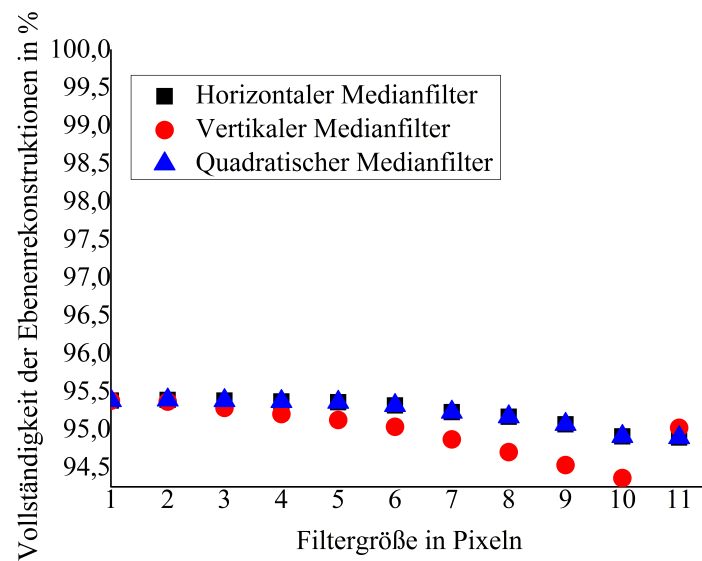
b)

Abbildung 87: a) Standardabweichung der Kugelrekonstruktionen von Ausgleichskugeln, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter. b) Vollständigkeit der Kugelrekonstruktionen, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter.

Verbesserung von Präzision und Vollständigkeit beim Einsatz von Medianfiltern war deutlich geringer als beim Einsatz von mittelungsbasierten Filtern. Da bei der Medianfilterung Werte von verschiedenen Pixel vertauscht wurden, je nach dem, ob der von ihnen gegebene Grauwert dem Median des Filterbereiches entsprach oder nicht, waren diese Ergebnisse letztlich erwartbar. Es war davon auszugehen, dass der Tausch von Grauwerten in den Ansichten beider Kameras schon bei kleinen Filtergrößen die Zuordengenaugigkeit erheblich störte.

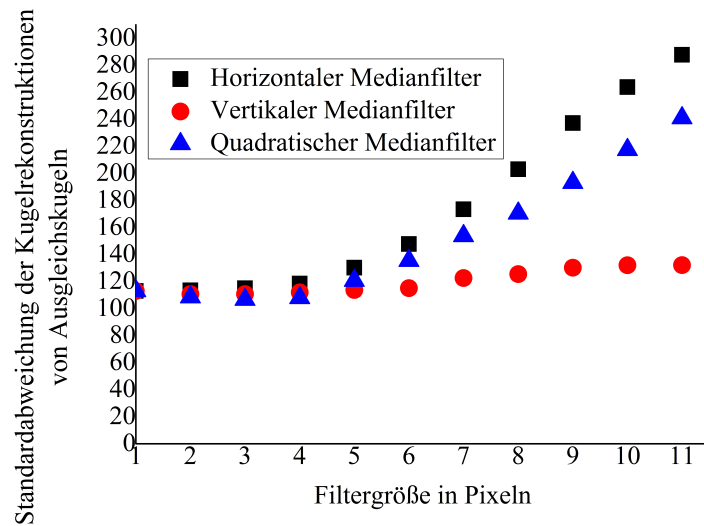


a)

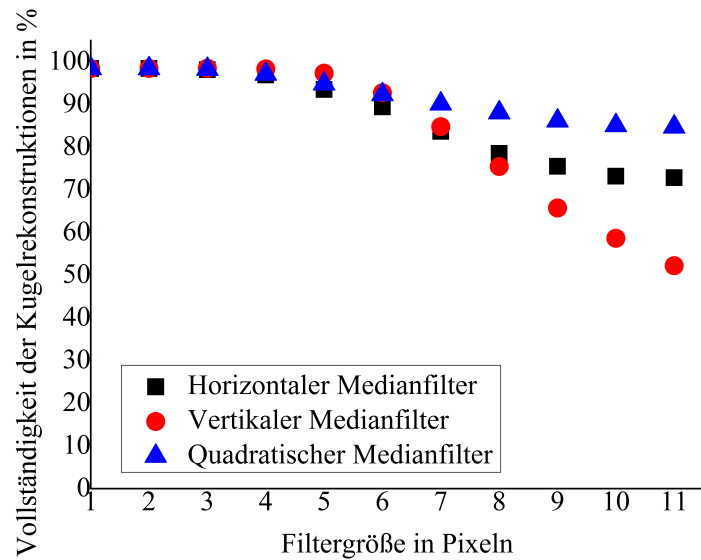


b)

Abbildung 88: a) Standardabweichung der Ebenenrekonstruktionen von Ausgleichsebenen, Medianfilter. b) Vollständigkeit der Ebenenrekonstruktionen, Medianfilter.



a)



b)

Abbildung 89: a) Standardabweichung der Kugelrekonstruktionen von Ausgleichskugeln, Medianfilter. b) Vollständigkeit der Kugelrekonstruktionen, Medianfilter.

Literatur

- [1] ORJI, NDUBUISI G, MUSTAFA BADAROGLU, BRYAN M BARNES, CARLOS BEITIA, BENJAMIN D BUNDAY, UMBERTO CELANO, REGIS J KLINE, MARK NEISSER, Y OBENG und AE VLADAR: *Metrology for the next generation of semiconductor devices*. Nature electronics, 1(10):532–547, 2018.
- [2] YANG, LEI, EN LI, YIJIAN MAO und ZIZE LIANG: *A novel 3D measurement method of welding workpiece for robot off-line programming*. In: *2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Seiten 3835–3840. IEEE, 2017.
- [3] SHI, JUN-YU, YUAN LI, LONG-FEI ZHUANG, XIAO ZHANG, LING-FENG FAN und HONG-CHANG LAI: *Accuracy assessment of a novel semiautomatic method evaluating bone grafts around the dental implant: an in vitro and ex vivo study*. Scientific Reports, 10(1):1–8, 2020.
- [4] YU, FANG, LEI ZENG, DING PAN, XINLEI SUI und JUYU TANG: *Evaluating the accuracy of hand models obtained from two 3D scanning techniques*. Scientific Reports, 10(1):1–10, 2020.
- [5] BUCK, URSULA, KIRSTEN BUSSE, LORENZO CAMPANA und CHRISTIAN SCHYMA: *Validation and evaluation of measuring methods for the 3D documentation of external injuries in the field of forensic medicine*. International journal of legal medicine, 132(2):551–561, 2018.
- [6] REMONDINO, FABIO, SABRY EL-HAKIM, EMMANUEL BALTSAVIAS, MICHEL PICARD und LAZAROS GRAMMATIKOPOULOS: *Image-based 3D modeling of the Erechtheion, Acropolis of Athens*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5):1083–1091, 2008.
- [7] REMONDINO, FABIO und ALESSANDRO RIZZI: *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites- techniques, problems and example*. Applied Geomatics, 2(3):85–100, 2010.
- [8] LUHMANN, T., M. CHIZHOVA, D. GORKOVCHUK, H. HASTEDT und N. CHACHAVA, N. ABD LEKVEISHVIKI: *Combination of terrestrial laserscanning, UAV and close-range Photogrammetry for 3D reconstruction of complex churches in Georgia*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2019.

- [9] WANG, QIAN und MIN-KOO KIM: *Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018*. Advanced Engineering Informatics, 39:306–319, 2019.
- [10] RICHARDS-RISETTO, HEATHER: *What can GIS+ 3D mean for landscape archaeology?* Journal of Archaeological Science, 84:10–21, 2017.
- [11] NÜCHTER, ANDREAS, M BLEIER, JOHANNES SCHAUER und PETER JANOTTA: *Improving Google’s cartographer 3D mapping by continuous-time SLAM*. In: *Proceedings of the 7th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2017: “3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures”*, ser. ISPRS Archives Photogrammetry and Remote Sensing Spatial Inf. Sci., Seiten 543–549, 2017.
- [12] HÄUSLER, GERD und SVENJA Ettl: *Limitations of optical 3D sensors*. In: *Optical measurement of surface topography*, Seiten 23–48. Springer, 2011.
- [13] WILLOMITZER, FLORIAN, SVENJA Ettl, CHRISTIAN FABER und GERD HÄUSLER: *Single-shot three-dimensional sensing with improved data density*. Applied Optics, 54(3):408–417, Jan 2015.
- [14] HEIST, STEFAN, PATRICK DIETRICH, MARTIN LANDMANN, PETER KÜHMSTEDT, GUNTHER NOTNI und ANDREAS TÜNNERMANN: *GOBO projection for 3D measurements at highest frame rates: a performance analysis*. Light: Science & Applications, 7(1):1–13, 2018.
- [15] HEIST, STEFAN, CHEN ZHANG, KARL REICHWALD, PETER KÜHMSTEDT, GUNTHER NOTNI und ANDREAS TÜNNERMANN: *5D hyperspectral imaging: fast and accurate measurement of surface shape and spectral characteristics using structured light*. Optics Express, 26(18):23366–23379, 2018.
- [16] KAKUE, TAKASHI, YUTAKA ENDO, TAKASHI NISHITSUJI, TOMOYOSHI SHIMOBABA, NOBUYUKI MASUDA und TOMOYOSHI ITO: *Digital holographic high-speed 3D imaging for the vibrometry of fast-occurring phenomena*. Scientific reports, 7(1):1–10, 2017.
- [17] WU, ZHOUIE, WENBO GUO und QICAN ZHANG: *High-speed three-dimensional shape measurement based on shifting Gray-code light*. Optics Express, 27(16):22631–22644, 2019.
- [18] HEIST, STEFAN, PETER KÜHMSTEDT, ANDREAS TÜNNERMANN und GUNTHER NOTNI: *Experimental comparison of aperiodic sinusoidal fringes and phase-shifted*

- sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement*. Optical Engineering, 55(2):024105, 2016.
- [19] WIEGMANN, AXEL, HOLGER WAGNER und RICHARD KOWARSCHIK: *Human face measurement by projecting bandlimited random patterns*. Optics Express, 14(17):7692–7698, 2006.
- [20] HEIST, STEFAN, ANDREAS MANN, PETER KÜHMSTEDT, PETER SCHREIBER und GUNTHER NOTNI: *Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement*. Optical Engineering, 53(11):112208, 2014.
- [21] SCHAFFER, MARTIN, MARCUS GROSSE, BASTIAN HARENDT und RICHARD KOWARSCHIK: *Coherent pattern projection for highspeed 3D shape measurements*. In: *Fringe 2013*, Seiten 683–688. Springer, 2014.
- [22] SCHAFFER, MARTIN: *Strerophotgrammetrie mit strukturierter Beleuchtung für die schnelle 3D-Vermessung*. Doktorarbeit, Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2013.
- [23] GOODMAN, J. W.: *Laser Speckle and Related Phenomena*, Kapitel 2, Seiten 9–76. Springer-Verlag, 1984.
- [24] HAOUAT, MOHAMED, JORGE GARCIA-SUCERQUIA, ABDELHAMID KELLOU und PASCAL PICART: *Reduction of speckle noise in holographic images using spatial jittering in numerical reconstructions*. Optics letters, 42(6):1047–1050, 2017.
- [25] BOBROW, TAYLOR L, FAISAL MAHMOOD, MIGUEL INSERNI und NICHOLAS J DURR: *DeepLSR: a deep learning approach for laser speckle reduction*. Biomedical optics express, 10(6):2869–2882, 2019.
- [26] YAMADA, HIROTAKA, KENGO MORIYASU, HIROTO SATO und HIDEKAZU HATANAKA: *Effect of incidence/observation angles and angular diversity on speckle reduction by wavelength diversity in laser projection systems*. Optics Express, 25(25):32132–32141, 2017.
- [27] CHEN, HSUAN-AN, JUI-WEN PAN und ZU-PO YANG: *Speckle reduction using deformable mirrors with diffusers in a laser pico-projector*. Optics Express, 25(15):18140–18151, 2017.
- [28] TONG, ZHAOMIN, WENJIANG SHEN, SHAOHUA SONG, WENZHI CHENG, ZHUO CAI, YIFEI MA, LEI WEI, WEIGUANG MA, LIANTUAN XIAO, SUOTANG JIA et al.:

- Combination of micro-scanning mirrors and multi-mode fibers for speckle reduction in high lumen laser projector applications.* Optics Express, 25(4):3795–3804, 2017.
- [29] PAUWELS, JAËL und GUY VERSCHAFFELT: *Speckle reduction in laser projection using microlens-array screens.* Optics Express, 25(4):3180–3195, 2017.
- [30] PRUSS, CHRISTOF, GORAN BASTIAN BAER, JOHANNES SCHINDLER und WOLFGANG OSTEN: *Measuring aspherics quickly: tilted wave interferometry.* Optical Engineering, 56(11):111713, 2017.
- [31] LIU, YUE, SHUJUN HUANG, ZONGHUA ZHANG, NAN GAO, FENG GAO und XIANGQIAN JIANG: *Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry.* Scientific reports, 7(1):1–8, 2017.
- [32] HÄUSLER, GERD, CHRISTIAN FABER, EVELYN OLESCH und SVENJA Ettl: *Deflectometry vs. interferometry.* In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspections VIII*, Band 8788, Seite 87881C. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [33] ZHANG, SONG und PEISEN S HUANG: *Novel method for structured light system calibration.* Optical Engineering, 45(8):083601, 2006.
- [34] LEGARDA-SÁENZ, RICARDO, THORSTEN BOTHE und WERNER P.O. JÜPTNER: *Development of a high-precision surface metrology system using structured light projection.* Optical Engineering, 43(2):464–472, 2004.
- [35] WONG, EUGENE, STEFAN HEIST, CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Calibration of an array projector used for high-speed three dimensional shape measurements using a single camera.* Optical Engineering, 57(26):7570–7578, 2018.
- [36] DEJA, MARIUSZ, MICHAŁ DOBRZYŃSKI und MARCIN RYMKIEWICZ: *Applications of Reverse Engineering Technology in Part Design for Shipbuilding Industry.* Polish Maritime Research, 26(2):126–133, 2019.
- [37] WANG, QIAN und MIN-KOO KIM: *Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018.* Advanced Engineering Informatics, 39(11):306–319, 2019.
- [38] WILSON, LYN, ALASTAIR RAWLINSON, ADAM FROST und JAMES HEPHER: *3D digital documentation for disaster management in historic buildings: Applications*

- following fire damage at the Mackintosh building, The Glasgow School of Art. Journal of Cultural Heritage*, 31:24–32, 2018.
- [39] PEDROLI, ELISA, ROSELLA DIGILIO, COSIMO TUENA, JUAN V DURÁ-GIL, FRANCO CERNIGLIARO, GUISEPPE RIVA und PIETRO CIORESSO: *The use of 3D body scanner in medicine and psychology: a narrative review*. In: *International Symposium on Pervasive Computing Paradigms for Mental Health*, Seiten 74–83. Springer, 2018.
- [40] STANDARDIZATION, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR: *Uncertainty of measurement-Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)*. ISO, 2008.
- [41] HARTLEY, RICHARD und ANDREW ZISSERMAN: *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [42] LUHMANN, THOMAS: *Nahbereichsphotogrammetrie. 2., überarbeitete Auflage*. Wichmann Verlag, 2003.
- [43] FAUGERAS, OLIVIER, QUANG-TUAN LUONG und THEO PAPADPOULO: *The Geometry of Multiple Images*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2001.
- [44] DORSCH, RAINER G., GERD HÄUSLER und JÜRGEN M. HERMANN: *Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement*. *Applied Optics*, 33(7):1306–1314, Mär 1994.
- [45] HÄUSLER, GERD, CHRISTIAN FABER, FLORIAN WILLOMITZER und PHILLIP DIENSTBIER: *Why can't we purchase a perfect single-shot 3D-sensor?* DGaO Proceedings, 2012.
- [46] WILLOMITZER, FLORIAN: *Single-Shot 3D Sensing Close to Physical Limits and Information Limits*. Springer, 2019.
- [47] GROSSE, MARCUS: *Untersuchungen zur korrelationsbasierten Punktzuordnungsgenauigkeit in der stereophotogrammetrischen 3D-Objektvermessung unter Verwendung von Sequenzen strukturierter Beleuchtung*. Doktorarbeit, Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2012.
- [48] HARENDT, BASTIAN: *3D-Formvermessung dynamischer Szenen mithilfe adaptiver raumzeitlicher Korrelation*. Doktorarbeit, Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2015.

- [49] BABOVSKY, HOLGER: *Zur Anwendung der digitalen Holographie in der Mikroskopie und Formvermessung*. Doktorarbeit, Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2011.
- [50] GROSSE, MARCUS, MARTIN SCHAFFER, BASTIAN HARENDT und RICHARD M KOWARSCHIK: *Camera calibration using time-coded planar patterns*. *Optical Engineering*, 51(8):083604, 2012.
- [51] ZHANG, ZHENGYOU: *A flexible new technique for camera calibration*. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22, 2000.
- [52] HARTLEY, R.I.: *In defense of the eight-point algorithm*. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on*, 19(6):580–593, 1997.
- [53] FUSIELLO, ANDREA, EMANUELE TRUCCO und ALESSANDRO VERRI: *A compact algorithm for rectification of stereo pairs*. *Machine vision applications*, 12(1):16–22, 2000.
- [54] ZHANG, SONG: *Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques*. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(2):149–158, 2010.
- [55] WIEGMANN, AXEL: *Gesichtsvermessung mittels Stereophotogrammetrie*. Diplomarbeit, Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2005.
- [56] SCHAFFER, MARTIN, MARCUS GROSSE, BASTIAN HARENDT und RICHARD KOWARSCHIK: *High-speed three-dimensional shape measurements of objects with laser speckles and acousto-optical deflection*. *Optics Letters*, 36(16):3097–3099, Aug 2011.
- [57] HARENDT, BASTIAN, MARCUS GROSSE, MARTIN SCHAFFER und RICHARD KOWARSCHIK: *3D shape measurement of static and moving objects with adaptive spatiotemporal correlation*. *Applied Optics*, 53(31):7507–7515, 2014.
- [58] DIETRICH, PATRICK, STEFAN HEIST, MARTIN LANDMANN, PETER KÜHMSTEDT und GUNTHER NOTNI: *BICOS—an algorithm for fast real-time correspondence search for statistical pattern projection-based active stereo sensors*. *Applied Sciences*, 9(16):3330, 2019.
- [59] LANDMANN, MARTIN, STEFAN HEIST, ANIKA BRAHM, SIMON SCHINDWOLF, PETER KÜHMSTEDT und GUNTHER NOTNI: *3D shape measurement by thermal fringe projection: optimization of infrared (IR) projection parameters*. In: *Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VII*, Band 10667, Seite 1066704. International Society for Optics and Photonics, 2018.

-
- [60] BRÄUER-BURCHARDT, CHRISTIAN, MATTHIAS HEINZE, INGO SCHMIDT, PETER KÜHMSTEDT und GUNTHER NOTNI: *Underwater 3D surface measurement using fringe projection based scanning devices*. *Sensors*, 16(1):13, 2016.
- [61] MENNA, FABIO, PANAGIOTIS AGRAFIOTIS und ANDREAS GEORGOPOULOS: *State of the art and applications in archaeological underwater 3D recording and mapping*. *Journal of Cultural Heritage*, 33:231–248, 2018.
- [62] SCHMALZ, CHRISTOPH, FRANK FORSTER, ANTON SCHICK und ELLI ANGELOPOULOU: *An endoscopic 3D scanner based on structured light*. *Medical image analysis*, 16(5):1063–1072, 2012.
- [63] TSAI, MING-JUNE und CHUAN-CHENG HUNG: *Development of a high-precision surface metrology system using structured light projection*. *Measurement*, 38(3):236–247, 2005.
- [64] CHEN, XIAOBO, JUNTONG XI, YE JIN und JIN SUN: *Accurate calibration for a camera–projector measurement system based on structured light projection*. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3-4):310–319, 2009.
- [65] LI, ZHONGWEI und YUSHENG SHI: *Accurate calibration method for a structured light system*. *Optical Engineering*, 47(5):053604, 2008.
- [66] WONG, EUGENE, ANDREAS WALTER STARK, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *High-density three-dimensional measurements through multilayer perceptron calibration and statistical band-limited patterns*. *Optical Engineering*, 57(7):070501, 2018.
- [67] WONG, EUGENE, STEFAN HEIST, CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT, ANDREAS STARK, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Optimization-based extrinsic calibration of a three-dimensional sensor composed of an array projector and a single camera*. *Optical Engineering*, 58(10):104109, 2019.
- [68] WONG, EUGENE, STEFAN HEIST, CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT, ANDREAS STARK, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Extrinsic calibration of a 3D sensor based on an array projector and a single camera*. In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*, Band 11056, Seite 1105617. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [69] DAINTY, J. C., A. E. ENNOS, M. FRANCON, J. W. GOODMAN, T. S. MCKECHNIE und G. PERRY: *Laser Speckle and Related Phenomena*. Springer-Verlag, 1984.

- [70] PEARSON, KARL: *The problem of the random walk*. Nature, 72(1867):342–342, 1905.
- [71] WEISS, GEORGE H und JAMES E KIEFER: *The Pearson random walk with unequal step sizes*. Journal of Physics A: Mathematical and General, 16(3):189–, 1983.
- [72] GOODMAN, JOSEPH: *Speckle Phenomena in Optics; Theory and Applications*. Roberts and Company Publishers, 2007.
- [73] HAMED, AM: *Numerical speckle images formed by diffusers using modulated conical and linear apertures*. Journal of modern Optics, 56(10):1174–1181, 2009.
- [74] LIM, DARYL, KENGYEH K CHU und JEROME MERTZ: *Wide-field fluorescence sectioning with hybrid speckle and uniform-illumination microscopy*. Optics letters, 33(16):1819–1821, 2008.
- [75] DERTINGER, THOMAS, RYAN COLYER, GOPAL IYER, SHIMON WEISS und JÖRG ENDERLEIN: *Fast, background-free, 3D super-resolution optical fluctuation imaging (SOFI)*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(52):22287–22292, 2009.
- [76] WEIGEL, DANIEL, LARS SCHMIDL, ANDREAS WALTER STARK, HOLGER BABOVSKY, CHRISTIAN GEIS und RICHARD KOWARSCHIK: *Verfahren und Vorrichtung zur hochaufgelösten Fluoreszenzmikroskopie*. Patentantrag, (DE) 10 2018 124 984.5, Angemeldet durch die Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2018.
- [77] TONG, ZHAOMIN und XUYUAN CHEN: *Speckle contrast for superposed speckle patterns created by rotating the orientation of laser polarization*. JOSA A, 29(10):2074–2079, 2012.
- [78] LIU, CHIEN-SHENG, YU-CHING CHANG, KUN-WEI LIN und PO-HENG LIN: *Speckle reduction in laser imaging applications using rotating magneto-optical disk*. JOSA A, 31(1):16–20, 2014.
- [79] SVENSEN, ØYVIND, XUYUAN CHEN, MUHAMMAD NADEEM AKRAM et al.: *Speckle reduction in laser projection displays through angle and wavelength diversity*. Applied optics, 55(6):1267–1274, 2016.
- [80] GEORGE, NICHOLAS und ATUL JAIN: *Speckle reduction using multiple tones of illumination*. Applied optics, 12(6):1202–1212, 1973.
- [81] KARTASHOV, VLADIMIR und MUHAMMAD NADEEM AKRAM: *Speckle suppression in projection displays by using a motionless changing diffuser*. JOSA A, 27(12):2593–2601, 2010.

-
- [82] EGGE, SIGBJØRN VINDENES, MN AKRAM, V KARTASHOV, K WELDE, Z TONG, U ÖSTERBERG und A AKSNES: *Sinusoidal rotating grating for speckle reduction in laser projectors*. Optical Engineering 1/4 (8), 83202, 2011.
- [83] STARK, ANDREAS, EUGENE WONG, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Subjective speckle suppression for 3D measurement using one-dimensional numerical filtering*. Optical Engineering, 58(34):9473–9483, 2019.
- [84] STARK, ANDREAS, EUGENE WONG, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Projektion von Laser-Speckles zur 3D-Vermessung von Oberflächen*. Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik-Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2020, 19:14–21, 2020.
- [85] EGGE, SIGBJØRN VINDENES, ULF ÖSTERBERG und ASTRID AKSNES: *Speckle contrast of the sum of N partially correlated speckle patterns*. JOSA A, 29(6):1188–1198, 2012.
- [86] BABOVSKY, HOLGER und RICHARD KOWARSCHIK: *Verfahren und Vorrichtung zur Mustererzeugung zur 3D-Messung von Objekten*. Patentantrag, (DE) 10 2017 007 191.8, Angemeldet durch die Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2018.
- [87] STARK, ANDREAS, EUGENE WONG, DANIEL WEIGEL, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Statistical features of speckle-patterns for stereo photogrammetric 3D-reconstruction*. DGaO Proceedings, 2016.
- [88] HECHT, EUGENE: *Optics, 5e*. Pearson Education India, 2002.
- [89] STARK, ANDREAS WALTER, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Verfahren zur 3D-Vermessung von Objekten durch kohärente Beleuchtung*. Patentantrag, (DE) 10 2017 007 189.6, Angemeldet durch die Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2017.
- [90] CRIMMINS, THOMAS R: *Geometric filter for speckle reduction*. Applied optics, 24(10):1438–1443, 1985.
- [91] LEE, JONG-SEN, L JURKEVICH, PIET DEWAELE, PATRICK WAMBACQ und A OOSTERLINCK: *Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review*. Remote sensing reviews, 8(4):313–340, 1994.
- [92] TOUZI, RIDHA: *A review of speckle filtering in the context of estimation theory*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11):2392–2404, 2002.

- [93] JOEL, TAYLOR und RAGHUPATHY SIVAKUMAR: *An extensive review on Despeckling of medical ultrasound images using various transformation techniques*. Applied Acoustics, 138:18–27, 2018.
- [94] MORÉ, JORGE J: *The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory*. Springer, 1978.
- [95] HEIST, STEFAN, PETER KÜHMSTEDT, ANDREAS TÜNNERMANN und GUNTHER NOTNI: *BRDF-dependent accuracy of array-projection based 3D sensors*. Applied Optics, 56:2162–2170, 2017.
- [96] LANDMANN, MARTIN, HENRI SPECK, PATRICK DIETRICH, STEFAN HEIST, PETER KÜHMSTEDT und GUNTHER NOTNI: *Fast 3D Shape Measurement of Transparent Glasses by Sequential Thermal Fringe Projection*. In: *EPJ Web of Conferences*, Band 238, Seite 06008. EDP Sciences, 2020.
- [97] YALI, DONG, ZHAO JIAQING und PAN BING: *Ultraviolet 3D digital image correlation applied for deformation measurement in thermal testing with infrared quartz lamps*. Chinese Journal of Aeronautics, 33(3):1085–1092, 2020.
- [98] IMKAMP, DIETRICH und RAINER TUTSCH: *Koordinatenmesstechnik, taktil und optisch—schon immer digital*. tm - Technisches Messen, 86(9):450–463, 2019.
- [99] KARLSSON, BJÖRN und CARL G-RIBBING: *Optical constants and spectral selectivity of stainless steel and its oxides*. Journal of Applied Physics, 53(9):6340–6346, 1982.
- [100] CHEN, BIN und BING PAN: *Camera calibration using synthetic random speckle pattern and digital image correlation*. Optics and Lasers in Engineering, 126:105919, 2020.
- [101] STARK, ANDREAS WALTER, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Verfahren zur Vermessung unkooperativer Oberflächen*. Patentantrag, (DE) 10 2021 001 336.2, Angemeldet durch die Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2021.
- [102] STARK, ANDREAS WALTER, DANIEL WEIGEL, EUGENE WONG, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Verfahren zur strukturierten Beleuchtung*. Patentantrag, (DE) 10 2018 004 078.0, Angemeldet durch die Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2018.

- [103] STARK, ANDREAS, EUGENE WONG, DANIEL WEIGEL, HOLGER BABOVSKY und RICHARD KOWARSCHIK: *Repeatable speckle projector for single-camera three-dimensional measurement*. *Optical Engineering*, 57(12):120501, 2018.
- [104] HOPPE, CHRISTOPH, JENS DÖGE, PETER REICHEL, PATRICK RUSSELL, ANDREAS REICHEL und PETER SCHNEIDER: *A High Speed Asynchronous Multi Input Pipeline for Compaction and Transfer of Parallel SIMD Data*. In: *2018 24th IEEE International Symposium on Asynchronous Circuits and Systems (ASYNC)*, Seiten 86–92. IEEE, 2018.
- [105] BORN, MAX und EMIL WOLF: *Principles of Optics*. Cambridge University Press, 7th Auflage, 2010.
- [106] SCHMIDT, OLIVER A.: *Beam Propagation Ratio Measurement using Optical Correlation Filters*. Studienarbeit, Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2008. Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Abbildungsverzeichnis

1	Skizze zum Zustandekommen der Höhenauflösung eines Triangulationssystems. Die gepunktete Linie repräsentiert die Hauptblickrichtung des Referenzdetektors. Dieser kann durch ein weiteres abbildendes System oder durch einen kalibrierten Projektor gegeben sein. Der Beobachtungswinkel u erlaubt die Bestimmung der Präzision δz	6
2	Abbildung eines Bildpunktes im Lochblendenmodell. Alle Sehstrahlen gehen dabei durch dasselbe Projektionszentrum.	6
3	Rekonstruktion der 3D -Koordinaten des Objektpunktes O durch Triangulation in der Stereophotogrammetrie.	9
4	Abbildung des Sehstrahls der ersten Kamera in die Ansicht der zweiten Kamera als sogenannte Epipolarlinie. Schwarz dargestellt ist ein falsch bzw. fehlerhaft zugeordneter Bildbereich, der zur Rekonstruktion falscher 3D -Koordinaten führt. Die übrigen Bildpunkte, die für eine Korrespondenz in Frage kommen, da sie nahe oder auf der Epipolarlinie liegen, sind rot eingefärbt.	10
5	Stereoaufnahme einer Büste des Dichters Friedrich Schiller. Ein Pixel im Bild der ersten Kamera ist durch ein rotes Kreuz markiert. Die dazugehörige Epipolarlinie im Bild der zweiten Kamera ist ebenfalls rot markiert.	11
6	Darstellung von 4 Beispielen verschiedener Mustertypen: Streifenmuster a), aperiodische Sinusmuster b), bandbegrenzte Muster c), Speckle-Verteilung d).	11
7	Bilderstapel aus den Ansichten zweier Kameras. Die in Abbildung 5 gezeigte Büste wurde mit bandbegrenzten Mustern beleuchtet und pro Muster eine Stereo-Aufnahme erstellt.	12
8	Arbeitsprinzip der Kalibrierung eines Multi-Apertur-Projektors (MAAP) für die 3D -Messung mit nur einer Kamera.	13
9	Zusammensetzung des Phasors \mathbf{A} durch mehrere komplexe Teilvektoren \mathbf{a}_k in der komplexen Ebene.	15
10	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für ein vollständig ausgebildetes Speckle-Feld.	16
11	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Überlagerung zweier vollständig ausgebildeter Speckle-Felder mit unterschiedlichen Intensitätsverhältnissen.	18
12	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines einzelnen, sowie für die Überlagerung von 2, 4 und 12 vollständig ausgebildeten Speckle-Feldern mit gleichen Intensitätsverhältnissen.	19

13	Erzeugung objektiver Speckles im Abstand z durch die Beleuchtung einer Streuscheibe mit einem kohärenten Laserbündel des Durchmessers D	20
14	Entstehung subjektiver Speckles in der Brennebene im Abstand f von der Linse in Abhängigkeit vom Linsendurchmesser D_L durch die Abbildung einer kohärent beleuchteten Fläche.	22
15	Stereophotogrammetrischer Messaufbau zur Reduktion subjektiver Speckles durch die Verwendung beweglich angebrachter Spiegel.	28
16	Histogramm der Speckle-Verteilungen und der bandbegrenzten Muster (BBM) aus dem Experiment und theoretische Verteilungskurve für zwei inkohärent überlagerte Speckle-Verteilungen. Alle Werte wurden über die Grauwerte von 0 bis 255 aufgetragen und auf ihr Maximum (bei einer Graustufe < 255) normiert. Bei den Speckles besaßen 0,55% der Pixel den maximalen Grauwert und bei den BBM etwa 4,1%.	29
17	Kontrast in den Aufnahmen einer kohärent beleuchteten Ebene (Mittelung über 300 Einzelaufnahmen unter Beleuchtung mit objektiven Speckles) bei verschiedenen Spiegelbewegungsamplituden.	30
18	Standardabweichung der Rekonstruktionen einer Ebene und einer Kugel im Bezug zu Ausgleichsflächen in μm unter horizontaler bzw. vertikaler Bewegung der Spiegel bei verschiedenen Amplituden (links), Vollständigkeit in Abhängigkeit von der Bewegungsamplitude.(rechts)	32
19	Abweichung der Radien der Ausgleichskugeln vom Ausgangsradius ($15.000 \mu m$) aufgetragen über die Amplitude der Spiegelbewegungen in μrad	33
20	Filterfunktionen (links), Kontrast K der gefilterten Verteilungen über die Filtergröße	35
21	a) Kontrast von Speckle-Verteilungen mit verschiedenen Durchschnittsgrößen, von 1 bis 10 Pixeln, bei Filterung mit einem Sinus-Filter, b) Kontrast in dem Summenbild aus 300 Einzelaufnahmen unter Verwendung eines numerischen, horizontal orientierten und eines vertikal orientierten Sinus-Filters und Ausgleichsfunktionen.	37
22	Abweichung der Korrespondenzpartner in Pixeln und 3D-Rekonstruktionsabweichung in Abhängigkeit der Orientierung der Filterfunktion. Kameras nebeneinander (links), Kameras übereinander positioniert.	39
23	Verlauf der gemittelten Querschnitte der horizontal orientierten Stufe unter horizontaler, eindimensionaler Sinus-Filterung (links), Verlauf der gemittelten Querschnitte der vertikal orientierten Stufe unter horizontaler, eindimensionaler Sinus-Filterung (rechts).	41

24	Verlauf der gemittelten Querschnitte der horizontal orientierten Stufe unter vertikaler, eindimensionaler Sinus-Filterung (links), Verlauf der gemittelten Querschnitte der vertikal orientierten Stufe unter vertikaler, eindimensionaler Sinus-Filterung (rechts).	42
25	Verlauf der Standardabweichung der Rekonstruktionen der Ebene und der Kugel im Bezug zu Ausgleichsflächen in μm unter Verwendung numerischer Filter (links), Verlauf der Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken dieser Objekte (rechts).	44
26	Abweichung der Radien der Ausgleichskugeln vom Referenzradius ($15.000 \mu\text{m}$) aufgetragen über die Filtergröße.	45
27	Abweichung der Rekonstruktionen der Ebene und der Kugel von einer Referenzrekonstruktion (300 inkohärente bandbegrenzte Muster) in μm , für horizontale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	46
28	Abweichung der Rekonstruktionen der Ebene und der Kugel von einer Referenzrekonstruktion (300 inkohärente bandbegrenzte Muster) in μm , für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	46
29	Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera, für horizontale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	47
30	Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera, für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	47
31	Bild zweier gelappter Bauelemente (links), Büste des Dichters Friedrich Schillers (rechts). Die untersuchten Bereiche sind farblich markiert dargestellt	48
32	Punktrekonstruktionsabweichung der Kanten beim Vergleich der mit Speckle-Beleuchtung und Filterung erzeugten Rekonstruktionen zu der durch inkohärente Beleuchtung erzeugten Referenzrekonstruktion. Standardabweichung Abweichung der Punktwolken im ausgewiesenen Bereich in μm . (links), Vollständigkeit der rekonstruierten Bereiche in % (rechts)	49
33	Punktrekonstruktionsabweichung der Flächen A und B beim Vergleich der mit Speckle-Beleuchtung und Filterung erzeugten Rekonstruktionen zu der durch inkohärente Beleuchtung erzeugten Referenzrekonstruktion. Standardabweichung Abweichung der Punktwolken im ausgewiesenen Bereich in μm . (links), Vollständigkeit der rekonstruierten Bereiche in % (rechts) . .	50

34	Abweichung der Rekonstruktionen der geläpften Bauelemente von einer Referenzrekonstruktion (300 inkohärente bandbegrenzte Muster) in μm für horizontale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	51
35	Abweichung der Rekonstruktionen der geläpften Bauelemente von einer Referenzrekonstruktion (300 inkohärente bandbegrenzte Muster) in μm für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	51
36	Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera, für horizontale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	52
37	Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera, für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	53
38	Punktrekonstruktionsabweichung des Bereichs der linken Augenbraue und der Stirn der Büste Friedrich Schillers beim Vergleich der mit Speckle-Beleuchtung und Filterung erzeugten Rekonstruktionen zu der durch inkohärente Beleuchtung erzeugten Referenzrekonstruktion. Standardabweichung der Punktwolken im Bereich von Auge und Stirn in μm . (links), Vollständigkeit der rekonstruierten Bereiche in %(rechts)	54
39	Punktrekonstruktionsabweichung des Bereichs der linken Wange der Büste Friedrich Schillers beim Vergleich der mit Speckle-Beleuchtung und Filterung erzeugten Rekonstruktionen zu der durch inkohärente Beleuchtung erzeugten Referenzrekonstruktion. Standardabweichung der Punktwolken im Bereich der Wange in μm und Vollständigkeit der rekonstruierten Bereichs in %.	55
40	Räumliche Verteilung der Abweichung der Rekonstruktionen durch Speckle-Beleuchtung zur Rekonstruktion mit 300 inkohärenten Mustern aus Sicht der Führungskamera in μm . Dargestellt sind die Ergebnisse der horizontalen Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	55
41	Räumliche Verteilung der Abweichung der Rekonstruktionen durch Speckle-Beleuchtung zur Rekonstruktion mit 300 inkohärenten Mustern aus Sicht der Führungskamera in μm . Dargestellt sind die Ergebnisse der vertikalen Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	56

42	Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	56
43	Räumliche Verteilung des normierten, zeitlichen Korrelationskoeffizienten aus Sicht der Führungskamera für vertikale Sinus-Filterung mit den Filtergrößen 2 (links), 5 (mittig), und 21 (rechts).	57
44	Skizze des Prinzips der Vermessung einer reflektierenden Oberfläche im VIS (links), Skizze des Prinzips der Vermessung einer reflektierenden Oberfläche im UV, in dem diese streuend wirkt (rechts)	62
45	Beispielaufnahmen eines mit einem Schachbrett bedruckten Papiers, das auf eine Platte aufgeklebt wurde. Bild des Schachbrettmusters mit der ersten Kamera (links), Bild des Schachbrettmusters mit der zweiten Kamera (rechts)	62
46	Stereoaufnahme einer Miniaturbüste Friedrich Schillers unter Speckle-Beleuchtung bei 266 nm. Bild aus Sicht der ersten Kamera (links), Bild aus Sicht der zweiten Kamera (rechts).	63
47	Aufnahmen der zertifizierten Messobjekte unter Speckle-Beleuchtung bei 266 nm aus Sicht der Führungskamera. Bild einer Einzelaufnahme der Ebene (links), Bild einer Einzelaufnahme einer Kugel (rechts)	64
48	Normiertes Histogramm der beobachteten Speckle-Verteilung und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für $N = 9$ als Funktion der Grauwerte. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wurde an die Graustufen angepasst. . .	64
49	Standardabweichung der Rekonstruktionen bei verschiedenen Filtergrößen von Ausgleichsflächen in μm (links), Vollständigkeit der Rekonstruktionen bei verschiedenen Filtergrößen in % (rechts)	65
50	Bild des untersuchten Schaumlöffels aus Edelstahl.	67
51	Aufnahmen eines Schaumlöffels unter Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im VIS unter Verwendung des in Tabelle 2 spezifizierten Aufbaus. Der auch in der folgenden Untersuchung betrachtete Bereich ist rot eingerahmt. Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera (links), Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera (rechts)	68
52	Ermittelte Höhenkoordinaten in μm . Der auch in der folgenden Untersuchung betrachtete Bereich ist rot eingerahmt. Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,5 (links), Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,9 (rechts)	68

53	Aufnahmen eines Schaumlöffels unter Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im UV-Bereich (266 nm). Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera (links), Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera (rechts)	69
54	Ermittelte Höhenkoordinaten der Rekonstruktion des Schaumlöffels im UV in μm . Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,5 (links), Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,9 (rechts)	70
55	Standardabweichung der rekonstruierten Punktwolken von Ausgleichsflächen (Kugeln und Ebenen) in μm über der Filtergröße in Pixeln(links). Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken in % über der Filtergröße in Pixeln (rechts).	71
56	Skizze des untersuchten Satzes an Deckgläschen, die stufenartig zusammengelegt wurden. Jedes Deckgläschen hat eine Dicke von $175\ \mu\text{m} \pm 4\ \mu\text{m}$. . .	72
57	Aufnahmen des Satzes von Deckgläschen unter Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im VIS. Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera (links), Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera (rechts)	73
58	Ermittelte Höhenkoordinaten in μm . Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,5 (links), Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,9 (rechts) . . .	73
59	Durchschnittliche Abweichung der rekonstruierten Punkte von "Stufen", die aus der Position der Ausgleichsebene für den Bereich F_0 und der Herstellerangabe der Plättchendicke von $175\ \mu\text{m} \pm 4\ \mu\text{m}$ geschlossen wurden (Korrelationskoeffizient größer gleich 0,9) (links). Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken in den Bereichen F_1 bis F_5 in % (rechts).	75
60	Aufnahmen des Satzes von Deckgläschen unter Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im UV. Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera (links), Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera (rechts).	76
61	Aus den rekonstruierten Punktwolken ermittelten Höhenkoordinate in μm . Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,5 (links), Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,9 (rechts)	76
62	Durchschnittliche Abweichung der rekonstruierten Punkte von Stufen, die aus der Position der best passenden Ebene für den Bereich F_0 und der Herstellerangabe der Plättchendicke von $175\ \mu\text{m} \pm 4\ \mu\text{m}$ geschlossen wurde (Korrelationskoeffizient größer gleich 0,9).	77

63	a) Standardabweichung der rekonstruierten Punktwolken in den Bereichen F_1 bis F_5 in μm b) Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken in den Bereichen F_1 bis F_5 in % (Korrelationskoeffizient $> 0,9$). Alle Werte wurden über die Filtergröße aufgetragen.	78
64	Skizze der besprühten und unbesprühten Bereiche der Linse auf der Vor- und Rückseite. Die Halterung der Linse an drei Punkte ist schwarz angedeutet.	79
65	Aufnahmen einer halbseitig besprühten Linse in einer Halterung bei Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im VIS. Auch die Rückseite der Linse wurde halbseitig besprüht, allerdings um 90° zur Vorderseite gedreht. a) Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera b) Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera. Die Linse wurde von einer Halterung an drei Punkten gefasst.	80
66	Ermittelte Höhenkoordinaten der Linse in μm . Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,5 (links), Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,9 (rechts)	80
67	Aufnahmen einer halbseitig besprühten Linse in einer Halterung bei Beleuchtung mit einem Speckle-Muster im UV. Ansicht aus der Perspektive der ersten Kamera (links), Ansicht aus der Perspektive der zweiten Kamera (rechts)	81
68	Darsellung der ermittelten Höhenkoordinaten der Linse in μm . Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,5 (links), Höhenkarte bei einer Filterung von 10 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,9 (rechts)	81
69	Ermittelte Radien der Ausgleichskugeln aus den Rekonstruktionen der Linsen in μm	82
70	Verlaufe der Standardabweichung der rekonstruierten Punktwolken von Ausgleichskugeln in μm . Darstellung der Vollständigkeit der rekonstruierten Punktwolken in %.	83
71	Höhenkarte der Rekonstruktion der besprühten Linse durch Beleuchtung mit Speckles bei $266 nm$. Hier wurden zwei Sätze von je 90 Aufnahmen verwendet, wobei die Aufnahmezeit der zweiten Messung deutlich reduziert wurde, um den Bereich der Überbelichtung klein zu gestalten. Der Schwellwert des Korrelationskoeffizienten lag hier bei 0,4.	84

72	Messaufbau zur Erzeugung wiederholbarer Speckles. Über einen Galvanometerspiegel wurde jeweils eine Monomodens-Faser angesteuert. Diese beleuchtete die Streuscheibe wiederholbar an denselben Stellen und erzeugte so ein objektives Speckle-Muster. Durch jede Faser konnte auf diese Weise wiederholbar ein Muster generiert werden.	87
73	Streuscheibe und angeschlossene Fasern von der Seite (links), Streuscheibe und angeschlossene Fasern von vorn (mitte), Einzelaufnahme eines Speckle-Musters, das auf die Ebene projiziert wurde, über die das Volumen zur Messung mit nur einer Kamera kalibriert wurde (rechts).	87
74	Punktweise Abweichung der rekonstruierten Punktwolke einer Ebene von einer Ausgleichsebene unter Verwendung des Projektors wiederholbarer Speckles (a), eines Stereosystems mit Speckles (b) und eines Stereosystems mit bandbegrenzten Mustern (c) in Falschfarben. Diese Darstellung wurde unter [103] veröffentlicht.	88
75	Photographie des Objektes (Figur: Elster) (links), Höhenkarte des Objektes aus der Rekonstruktion mit nur einer Kamera unter Verwendung von 6 Mustern (mitte), Höhenkarte aus der Rekonstruktion unter Verwendung von 20 Mustern (rechts)	89
76	Skizze des miniaturisierten Aufbaus zur 3D -Messung mit wiederholbaren, objektiven Speckles. Im Messkopf sind sowohl die Kamera als auch die Projektionszentren untergebracht. Der Messkopf wird in Abbildung 77 a) vergrößert wiedergegeben.	90
77	Skizze des Messkopfes mit einer zur Beleuchtung verwendeten ("aktiven") Faser (links), Photographie des Messkopfes ohne Fasern mit einem 2€-Stück als Größenvergleich (mittig), Bild des Messkopfes mit angeschlossenen Fasern in einer Dreipunkthalterung (rechts).	90
78	Höhenkarte der Rekonstruktion der Ebene (links), Höhenkarte der Rekonstruktion der Kugel (rechts)	91
79	Speckles erzeugende Blenden. Kreisblende zur Erzeugung von einfachen Speckle-Verteilungen (links). Ringblende zur Erzeugung von Besselspeckles (rechts).	103
80	Beispiele der durch die Kreis- bzw. Ringblende erzeugten Speckle-Verteilungen. Einfaches Speckle-Muster (links) und Bessel-Speckle-Muster (rechts). . . .	103
81	Beispielhafte Darstellung durch Multiplikation von statistisch unabhängigen Ausgangsverteilungen erzeugten Speckle-Verteilungen. Zwei Multiplizierte "einfache" Speckle-Muster (links) und zwei multiplizierte Bessel-Speckle-Muster (rechts).	104

82	Beträge der normierten Amplitude der Faltung der Blenden mit sich selbst . Ortsfrequenzanteile der untersuchten vier Mustersorten. Dazu wurde ein Schnitt durch die Ortsfrequenzspektren gelegt und über 1000 Muster gemittelt. Dargestellt sind die Werte für einfache Speckle-Verteilungen und Bessel-Speckle-Verteilungen bis zur durch die Blende vorgegeben Grenzfrequenz f_0 und die Ergebnisse für die Mutiplikation zweier solcher Muster.	105
83	Standardabweichung der Ebenenrekonstruktionen von Ausgleichsebenen, experimentelle und numerische Filter (links). Vollständigkeit der Ebenenrekonstruktionen, experimentelle und numerische Filter (rechts).	111
84	Standardabweichung der Kugelrekonstruktionen von Ausgleichskugeln, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter (links). Vollständigkeit der Kugelrekonstruktionen, experimentelle und numerische Filter (rechts).	112
85	Das aus den 300 Einzelaufnahmen erstellte Summenbild wurde mit verschiedenen Filtern bearbeitet, und der Kontrast wurde über die Filtergröße aufgetragen. Verwendet wurden ein zweidimensionaler Gaußfilter, zwei linearen Sinus-Filter und drei Medianfilter, wobei wieder horizontal und vertikal, aber auch zweidimensional gefiltert wurde. Die Ausdehnung der 2D-Filter war symmetrisch in beide Raumrichtungen.	113
86	Standardabweichung der Ebenenrekonstruktionen von Ausgleichsebenen, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter (links). Vollständigkeit der Ebenenrekonstruktionen, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter (rechts).	114
87	Standardabweichung der Kugelrekonstruktionen von Ausgleichsebenen, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter (links). Vollständigkeit der Kugelrekonstruktionen, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter (rechts).	115
88	Standardabweichung der Ebenenrekonstruktionen von Ausgleichsebenen, Medianfilter (links). Vollständigkeit der Ebenenrekonstruktionen, 2D-Gaußfilter und lineare Sinusfilter (rechts).	116
89	Standardabweichung der Kugelrekonstruktionen von Ausgleichsebenen, Medianfilter (links). Vollständigkeit der Kugelrekonstruktionen, Medianfilter (rechts).	117

Tabellenverzeichnis

1	Spezifikation für den stereophotogrammetrischen Aufbau zur Objektvermessung bei 532 <i>nm</i>	107
2	Spezifikation für den stereophotogrammetrischen Aufbau zur Objektvermessung im UV-Bereich.	108
3	Spezifikation für den Aufbau zur Objektvermessung mit einem Projektor wiederholbarer Speckles und einer Kamera.	109
4	Spezifikation des miniaturisierten Aufbaus zur 3D -Messung mit wiederholbaren Speckles.	110

B Wissenschaftlicher Lebenslauf

Angaben zur Person

Name: Andreas Walter Stark
Geburtsdatum: 27. Februar 1989
Geburtsort: Neubrandenburg
Nationalität: deutsch
Dienstadresse: Institut für Angewandte Optik und Biophysik (IAOB)
Helmholtzweg 4
07743 Jena
E-Mail: andreas.stark@uni-jena.de

Ausbildung

1999-2008 Albert-Schweitzer bzw. Greifen-Gymnasium Ueckermünde
2008 Abitur
2008-2009 Zivildienst bei Vitanas in Ueckermünde
2009-2014/15 Studium der Physik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena
2013 Bachelorarbeit am Institut für Angewandte Optik
Thema: Realisierung eines bildinvertierenden Interferometers mit digital holographischen Methoden
2013 bis 2014/15 Masterarbeit am Institut für Angewandte Optik
Thema: Anwendung des Moiré-Effektes in der digitalen Holographie
2015 – heute Doktorand am IAOB

Lehrtätigkeit

Betreuung von Studierenden der Humanmedizin im physikalischen Grundpraktikum (über 4 Semester)
Betreuung von Studenten bei Praktikums-, Bachelor- und Masterarbeiten am IAOB

Konferenzorganisation

Mit- bzw. Hauptorganisator der Doktorandenkonferenz zur Diskussion optischer Konzepte (DoKDoK), gefördert durch die Abbe School of Photonics, 2016 in Oppurg bzw. 2017 in Suhl

C Eigene Publikationen

C.1 Veröffentlichungen in referierten Fachzeitschriften

1. "Implementation of Image Inversion Microscopy by Using Digital Holography," D. Weigel, **A. W. Stark**, H. Babovsky, A. Kießling, R. Kowarschik *Fringe* 2013, S. 149-154, 2014.
2. "Subjective speckle suppression in laser-based stereo photogrammetry," **A. W. Stark**, E. Wong, D. Weigel, H. Babovsky, T. Schott, R. Kowarschik *Optical Engineering* **55**(12), 121713, 2016.
3. "High-density three-dimensional measurements through multilayer perceptron calibration and statistical band-limited patterns," E. Wong, **A. W. Stark**, H. Babovsky, R. Kowarschik *Optical Engineering* **57** (7), 070501, 2018.
4. "Repeatable speckle projector for single-camera three-dimensional measurement," **A. W. Stark**, E. Wong, D. Weigel, H. Babovsky, R. Kowarschik *Optical Engineering* **57** (12), 120501, 2018.
5. "Subjective speckle suppression for 3D measurement using one-dimensional numerical filtering," **A. W. Stark**, E. Wong, H. Babovsky und R. Kowarschik, *Applied Optics* **58** (34), 9473-9483, 2019.
6. "Optimization-based extrinsic calibration of a three-dimensional sensor composed of an array projector and a single camera," E Wong, S Heist, C Bräuer-Burchardt, **A. W. Stark**, H Babovsky, R Kowarschik *Optical Engineering* **58** (10), 104109, 2019.
7. "Extrinsic calibration of a 3D sensor based on an array projector and a single camera," E. Wong, S. Heist, C. Bräuer-Burchardt, **A. W. Stark**, H. Babovsky, R. Kowarschik *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI* 11056, 1105617, 2019.
8. "View-syntesized 're-calibration' of an array projector for 3D measurment from arbitrary monocular view," E Wong, S Heist, C Bräuer-Burchardt, **A. W. Stark**, H Babovsky, R Kowarschik *Optics and Letters in Engineering* **141**, 106559, 2021.

C.2 Vorträge auf Fachkonferenzen

1. "Application of the Moiré-effect in digital holography," **A. W. Stark**, D. Weigel, H. Babovsky, A. Kießling, R. Kowarschik, am 12.08.2015 im Rahmen der Doktorandenkonferenz zur Diskussion optischer Konzepte (DoKDoK) 2015 in Eisenach.
2. "Application of the Moiré-effect in digital holography," **A.W. Stark**, D. Weigel, H. Babovsky, A. Kiessling und R. Kowarschik, am 27.05.2015 im Rahmen der 116. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Angewandte Optik (DGaO) 2015 in Brünn, Tschechische Republik.
3. "Statistical features of speckle patterns for stereophotogrammetric 3D-reconstruction," **A.W. Stark**, E. Wong, H. Babovsky und R. Kowarschik, am 20.05.2016 im Rahmen der 117. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Angewandte Optik (DGaO) 2016 in Hannover.
4. "Investigation on correlation algorithms for laser speckle based 3D measurements," **A.W. Stark**, E. Wong, H. Babovsky und R. Kowarschik, am 27.09.2016 im Rahmen der Doktorandenkonferenz zur Diskussion optischer Konzepte (DoKDoK) 2016 in Oppurg.
5. "Kontrastunterdrückung subjektiver Speckles zur 3D-Vermessung," **A.W. Stark**, D. Weigel, H. Babovsky und R. Kowarschik ,am 07.06.2017 im Rahmen der 118. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Angewandte Optik (DGaO) 2017 in Dresden.
6. "Contrast reduction of subjective speckles for laser based 3D- measurement," **A.W. Stark**, H. Babovsky und R. Kowarschik, am 18.09.2017 im Rahmen der Doktorandenkonferenz zur Diskussion optischer Konzepte (DoKDoK) 2017 in Suhl.
7. "Erzeugung wiederholbarer Speckle- Muster zur 3D-Vermessung," **A.W. Stark**, E. Wong, D. Weigel, H. Babovsky und R. Kowarschik, am 23.05.2018 im Rahmen der 119. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Angewandte Optik (DGaO) 2018 in Aalen.
8. "Numerical post processing for speckle-based 3D," **A.W. Stark**, E. Wong, H. Babovsky und R. Kowarschik, am 20.09.2018 im Rahmen der Doktorandenkonferenz zur Diskussion optischer Konzepte (DoKDoK) 2018 in Friedrichroda.
9. "Numerische Filterung für die 3D- Messungen mit kohärenter Beleuchtung," **A.W. Stark**, E. Wong, H. Babovsky und R. Kowarschik, am 12.06.2019 im Rahmen der

120. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Angewandte Optik (DGaO) 2019 in Darmstadt.

10. "Projektion von Laser-Speckles zur 3D-Vermessung von Oberflächen," **A. W. Stark**, E. Wong, H. Babovsky und R. Kowarschik, am 06.02.2020 im Rahmen der 19. Oldenburger 3D-Tage in Oldenburg.

C.3 Patente

1. "Verfahren zur 3D-Vermessung von Objekten durch kohärente Beleuchtung", Anmelder/Inhaber: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Erfinder: H. Babovsky, R. Kowarschik, **A. W. Stark**, Anmeldedatum: 27.07.2017, Veröffentlichungsnummer: DE102017007189A1.
2. "Verfahren zur strukturierten Beleuchtung ", Anmelder/Inhaber: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Erfinder: H. Babovsky, R. Kowarschik, **A. W. Stark**, D. Weigel, E. Wong, Anmeldedatum: 22.05.2018, Veröffentlichungsnummer: DE102018004078A1.
3. "Verfahren und Vorrichtung zur hochaufgelösten Fluoreszenzmikroskopie", Anmelder/Inhaber: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Erfinder: C. Geis, R. Kowarschik, L. Schmidl, **A. W. Stark**, D. Weigel, Veröffentlichungsnummer (national): 10.10.2018, Veröffentlichungsnummer (national): DE102018124984A1. Anmeldedatum (international): 27.09.2019, Veröffentlichungsnummer (international): WO002020074278A1.
4. "Verfahren zur 3D-Vermesssystem von unkooperativen Oberflächen", Anmelder/Inhaber: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Erfinder: R. Kowarschik, H. Babovsky, **A. W. Stark**, Anmeldedatum: 11.03.2021, Anmelde nummer: 102021001366.2.

D Danksagung

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Projekte wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschungsallianz 3Dsensation unter den Förderkennzeichen 03ZZ0425H, 03ZZ0452 und 03ZZ0473 gefördert. Ich möchte dafür meinen Dank an das BMBF, die Allianz 3Dsensation und den Steuerzahler ausdrücken.

Es ist mir eine große Freude und ein wesentliches Anliegen zum Ende meiner Arbeit all jenen Menschen zu danken, die mich in den vergangenen Jahren betreut, unterstützt und begleitet haben.

Ich möchte mich besonders bei Herrn Prof. Dr. Richard Kowarschik für dessen exzellente Betreuung und die Möglichkeit, hier am Institut für Angewandte Optik und Biophysik diese Arbeit zu schreiben, bedanken. Dazu zählte es, Patentanträge und Publikationen zu verfassen, Vorträge zu halten, Projekte einzuwerben und mich an der Konferenzorganisation zu versuchen. Herr Prof. Kowarschik stand mir dabei mit Rat, Tat und der Bereitschaft für Diskussionen zur Seite. Die Betreuung habe ich als äußerst anregend und gewinnbringend empfunden und sie trug wesentlich zu meiner Entwicklung als Wissenschaftler bei.

Mein besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Dr. Holger Babovsky, der mir durch seinen Ideenreichtum, seine Auffassungsgabe und nicht zuletzt durch sein Vorbild viele Probleme im Forschungsalltag und abseits davon näher brachte und erleichterte. Es sei hier bemerkt, dass ich seit dem Vorschulalter ein "Erfinder" werden wollte, ein Titel, dessen ich mich seit dem ersten Patentantrag mit Herrn Prof. Kowarschik und Herrn Dr. Babovsky 2016 rühmen kann. Herzlichen Dank!

Ich möchte mich bei dem leider viel zu früh verstorbenen Herrn Dr. Armin Kießling bedanken, der mich vom zweiten Semester an als Seminarleiter und später in der Bachelor- und Masterarbeit betreut hat. Dabei hat er mir die experimentelle Arbeit und die mathematische Beschreibung von Problemstellungen nachhaltig nahe gebracht, ohne die meine akademische Laufbahn in diesem Zweig der Physik so nicht möglich gewesen wäre.

Bei Herrn Eugene Wong möchte ich mich für die freundschaftliche Zusammenarbeit während meiner Promotionszeit, insbesondere beim Projekt "EndoS3D" und bei der Dok-Dok2017, bedanken.

Bei Herrn Dr. Daniel Weigel möchte ich mich für die Betreuung als Bachelor- und Masterant und die Zusammenarbeit als Doktorand bedanken. Dabei sind mir besonders die anregenden Diskussionen, die elaborierte Entwicklung und Erstellung von Aufbauten und

die eleganten Quelltexte im Hinterkopf geblieben.

Auch bei Herrn Dr. Michael Duparré möchte ich mich für die freundschaftliche und kollegiale Zusammenarbeit und die Geduld bedanken. Herrn Dr. Robert Brüning möchte ich für die kameradschaftliche Zusammenarbeit nicht zuletzt bei der DoKDoK2016 und die interessanten Diskussionen danken.

Mein Dank gilt auch allen Organisationsmitgliedern der DoKDok2016 und der DoK-DoK2017, der Abbe School of Photonics und Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie der Ernst-Abbe-Stiftung.

Ich bedanke mich bei allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Angewandte Optik. Namentlich seien dabei Frau Marie-Sophie Schmidt, Frau Barbara Lüdge, Herr Thomas Schott, Herr Dr. Marcus Große, Herr Dr. Martin Schaffer, Herr Dr. Bastian Harendt und Herr Dieter Wostl genannt. Alle nicht genannten mögen mir verzeihen.

Bei der Maschinenwerkstatt 2 (M2) der Physikalisch-Astronomischen Fakultät, insbesondere bei ihrem Leiter Herrn Hanse, möchte ich mich für die Zusammenarbeit bedanken, ohne die verschiedene Projekte und Ideen nicht hätten verwirklicht werden können.

Frau Sabine Kellner, Frau Marie-Sophie Munser, Herrn Dr. Stefan Heist, Herrn Dr. Christoph Bösel, Herrn Dr. Johannes Hartung, Herrn Dr. André Boden und Herrn Prof. Herbert Gross möchte ich ebenfalls meinen Dank für die schöne Zusammenarbeit ausdrücken. Mein Dank gilt ferner allen Studierenden, die ich im Zuge meiner Dissertation betreuen durfte. Herr Andreas Masek und Herr Shantanu Kodgirwar seien dabei genannt, mit denen mir die Arbeit sehr viel Spaß gemacht hat.

Ich möchte mich darüber hinaus bei Herrn Prof. Frank Schmidl und Herrn Lars Schmidl und allen anderen Mitbetreuerinnen und Mitbetreuern für die Zusammenarbeit im Praktikum und darüber hinaus bedanken. Herrn Prof. Dr. Christian Franke möchte ich für die Perspektive hier am IAOb zu bleiben, danken. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Christian Eggeling und den "neuen" Kollegen des IAOb. Ich freue mich schon auf die Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt ferner den Projektpartnern der 3Dsensation-Projekte, insbesondere Herrn Dr. Thilo Lilienblum und den Kollegen aus Magdeburg, den noch nicht genannten Kollegen vom IOF Jena, sowie der Koordinierungsstelle der Allianz 3Dsensation.

Herrn Dr. Christian Liutik und Herrn Dr. Pänke möchte ich ebenfalls für die kollegiale Zusammenarbeit danken.

Bei den Lehrenden der Friedrich-Schiller-Universität Jena möchte ich mich für die Ausbildung bedanken, von der ich selbstverständlich auch während der Promotionszeit profitiert habe. Dabei seien neben Herrn Prof. Kowarschik und Herrn Dr. Kießling auch Herr Prof. Karl-Heinz Lotze, Herr Prof. Reinhard Meinel und Herr Prof. Herbert Gross genannt.

Auch Herrn Dr. Hans-Christian Wick möchte ich für den didaktisch wertvollen Unterricht

danken, den ich im Bachelorstudium bei ihm miterleben durfte.

Auch bei allen weiteren Organen und Mitarbeitenden der Universität Jena möchte ich mich recht herzlich bedanken, da ich mich bei meiner Arbeit als kleiner Teil eines Leviathans begreifen konnte, mit großer Kollegialität in alle Richtungen und Ebenen, von der Mensa, über die Sekretariate bis zum Dekanat und darüber hinaus.

Bei Maximilian Heck, Christoph Stihler, Franz Johann Friedrich Löffler und Friedrich-Georg Fröbel möchte ich mich für ihre Freundschaft und für die großartige Zeit bedanken, die wir zusammen in Jena hatten.

Bei allen Sportfreunden vom USV Jena und Science City Jena, mit denen ich im Laufe der Jahre das Vergnügen hatte, zusammen zu spielen und zu trainieren, möchte ich mich auch herzlich bedanken. Eine vollständige Aufzählung wäre hier zu umfangreich, daher seien kurz Klaus Oswald, Knut Rennert, Frank Schmidt, Sebastian Schenkl und Marcus Gretz genannt. Außerdem möchte ich mich bei den, teilweise ehemaligen, Teamkollegen bedanken, die in den letzten fünf Jahren zu einem irren Spaß beigetragen haben: Björn Blosssey, Steffen Raddatz, Stephan Schmuck, Jerome Hennecke, Ron Möller, Friedrich Scholz, Andreas Popp, Taylan Saygin, Maximilian Heinzdorf, Marc-André Burkhardt, Andreas Müller, Fritz Herold, Felix Steiner, Gregor Blosssey, Michael Friedrich, André Karliczek, Thomas Corbus, Johannes Kühl, Yannis Smollich, Daniel Urbano und alle, die ich jetzt vergessen habe.

Bei Katharina Wilberg und Martin Israel sowie Friederike und Christian Rambach möchten ich mich für die Aufnahme in Ihren Freundeskreis bedanken, in dem ich mich wie zu hause fühle.

Ich möchte mich ganz besonders bei Ronald Bruha, Benjamin Grabiger und Eduard May für ihre Freundschaft seit Beginn des Studiums und die gemeinsame Zeit (bis jetzt!) bedanken.

Mit meiner Heimatstadt Ueckermünde verbinde ich viele positiven Eigenschaften, die mir nachhaltig und dauerhaft von vielen Menschen nahe gebracht wurden, bei denen ich mich, neben dem Lehrerkollegium am Greifen-Gymnasium, herzlich bedanken möchte: Falko Ramm, Remo Honerjäger und Guido Winter; Thomas Poser und seiner Familie; Gießbert Wartenberg und Andreas Pieper.

Bei Clemens Schröder möchte ich mich für seine Freundschaft seit der ersten Klasse bedanken und bei seiner Frau Tina dafür, meiner Frau und mir dieselbe Freundschaft entgegenzubringen.

Meinen Tanten, Onkeln, Cousinen, Cousins, Nichten und Neffen möchte ich für das Verständnis und die Herzlichkeit danken, mit der sie mich begleiten.

Ich möchte mich bei meinen Großvätern bedanken, nach denen ich meinen zweiten Vornamen trage und deren Fußstapfen auszufüllen ich versuche.

Bei meiner Großmutter Sonja, meiner Tante Edelgard, meinen Cousinen Christine und Juliane und ihren Familien möchte ich mich ebenfalls herzlich bedanken.

Insbesondere meine Großmutter Elli Neumann, meine Tante Dörthe und mein Onkel Lothar sowie meinen Cousinen Kristine und Heike und meinem Cousin Jörg und ihren Lieben gilt mein Dank, da sie wie eine zweite Familie für mich sind.

Mein herzlicher Dank gebührt Karin Dotzauer, der ich meine wunderbare Frau verdanke. Ganz besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Schwester Kathrin bedanken und ihr, Mathias und ihrem Sohn Paul alles Gute wünschen.

Meiner Mutter Frau Dr. Karola (Ute Elli) Stark und meinem Vater, Herrn Dipl.-Ing. Ulrich (Christoph) Stark danke ich für ihr Vorbild und ihre Liebe, die mich stets begleitet und geleitet haben.

Zuletzt möchte ich meiner Frau Mareike für ihre Unterstützung, ihr Verständnis und Ihre Liebe danken und bei unserem Sohn Aaron (Ulrich), der uns jetzt schon so viel Freude bereitet.

E Erklärung des Promovenden

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, die vorliegende Arbeit selbst und selbstständig angefertigt, keine Textabschnitte eines Dritten oder eigener Prüfungsarbeiten ohne Kennzeichnung übernommen und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen angegeben zu haben.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials, sowie bei der Herstellung des Manuskripts wurde ich von niemandem anderem unterstützt. Ich habe weder die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlerin/ eines kommerziellen Promotionsvermittlers in Anspruch genommen, noch haben Dritte unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten von mir erhalten, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Dissertation stehen. Ich erkläre ferner, dass die vorliegende Arbeit nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung oder in gleicher Form, in wesentlichen Teilen ähnlich oder als andere Abhandlung bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht wurde.

Die geltende Promotionsordnung der Physikalisch-Astronomischen Fakultät ist mir bekannt.

Jena, den 08.04.2021

Andreas Walter Stark