

# Erweiterte laserspecklebasierte Oberflächenmesstechnik mittels adaptiver Optiken

Vom Fachbereich Produktionstechnik  
der  
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## Dissertation

von

**M. Sc. León Okko Schweickhardt**

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer (Universität Bremen)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Lehmann (Universität Kassel)

Tag der mündlichen Prüfung: 12.1.2024

---

## Kurzfassung

Die Oberflächenbeschaffenheit bestimmt maßgeblich die tribologischen Eigenschaften, die chemische Beständigkeit, den Energietransport in Form von Wärme oder elektrischer Ladung und das Aussehen eines Bauteils. Neben der Oberflächenbeschaffenheit ist die Oberflächenverformung eine weitere wichtige Messgröße, um Materialeigenschaften zu bestimmen oder um eine räumlich aufgelöste Lastmessung während der Fertigung oder im Betrieb zu realisieren. Specklebasierte Methoden für die schnelle, berührungslose und großflächige Messung von Oberflächenbeschaffenheit und -verformung werden bereits seit den 1970er Jahren erforscht. Die fortwährende Weiterentwicklung von Rechenleistung, Auswertelgorithmen, Bildsensoren und adaptiven Optiken eröffnet jedoch weiterhin eine Erweiterung der Messsystemfähigkeit in Bezug auf Zeit-, Orts- und Messauflösung.

In der digitalen Specklephotographie werden Laserspeckle als Oberflächenmarker eingesetzt, um zweidimensionale Verformungsfelder mittels Bildkorrelation zu bestimmen. Diese Methode bietet im Gegensatz zu einem permanent aufgetragenen Farbmuster die Möglichkeit, die Speckle durch eine Modulation der Laserbeleuchtung zu variieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Mikrospiegelaktor eingesetzt, um eine Vielzahl unkorrelierter Specklemuster auf der Probenoberfläche mit einer Bildrate im Kilohertzbereich zu generieren und so eine schnelle Mehrfachmessung bei Variation des Specklemusters zu ermöglichen. Durch eine Ensemblemittelung konnte auf diese Weise bei gleichbleibender Ortsauflösung die Messunsicherheit um eine Größenordnung reduziert werden. Dies erlaubt beispielsweise die Messung von Verformungsfeldern auf Mikroproben, d. h. eine Ortsauflösung  $< 20\ \mu\text{m}$  bei einer Messunsicherheit  $< 0,1\ \mu\text{m}$ .

In spanenden Fertigungsverfahren wirken beim Werkzeugeingriff hohe mechanische Lasten meist räumlich konzentriert um die Schneide. Dies bedeutet bei einer prozessbegleitenden Lastmessung, dass hohe Gradienten im Verformungsfeld auftreten. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht, welche zufälligen und systematischen Messabweichungen bei der digitalen Specklephotographie durch Verformungsgradienten auftreten. Mittels einer optischen Simulation konnte gezeigt werden, dass die zufälligen Messabweichungen vom Gradienten erster Ordnung abhängig sind und durch eine Dekorrelation der Specklemuster ausgelöst werden. Die systematischen Messabweichungen sind dagegen von dem Gradienten zweiter Ordnung abhängig und werden überwiegend durch den Bildkorrelationsalgorithmus verursacht.

Um die Beschaffenheit von unidirektional gefertigten anisotropen Oberflächen zu charakterisieren, sind mehrere richtungsabhängige Parameter erforderlich. Integrierende Verfahren, wie die Auswertung des Speckle-Streulichtmusters, messen nicht die Oberflächentopographie einer Probe, sondern liefern statistische Parameter, welche den gesamten Auswertebereich charakterisieren. Dadurch lässt sich eine schnelle Single-Shot-Messung für die prozessbegleitende Qualitätssicherung realisieren. Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich aus einem einzigen Specklemuster die Bearbeitungsrichtung, die laterale Korrelationslänge senkrecht dazu sowie die mittlere quadratische Höhe in und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung bestimmen lassen. Zur Lösung des inversen Problems der multiparametrischen Oberflächencharakterisierung wurde ein räumlicher Phasenmodulator eingesetzt, welcher im Versuchsaufbau Oberflächentopographien in einem großen Parameterraum emuliert. Zudem wurde erstmals der Einfluss von Krümmung und Neigung auf die bidirektionale Rauheitsmessung anisotroper Oberflächen untersucht. Dadurch wird eine Korrektur der systematischen Messabweichungen in Abhängigkeit von Neigung und Krümmung möglich.

Insgesamt wurde das Potenzial der laserspecklebasierten Oberflächenmesstechnik mittels adaptiver Optiken erweitert, um einerseits in der hochaufgelösten Verformungsmessung die zufälligen Messabweichungen zu reduzieren und um andererseits eine multiparametrische Single-Shot-Charakterisierung von unidirektional gefertigten anisotropen Oberflächen zu realisieren.

---

## Abstract

The surface texture significantly determines the tribological properties, the chemical resistance, the energy transport in the form of heat or electrical charge, and the visual appearance of a mechanical component. In addition to surface texture, surface deformation is another important measurand to determine material properties or to realize a spatially resolved load measurement during manufacturing or operation. Speckle-based methods for fast, non-contact, large-area measurements of surface texture and deformation have been investigated since the 1970s. However, ongoing advancements in computing power, evaluation algorithms, image sensors, and adaptive optics continue to enable the expansion of measurement system capabilities in terms of temporal, spatial, and measurement resolution.

In digital speckle photography, laser speckles are used as surface markers to determine two-dimensional deformation fields using image correlation. In contrast to a permanently applied color pattern, this method offers the possibility to vary the speckle by modulating the laser illumination. In this work, a digital micromirror device was used to generate a large number of uncorrelated speckle patterns on the sample surface at a frame rate in the kilohertz range, allowing multiple rapid measurements as the speckle pattern is varied. Thus, through ensemble averaging, the measurement uncertainty could be reduced by an order of magnitude while retaining the spatial resolution. This allows, for example, the measurement of deformation fields on microsamples, i. e. a spatial resolution  $< 20\mu\text{m}$  with a measurement uncertainty  $< 0.1\mu\text{m}$ .

In surface finishing processes, high mechanical loads usually act spatially concentrated around the cutting edge during tool engagement. This means that high gradients occur in the deformation field during in-process load measurement. Therefore, in this work it was investigated which random and systematic measurement errors occur in digital speckle photography due to deformation gradients. By means of an optical simulation it could be shown that the random measurement error depends on the first order gradient and is caused by a decorrelation of the speckle patterns. The systematic measurement error, on the other hand, depends on the second-order gradient and is predominantly caused by the image correlation algorithm.

In order to characterize the texture of unidirectionally machined anisotropic surfaces, several direction-dependent parameters are required. Integrating methods, such as the evaluation of the speckle pattern, do not measure the surface topography of a sample, but provide statistical parameters that characterize the entire evaluated field of view. This allows a fast single-shot measurement for in-process quality control. In this work, it was shown that the machining direction, the lateral correlation length perpendicular to it, as well as the root mean square height in and perpendicular to the machining direction can be determined from a single speckle pattern. To solve the inverse problem of the multi-parametric surface characterization, a phase-only spatial light modulator was used, which emulates surface topographies in a large parameter space in the experimental setup. In addition, the influence of surface tilt and curvature on the bidirectional roughness measurement of anisotropic surfaces was investigated for the first time. This enables a correction of the systematic measurement error as a function of surface tilt and curvature.

Overall, the speckle-based surface measurement technique was enhanced by means of adaptive optics in order to reduce the random measurement error in the high-resolution deformation measurement as well as to realize a multiparametric single-shot characterization of unidirectionally machined anisotropic surfaces.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Verzeichnis wichtiger Formelzeichen</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Stand der Forschung . . . . .	3
1.2.1 Messung der Oberflächenverformung . . . . .	3
1.2.2 Multiparametrische Oberflächencharakterisierung . . . . .	6
1.3 Zielsetzung und Aufbau . . . . .	9
<b>2 Erweiterung von Specklemethoden mittels adaptiver Optiken</b>	<b>12</b>
2.1 Entstehung, Simulation und Eigenschaften von Speckle . . . . .	12
2.1.1 Entstehung . . . . .	12
2.1.2 Simulationsmodell . . . . .	13
2.1.3 Eigenschaften . . . . .	14
2.2 Specklebasierte Messung der Oberflächenverformung . . . . .	19
2.2.1 Bildkorrelation . . . . .	19
2.2.2 Messunsicherheitsbudget der DSP . . . . .	20
2.2.3 Unschärferelation der Orts-, Zeit- und Messauflösung . . . . .	21
2.2.4 Reduktion zufälliger Messabweichungen mittels adaptiver Optiken . . . . .	23
2.2.5 Fazit . . . . .	26
2.3 Specklebasierte Charakterisierung anisotroper Oberflächen . . . . .	27
2.3.1 Lösung des inversen Problems mittels adaptiver Optiken . . . . .	27
2.3.2 Simulation anisotroper Oberflächentopographien . . . . .	29
2.3.3 Merkmalsbasierte Messung räumlicher Parameter . . . . .	32
2.3.4 Bidirektionale Messung von Höhenparametern . . . . .	35
2.3.5 Fazit . . . . .	43
<b>3 Hochaufgelöste Messung der Oberflächenverformung</b>	<b>44</b>
3.1 Reduktion zufälliger Messabweichungen durch Ensemblemittelung . . . . .	44
3.1.1 Experimenteller Aufbau . . . . .	44
3.1.2 Validierungsmessungen . . . . .	46
3.2 Korrektur systematischer Messabweichungen bei Verformungsgradienten . . . . .	55
3.2.1 Simulationsansatz . . . . .	55
3.2.2 Zufällige Messabweichungen . . . . .	56
3.2.3 Systematische Messabweichungen . . . . .	60
3.2.4 Anwendungsfälle . . . . .	62
3.3 Fazit . . . . .	66
<b>4 Multiparametrische Charakterisierung anisotroper Oberflächen</b>	<b>68</b>
4.1 Multiparametrische Analyse der Oberflächenbeschaffenheit . . . . .	68
4.1.1 Experimenteller Aufbau . . . . .	68
4.1.2 Messung der Bearbeitungsrichtung und der Autokorrelationslänge . . . . .	71

4.1.3	Bidirektionale Rauheitsmessung . . . . .	73
4.1.4	Validierung . . . . .	74
4.2	Rauheitsmessung an komplexen Oberflächenformen . . . . .	80
4.2.1	Experimenteller Aufbau . . . . .	80
4.2.2	Querempfindlichkeit bezüglich Oberflächenform . . . . .	85
4.3	Fazit . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>92</b>
5.1	Ausgangslage der Arbeit . . . . .	92
5.2	Wissenschaftlicher Fortschritt . . . . .	93
5.3	Ausblick auf weiterführenden Forschungsbedarf . . . . .	96
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>98</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>106</b>
	<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>108</b>

# Abkürzungsverzeichnis

<b>AKF</b>	Autokorrelationsfunktion
<b>ARS</b>	Angular Resolved Scattering (Winkelaufgelöste Streuung)
<b>DIC</b>	Digital Image Correlation (Digitale Bildkorrelation)
<b>DMD</b>	Digital Micromirror Device (Mikrospiegelaktor)
<b>DMS</b>	Dehnungsmessstreifen
<b>DSP</b>	Digital Speckle Photography (Digitale Specklephotographie)
<b>ESPI</b>	Elektronische Specklemuster-Interferometrie
<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate Array
<b>LSWLI</b>	Lateral scannende Weißlichtinterferometrie
<b>PIV</b>	Particle Image Velocimetry (Optische Geschwindigkeitsfeldmessung)
<b>SLM</b>	Spatial Light Modulator (Räumlicher Lichtmodulator)
<b>TIS</b>	Total Integrated Scattering (Vollständig aufintegrierte Streulichtmessung)
<b>WLI</b>	Weißlichtinterferometrie



# Verzeichnis wichtiger Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung
$A$	Fläche des Auswertefensters bei der Bildkorrelation
$A_P$	Fläche der Apertur, siehe Gleichung (2.3)
$(a, b)$	Koordinatensystem des Weißlichtinterferometers
$C$	Specklekontrast
$C_{\text{theo}}$	Theoretisch nach Gleichung (2.24) berechneter Specklekontrast
$\text{Chi}(x)$	Kosinus-hyperbolicus-Integralfunktion von $x$
$c$	Lichtgeschwindigkeit
$d_A$	Durchmesser der Apertur
$d_D$	Abstand von Diffusor zu Probenoberfläche
$d_L$	Durchmesser des Laserstrahls
$\text{Ei}(x)$	Integraleponentialfunktion von $x$
$E_{\text{ph}}$	Photonenenergie
$e$	Eulersche Zahl
$\mathcal{F}\{X\}$	Fouriertransformierte von $X$
$f$	Brennweite
$f_c$	Schwerpunkt des Ortsfrequenzspektrums eines Specklemusters
$f_s$	Abtastfrequenz
$H(x, y)$	Höhenverteilung einer Oberfläche
$h$	Plancksches Wirkungsquantum
$I(x, y)$	Speckleintensität
$\langle I \rangle_x(y)$	Entlang der $x$ -Achse gemittelte Speckleintensität
$K_{\text{sp}}(\Delta\xi, \Delta\eta)$	Autokorrelationsfunktion der Speckleintensitäten in Abhängigkeit der Verschiebungen $\Delta\xi$ und $\Delta\eta$
$K_{\text{sp,N}}(\Delta\xi, \Delta\eta)$	Normierte Autokorrelationsfunktion der Speckleintensitäten
$K_{\text{surf}}(l_x, l_y)$	Autokorrelationsfunktion der Oberflächentopographie in Abhängigkeit der Verschiebungen $l_x$ und $l_y$
$k$	Erweiterungsfaktor der erweiterten Messunsicherheit
$k_w$	Wellenzahl $k_w = 2\pi/\lambda$
$l_x$	Räumlicher Verschiebungswert der Autokorrelationsfunktion in $x$ -Richtung
$l_y$	Räumlicher Verschiebungswert der Autokorrelationsfunktion in $y$ -Richtung
$M_{a,L}$	Oberflächenmodellparameter für die anisotrope Autokorrelationslänge
$M_{a,R}$	Oberflächenmodellparameter für die anisotrope Rauheit
$M_{i,L}$	Oberflächenmodellparameter für die isotrope Autokorrelationslänge
$M_{i,R}$	Oberflächenmodellparameter für die isotrope Rauheit
$N$	Anzahl der Korrelationsbereiche, die an der Lichtstreuung beteiligt sind, siehe Gleichung (2.25)
$N_{\text{ph}}$	Anzahl Photonen
$N_x, N_y$	Anzahl der Oberflächenhöhenwerte $H$ in $x$ - bzw. $y$ -Richtung
$N_\xi, N_\eta$	Anzahl der Pixel des Specklemusters in $\xi$ - bzw. $\eta$ -Richtung
$n$	Anzahl Specklemuster

$P^{-1}$	Funktion des inversen Problems
$P_L$	Laserleistung
$R_{\text{opt},x}, R_{\text{opt},y}$	Charakteristische Parameter der Autokorrelationsfunktion des Specklemusters
$R_q$	Mittlere quadratische Höhe eines Oberflächenprofils
$r_{L,x}, r_{L,y}$	Radius des Laserstrahls in $x$ - bzw. $y$ -Richtung
$r_m$	Radius des Messflecks des Specklesensors auf der Probe
$r_k$	Krümmungsradius der Probe
$S_{\text{al}}$	Autokorrelationslänge
$S_{\text{al},y}$	Autokorrelationslänge ausgewertet in $y$ -Richtung
$S_q$	Mittlere quadratische Höhe einer Oberflächentopographie
$S_{q,x}, S_{q,y}$	$S_q$ ausgewertet in $x$ - bzw. $y$ -Richtung
$S_{\text{td}}$	Seitenverhältnis der Oberflächentextur
$\text{Shi}(x)$	Sinus-hyperbolicus-Integralfunktion von $x$
$s_{\text{sp}}$	Specklegröße
$s_{\text{pix}}$	Pixelgröße
$u(X)$	Messunsicherheit von $X$
$V_B(x, y)$	Verformungsfeld eines Bildpaares bei der Bildkorrelation
$V_{\text{max}}$	Maximale lokale Verformung, siehe Abbildung 3.14
$V_x(x, y)$	Verformungsfeld der Verformungskomponente in $x$ -Richtung
$V_y(x, y)$	Verformungsfeld der Verformungskomponente in $y$ -Richtung
$\overline{V_x(x)}$	In $y$ -Richtung gemittelt Verformungsfeld der Verformungskomponente in $x$ -Richtung
$W_1(x, y)$	Wellenfeld an den Koordinaten $x, y$ und Position (1), siehe Abbildung 2.2
$W_{\text{eval}}$	Breite des Auswertefensters bei der Bildkorrelation
$(x, y, z)$	Koordinatensystem der Oberfläche, $x$ in Bearbeitungsrichtung
$x_{\text{int}}$	Intervall in $x$ -Richtung, siehe Abbildung 3.11
$z_A$	Abstand zwischen Apertur und Sensor
$\alpha_x$	Neigung der Oberflächen um $x$ -Achse
$\alpha_y$	Neigung der Oberflächen um $y$ -Achse
$\beta$	Rotation der Oberfläche bzw. Winkel zwischen $(x, y)$ und $(\xi, \eta)$
$\beta_{\text{sp}}$	Rotation des Specklemusters bzw. Winkel zwischen $f_c$ und $\eta$
$\beta_{\text{WLI}}$	Rotation der gemessenen Oberflächentopographie bzw. Winkel zwischen dem Koordinatensystem $(x, y)$ der Oberflächen und dem Koordinatensystem $(a, b)$ des WLI
$\gamma$	Euler-Mascheroni-Konstante $\approx 0,57721$
$\Delta t$	Zeitauflösung
$\Delta x$	Ortsauflösung
$\Delta \eta$	Räumlicher Verschiebungswert der Autokorrelationsfunktion in $\eta$ -Richtung
$\Delta \xi$	Räumlicher Verschiebungswert der Autokorrelationsfunktion in $\xi$ -Richtung
$\overline{\Delta V}$	Mittlere Messabweichung des Verformungsfeldes
$\lambda$	Wellenlänge
$(\xi, \eta)$	Koordinatensystem des Kamerasensors
$\pi$	Kreiszahl $\approx 3,14159$
$\sigma(X)$	Standardabweichung von $X$
$\sigma_\phi^2$	Die Variation der Phase des Wellenfeldes





# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Funktion eines technischen Bauteils wird neben den Materialeigenschaften der Stützstruktur maßgeblich von den Oberflächeneigenschaften seiner Wirkflächen bestimmt [Alb2006]. Die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst den Elektronentransferprozess an der Anode einer Brennstoffzelle [Zho2008, Li2021], die Tribologie kritischer mechanischer Komponenten in Elektrofahrzeugen [Far2019], die elektrischen Kontaktwiderstandsverluste in Lithium-Ionen-Batterien [Tah2011, Rac2013], die Zuverlässigkeit und Lebensdauer eines Windturbinengetriebes [Liu2020], das elektrochemische Verhalten und die Stabilität eines implantierbaren Kardioverter-Defibrillators [Nor2004] oder den Verschleiß und die Korrosion von Konusverbindungen in Hüftgelenksprothesen [Pan2013]. In der Fertigung sind die Verfahren zur Oberflächenbearbeitung daher von entscheidender Bedeutung für die Leistung des Endprodukts, da sie eine Vielzahl von Eigenschaften wie Aussehen, Reibung, Leitfähigkeit und chemische Beständigkeit beeinflussen [Bla2019].

Abbildung 1.1 stellt eine Reihe verschiedener Anwendungen der hochauflösenden Oberflächenmesstechnik vor. Die Kenntnis insbesondere der Messgrößen Oberflächenverformung und -beschaffenheit ermöglicht eine umfassende Prozessoptimierung vor, während und nach der Fertigung eines Bauteils. *Oberflächenverformung* ist dabei definiert durch die relativen Verschiebungen zwischen verschiedenen Oberflächenbereichen und wird in dieser Arbeit als Begriff anstelle von Oberflächenverschiebung verwendet, da ideale Starrkörperverschiebungen ohne Verformung bei den hier betrachteten Messungen nicht auftreten. *Oberflächenbeschaffenheit* wird hier gemäß ISO 25178-1 [Int2016] anstelle von Rauheit oder Welligkeit als Oberbegriff verwendet, der die dreidimensionale Feinform einer Oberfläche beschreibt.

Sowohl die Oberflächenverformung als auch die der Oberflächenbeschaffenheit zugehörigen Parameter sind wichtige Messgrößen während des gesamten Lebenszyklus eines technischen Bauteils. Zum Beispiel lassen sich mit einem Zugtest aus dem gemessenen Verformungsfeld für die Materialauswahl entscheidende Parameter wie die Zugfestigkeit berechnen [Ale2020] sowie auf Defekte unterhalb der Oberfläche schließen [Hil2015]. In Grundlagenuntersuchungen an anwen-

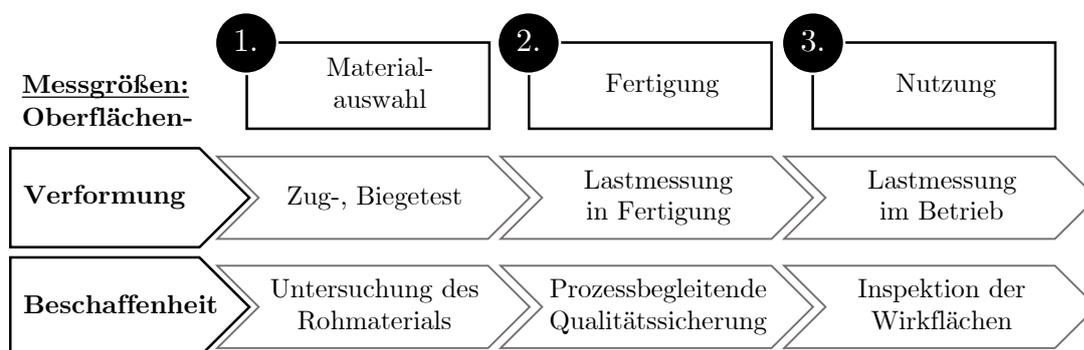


Abbildung 1.1: Anwendungsbeispiele der Messgrößen Oberflächenverformung und -beschaffenheit während des gesamten Lebenszyklus eines technischen Bauteils, der aus Materialauswahl, Fertigung und Nutzung besteht.

dungsnahen Referenzprozessen wird hochaufgelöste Oberflächenmesstechnik eingesetzt, um Fertigungsparameter mit den daraus resultierenden Materialeigenschaften des Bauteils zu verknüpfen [Bri2011, Bri2014]. Zudem erfordert eine prozessbegleitende Qualitätssicherung des Rohmaterials oder des gefertigten Bauteils eine schnelle, flächenhafte Charakterisierung der Beschaffenheit der Wirkflächen, teils an Bauteilen mit komplexen Formen [Ste2021]. Schließlich sorgen Wartungsmessungen im Betrieb für eine störungsfreie Nutzung des Bauteils und erlauben eine Anpassung der Betriebsparameter an geänderte Umwelt- oder Materialeigenschaften [Mal2013]. Somit besteht ein hoher und steigender Bedarf an hochleistungsfähigen Oberflächenmesstechniken, um die Funktion eines Bauteils und eine hohe Effizienz beim Einsatz während des gesamten Lebenszyklus zu garantieren.

## 1.2 Stand der Forschung

### 1.2.1 Messung der Oberflächenverformung

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Verformungen parallel zur Oberfläche (in-plane) betrachtet. Verformungen senkrecht zur Oberfläche (out-of-plane) treten zwar in vielen Anwendungen auf, sind aber meist mindestens um eine Größenordnung kleiner als die In-plane-Messgrößen. Geringe Out-of-plane-Verformungen sind bedingt durch eine Poissonzahl  $< 0,5$  und flache Proben, welche in-plane eine deutlich größere Ausdehnung aufweisen als in der Tiefe. Wenn eine Out-of-plane-Verformung durch den Messaufbau nicht unterbunden werden kann, muss so schnell gemessen werden, dass die Out-of-plane-Verformung zwischen zwei Einzelmessungen vernachlässigbar klein ist.

Grundlagenuntersuchungen zur Materialauswahl stellen hohe Anforderungen an die Verformungsfeldmessung. Derzeit erfordert die Entwicklung neuer Metalllegierungen sowohl einen hohen Material- als auch Zeitaufwand. Deshalb beruht ein neuer Ansatz, um den Entwicklungsprozess effizienter zu gestalten, auf der Materialprüfung von Mikroproben [Ell2018]. Für diese Proben wird das inkrementelle Umformverfahren der elektrohydraulischen Extrusion als flexibler Vergleichsprozess eingesetzt, der es erlaubt, die Verformungsenergie in präzisen und reproduzierbaren Inkrementen auf die Probe einzubringen. Um Verformungsfelder an Mikroproben, d. h. an Flächen, die nur einige  $100\ \mu\text{m}$  breit sind, zu messen, ist eine hohe Ortsauflösung von wenigen Mikrometern bei gleichzeitig geringer Messunsicherheit bis in den Nanometerbereich erforderlich [Ale2020].

Darüber hinaus ergeben sich bei fertigungstechnischen Grundlagenuntersuchungen weitere Anforderungen aus der Messumgebung. Um beispielsweise den Verlauf der Verformung eines Bauteils während des Schleifens zu messen, ist eine hohe zeitliche Auflösung von  $\Delta t < 10\ \text{ms}$  notwendig, um die Out-of-plane-Verformung zwischen zwei Einzelmessungen vernachlässigbar klein zu halten, zudem muss das Messsystem robust gegen Störgrößen wie Vibrationen und Funkenflug sein [Tau2018a]. Eine weitere Herausforderung sind Verformungsgradienten höherer Ordnung, welche bei Fertigungsprozessen aufgrund von hohen lokalisierten Lasten sowie inhomogen verteilten Materialparametern auftreten [Xu2017]. Um im Prozesstakt messen zu können, soll auf eine Präparation der Probenoberfläche, z. B. durch das Aufsprühen von Markierungen, verzichtet werden. Die begrenzte Zugänglichkeit erfordert außerdem ein kontaktloses Messverfahren. Zusammenfassend lassen sich die Anforderungen an die Verformungsfeldmessung in drei Bereiche einteilen:

- *Messsystem*
  - Messunsicherheit  $< 100$  nm
  - räumliche Auflösung  $< 20$   $\mu\text{m}$
  - zeitliche Auflösung  $< 10$  ms
- *Messobjekt*
  - keine Präparation der Probenoberfläche
  - robust gegenüber Verformungsgradienten
- *Messumgebung*
  - kontaktlose Messung
  - robust gegenüber Vibrationen

Methoden zur Messung der Oberflächenverformung lassen sich grundsätzlich nach ihrem Wirkprinzip kategorisieren [Fle2003], siehe Abbildung 1.2. Lokale Verformungen an diskreten Punkten der Oberfläche können durch *taktile* arbeitende Messeinrichtungen wie Dehnungsmessstreifen (DMS) oder Digitalmessuhren erfasst werden. Optische Messverfahren erlauben hingegen eine berührungslose, großflächige und räumlich aufgelöste Bestimmung von Verformungsfeldern. Optische Verfahren lassen sich nach der Beleuchtungsart unterteilen. Ansätze mit *kohärenter* Beleuchtung wie elektronische Specklemuster-Interferometrie (ESPI) oder Moiré-Interferometrie basieren auf einer phasenbasierten Auswertung, während Ansätze mit *inkohärenter* Beleuchtung amplitudenbasierte Algorithmen zur Bildkorrelation (Digital Image Correlation – DIC) einsetzen. Die digitale Specklephotographie (DSP) bildet einen Spezialfall, da zwar eine kohärente Beleuchtung eingesetzt wird, um auf der Probenoberfläche ein Laserspecklemuster zu erzeugen, aber die Auswertung der Verformung durch Bildkorrelation erfolgt.

DMS sind als Industrielösung etabliert, da sie eine günstige und einfache Bestimmung von Bauteilverformungen ermöglichen [Ajo2011]. Das Messprinzip beruht auf der verformungsabhängigen Änderung des spezifischen Widerstands. Für Spezialanwendungen existieren auch DMS mit einem Faser-Bragg-Gitter, welche eine Dehnungsmessung im Bereich von  $10^{-7}$  % ( $10^{-3}$  microstrain [ $\mu\epsilon$ ]) ermöglichen [Che2011]. DMS müssen allerdings je nach Material des Bauteils durch Kleben, Schweißen oder Schrauben fest mit der Oberfläche verbunden werden und messen zudem nur einzelne lokale Verformungswerte am Ort ihrer Applikation. DMS sind deshalb weniger praktikabel, wenn Verformungen großflächig an vielen Orten bestimmt werden müssen oder wenn ein inhomogenes Verformungsfeld mit hohen lokalen Gradienten zu erwarten ist. Außerdem können eine fehlende Zugänglichkeit oder eine Vielzahl zu untersuchender Messobjekte, welche alle

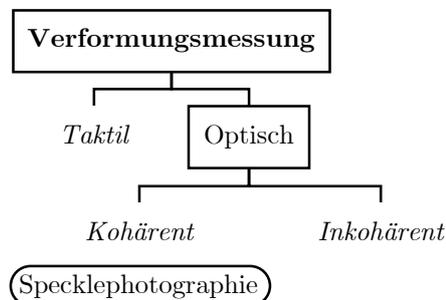


Abbildung 1.2: Kategorisierung von Ansätzen zur Messung der Oberflächenverformung und Einordnung der Specklephotographie (DSP).

einzelnen präpariert werden müssten, DMS für eine prozessbegleitende Lastmessung während der Fertigung oder im Betrieb von Bauteilen disqualifizieren.

Im Gegensatz dazu liefern interferometrische Messmethoden räumlich aufgelöste Verformungsfelder, indem sie die Phaseninformation des von der Oberfläche reflektierten Wellenfelds auswerten. Dabei wird die Probenoberfläche mit kohärentem Laserlicht beleuchtet. Ausgewertet wird das Interferenzstreifenmuster aus dem resultierenden Streulichtfeld und einem Referenzstrahl. In der ESPI wird ein Phasenschiebeprozess eingesetzt, um Out-of-plane-Verformungen zu messen [Tor2016], während mittels Moiré-Interferometrie In-plane-Verformungen ausgewertet werden [Pos2008]. Die interferometrische Abstandsmessung kann nicht nur mit Laserlicht, sondern auch mit breitbandigerem Weißlicht in einem konfokal-chromatischem Sensor [Tiz1994] oder einem Weißlichtinterferometer (WLI) [Flo1972, Ols2000] durchgeführt werden. Beide Verfahren eignen sich allerdings ausschließlich zur Messung von Out-of-plane-Verformungen.

Mit interferometrischen Messmethoden lassen sich Verformungen im Nanometerbereich mit, je nach optischem System, hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung messen [Fle2003]. Es existieren Messansätze für ebene sowie gekrümmte Oberflächen und die Probe muss nicht präpariert werden. Allerdings beschränkt sich der Einsatz in der Fertigungsmesstechnik meist auf Laboranwendungen, da die Aufbauten teuer und komplex zu bedienen sind. Zudem sind Interferometer grundsätzlich anfällig für Vibrationen, welche die Länge des Referenzpfades verändern können, und somit die prozessnahe Anwendung einschränken [Hil2006].

Durch die ständige Weiterentwicklung sowohl von Digitalkameras als auch der Bildauswertelgorithmen und Rechenleistung hat sich die DIC zu einer etablierten Technik für die Messung von Oberflächenverformungsfeldern entwickelt [Pan2009]. Der Messaufbau ist einfach und flexibel, da zur Messung von zweidimensionaler In-plane-Verformung nur eine Digitalkamera und eine inkohärente Beleuchtungsquelle benötigt wird. DIC wird in verschiedensten Bereichen eingesetzt, von nanoskaligen Verformungsmessungen an biologischen Materialien [Ber2006] bis hin zur drohnengestützten Inspektion des baulichen Zustands von Brücken aus der Luft [Rea2017]. Zur Verformungsmessung werden mit dem parallel zur Oberfläche ausgerichteten Kamerasensor Bildserien aufgenommen und sequenzielle Bildpaare ausgewertet. Um ein räumlich aufgelöstes Verformungsfeld zu erhalten, werden die Bildpaare in quadratische Auswertefenster unterteilt und für jedes Auswertefenster werden die beiden lateralen, lokalen Verformungskomponenten berechnet [Zho2001]. Die dabei eingesetzten Bildverfolgungsalgorithmen basieren entweder auf der Kreuzkorrelation oder der Methode der kleinsten Quadrate [Yan2019]. Um die Verformung der Oberfläche im Bild zu verfolgen, werden natürlich auftretende oder künstlich aufgebrachte Oberflächenmarkierungen genutzt. Zur Oberflächenmarkierung werden meist Farbsprays, Rotationsbeschichtung oder Lithographie eingesetzt [Don2017]. Bei Messungen ohne vorherige Präparation der Probenoberfläche ist dabei zu beachten, dass die realisierbare Messunsicherheit und räumliche Auflösung stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängen.

Ein Spezialfall der DIC ist die in Abbildung 1.2 aufgeführte DSP. Dabei wird die untersuchte Oberfläche mit kohärentem Licht beleuchtet und Laserspeckle werden als Oberflächenmarkierungen für den Bildkorrelationsalgorithmus genutzt. Der Unterschied von Weißlichtspeckle bei inkohärenter Beleuchtung und Laserspeckle bei DSP ist von grundlegender Bedeutung. Weißlichtspeckle werden z.B. mittels Farbe physisch auf das Bauteil aufgebracht und verformen sich mit der Oberfläche. Laserspeckle hingegen sind ein Interferenzphänomen, das durch die Streuung von kohärenter Beleuchtung an rauen Oberflächen verursacht wird. Daher ist bei der DSP keine Vorbereitung der Probenoberfläche erforderlich, jedoch ist ein Laser im Versuchsaufbau notwendig. Bei lokalen Verformungen der Oberfläche folgen die Laserspeckle ortsfest der Oberflächentopographie. Dabei sind die zufälligen Messabweichungen aufgrund von Dekorrelation der Specklemuster abhängig von dem Betrag der In-plane-Verschiebung sowie von der Out-of-plane-Verschiebung [Goo2007]. Die Dekorrelation kann auch als Messeffekt für die Out-of-plane-Verschiebung eingesetzt werden [Tau2021]. Wie eingangs beschrieben, sind Out-of-plane-

Verschiebungen allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit. Für DSP wurde gezeigt, dass bei Auswertung einer hinreichend großer Zahl ( $> 100$ ) voll entwickelter Speckle und unter Vernachlässigung der Bildquantisierung In-plane-Starrkörperverschiebungen im einstelligen Nanometerbereich gemessen werden können und die Messunsicherheit nur durch die heisenbergsche Unschärferelation begrenzt ist [Fis2017]. Mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera und geeigneter Objektive erlaubt die DSP eine schnelle, nicht-invasive Messung mit großem Arbeitsabstand. Allerdings lassen sich die kombinierten Messanforderungen, d. h. eine geringe Messunsicherheit bei gleichzeitig hoher räumlicher Auflösung, aktuell noch nicht erreichen [Bri2002, Ale2020], da beide Anforderungen über die Größe des DIC-Auswertefensters bzw. des räumlichen Integrationsbereichs gegenläufig voneinander abhängen. Im Gegensatz zu Weißlichtspeckle oder natürlich auftretenden Oberflächenmarkierungen lassen sich die statistischen Eigenschaften wie der Kontrast [Bro2014] oder der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Intensitäten [Ben2018] des Laserspecklemusters allerdings mittels eines phasenbasierten räumlichen Lichtmodulators (engl. „Spatial Light Modulator“ – SLM) schnell und reproduzierbar anpassen. Zusätzlich lässt sich mit einem phasenbasierten SLM die laterale Korrelationslänge der Speckle manipulieren [Ben2019]. Bislang wurde allerdings noch nicht untersucht, wie sich eine Variation des Laserspecklemusters mittels SLM nutzen lässt, um damit die derzeitige Messbarkeitsgrenze von DSP zu überwinden.

DSP wurde bereits in verschiedenen Produktionsprozessen und Materialuntersuchungen eingesetzt: Beim Lochbohren zur Eigenspannungsmessung [Vio2004], bei Hochtemperatur-Zugversuchen [Son2018], beim Einzahnfräsen [Tau2018b], beim Schleifen [Tau2018a], beim elektrohydraulischen Umformen [Ale2020], beim Festwalzen [Tau2021] und beim Funkenerodieren [Fis2023a]. In diesen fertigungstechnischen Anwendungen treten in der Regel Gradienten höherer Ordnung im Verformungsfeld auf, ausgelöst durch lokalisierte Beanspruchungen, inhomogene Materialeigenschaften sowie im Bereich von Löchern oder Kerben. Es ist bekannt, dass Verformungsgradienten die Dekorrelation in DSP erhöhen [Sjö1997], allerdings bleibt zu untersuchen, in welchem Maße daraus zufällige und systematische Messabweichungen resultieren.

### 1.2.2 Multiparametrische Oberflächencharakterisierung

Die Beschaffenheit einer technischen Oberfläche wird durch ihre Höhenverteilung  $H(x, y)$  bestimmt. Die Oberflächenhöhenverteilung ist in jeder der drei Raumrichtungen abhängig von dem Fertigungsverfahren und den Prozessparametern und kann deshalb im Allgemeinen nicht durch einen einzigen Rauheitsparameter charakterisiert werden. Unidirektional wirkende Endbearbeitungsprozesse wie das Feinschleifen erzeugen anisotrope Oberflächen und erfordern somit in der prozessbegleitenden Qualitätssicherung eine multiparametrische Oberflächencharakterisierung nach ISO 25178-2 [Int2012]. Gemäß dieser Norm wird die Beschaffenheit der Oberfläche beschrieben durch sowohl Parameter für die statistische Verteilung der Höhenwerte ( $z$ -Richtung), wie die mittlere quadratische Höhe  $S_q$ , als auch entlang der Oberfläche ( $x, y$ -Richtung) durch räumliche Parameter wie die Autokorrelationslänge  $S_{al}$  oder das Seitenverhältnis der Oberflächentextur  $S_{td}$ . Mittels Feinschleifen werden hochqualitative Oberflächen mit  $S_q < 0,1\mu\text{m}$  erzeugt, was eine Messunsicherheit der Höhenvariationen im einstelligen Nanometerbereich erfordert. Die Oberflächen sind anisotrop, weshalb die Normparameter richtungsabhängige Größen sind und somit in und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung gemessen werden müssen. Darüber hinaus erfordert die Qualitätsprüfung im Prozesstakt eine schnelle Charakterisierung der gesamten Oberfläche, was eine hohe zeitliche Auflösung sowie einen großen Beobachtungsbereich und Arbeitsabstand bedingt. So erfordert beispielsweise eine prozessbegleitende Qualitätssicherung in der mit bis zu 300 m/min laufenden Bandstahlfertigung bei einem Beobachtungsbereich von  $\approx 1\text{cm}^2$  eine Messrate  $> 500\text{Hz}$  [Pat2017]. Aufgrund der Relativbewegung des Messobjekts muss der Arbeitsabstand dabei mindestens einige Zentimeter betragen [Pat2016]. Analog zum vorherigen Abschnitt lassen sich die Messanforderungen der multiparametrischen Charakterisierung der

Oberflächenbeschaffenheit zusammenfassend einteilen in:

- *Messsystem*
  - Messunsicherheit  $< 10 \text{ nm}$
  - zeitliche Auflösung  $< 5 \text{ ms}$
  - Beobachtungsbereich  $> 1 \text{ cm}^2$
- *Messobjekt*
  - Oberflächenbeschaffenheit anisotrop
  - komplexe Oberflächenform (gekrümmt, geneigt)
- *Messumgebung*
  - Arbeitsabstand  $> 10 \text{ cm}$
  - robust gegenüber Vibrationen

Methoden zur Oberflächencharakterisierung können nach ISO 25178-6 [Int2010a] in drei Kategorien eingeteilt werden, siehe Abbildung 1.3. Die erste Kategorie sind Profillinienmessungen, wofür meist taktil arbeitende eindimensional scannende Tastschnittgeräte [Int1998] eingesetzt werden [Pfe2015], es existieren aber auch hochpräzise optische Punktsensoren mit interferometrischem Wirkprinzip [Sch2015]. Dabei ist die Messgröße ein eindimensionales Höhenprofil  $z(x)$ , welches nach ISO 4287 [Int2010a] senkrecht zur Bearbeitungsrichtung gemessen wird. Tastschnittgeräte bildeten lange Zeit den Industriestandard für die Oberflächencharakterisierung, können aber aufgrund ihres taktilen Messprinzips die hier formulierten Messanforderungen bezüglich der zeitlichen Auflösung sowie des Arbeitsabstands nicht erfüllen [Lea2014].

Darüber hinaus wird mit der flächenhaften Topographiemethode eine zweidimensionale Oberflächentopographie  $z(x,y)$  gemessen. Mit optischen Verfahren wie der Weißlichtinterferometrie (WLI) [Flo1972] und der konfokalen Mikroskopie [Udu2000] lässt sich die Oberflächentopographie berührungslos mit einer Messunsicherheit  $< 10 \text{ nm}$  und räumlichen Auflösung  $< 500 \text{ nm}$  erfassen. Allerdings begrenzt auch hier die Notwendigkeit einer scannenden Abtastung in horizontaler bzw. lateraler Richtung die Messrate und damit das Potenzial für schnelle Messungen während oder unmittelbar nach dem Fertigungsprozess [Lea2011]. Die lateral scannende Weißlichtinterferometrie (LSWLI) [Ols2000] erlaubt auch eine Messung der Topographie bewegter Oberflächen und es wurde gezeigt, dass sich mit einem kombinierten Messansatz aus LSWLI und DSP die störende In-plane-Vibrationen einer Stahlwalze in einer Fertigungsumgebung kompensieren lassen [Fis2022]. Eine zeitliche Auflösung  $< 5 \text{ ms}$  bei einem Beobachtungsbereich  $> 1 \text{ cm}^2$  lässt sich mit

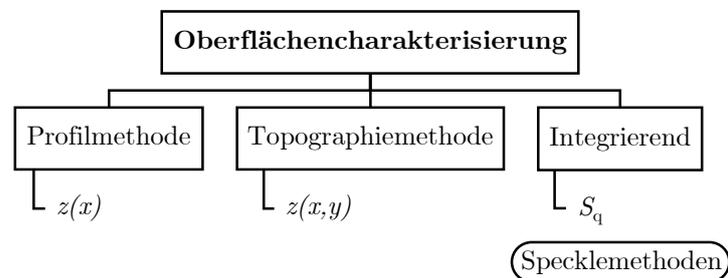


Abbildung 1.3: Kategorisierung von Ansätzen zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit und ihrer Messgrößen sowie Einordnung der Specklemethoden zur Oberflächencharakterisierung.

dem LSWLI/DSP-Ansatz allerdings noch nicht realisieren und zudem ist das Messsystem anfällig für Out-of-plane-Vibrationen.

Flächenhaft integrierende Messmethoden liefern keine Profil- oder Topographiedaten, sondern einzelne statistische Oberflächenparameter wie  $S_q$ ,  $S_{al}$  oder  $S_{td}$ . Dies ermöglicht eine schnelle Charakterisierung eines Oberflächenbereichs, da die Topographie nicht räumlich aufgelöst werden muss. Am weitesten verbreitet sind integrierende Messmethoden basierend auf der Auswertung von Streulicht.

Bei der vollständig aufintegrierten Messung des Streulichts (Total Integrated Scattering – TIS) wird die Gesamtinformation der Streulichtverteilung auf einen Wert reduziert und das Verhältnis der Gesamtleistung des Streulichts in einer Halbkugel zu der Leistung des spekulär reflektierten Lichts, welches durch ein Loch aus der Halbkugel austritt, ausgewertet [Sto2012]. Dieses Verhältnis ist für feinbearbeitete Oberflächen mit  $S_q < 0,3\lambda$  proportional zur mittleren quadratischen Höhe der Oberfläche [Dav1954, Vor1993]. TIS ist allerdings grundsätzlich dadurch limitiert, dass nur ein Messwert für die gesamte Halbkugel bestimmt wird und so keine richtungsabhängigen Informationen über Rauheitsparameter anisotroper Proben gemessen werden können [Sto2012].

Die winkelaufgelöste Messung der Streulichtverteilung (Angular Resolved Scattering – ARS) ist sowohl in der mechanischen Umsetzung als auch in der Auswertung komplexer, bietet aber Vorteile gegenüber TIS. Da nicht über die gesamte Hemisphäre integriert wird, können mit ARS im Gegensatz zu TIS auch anisotrope Oberflächenparameter bestimmt werden. Zudem kann bei besonders glatten Oberflächen mit  $S_q < 0,05\lambda$  ( $\lambda$  ist die Wellenlänge des Streulichts) aus der winkelaufgelösten Streulichtverteilung die spektrale Leistungsdichte der Oberfläche bestimmt werden, die einen größeren Informationsgehalt als der Parameter  $S_q$  hat [Vor1993]. Der gesamte ARS-Messaufbau mit Lichtquelle und Sensor kann in einem tragbaren Gerät untergebracht werden [Bro1985]. Mit ARS lassen sich schnelle Messungen von Rauheiten bis in den einstelligen Nanometerbereich realisieren, allerdings ist der Arbeitsabstand der winkelaufgelösten Messung  $< 10\text{cm}$  und es ist unklar, ob für  $S_q > 0,05\lambda$  eine multiparametrische Oberflächencharakterisierung möglich ist [Sto2014].

Specklemethoden ermöglichen sowohl eine schnelle Single-Shot-Messung von einem Beobachtungsfeld im Quadratmeterbereich als auch einen großen Arbeitsabstand  $> 10\text{cm}$ , was sie für die prozessbegleitende Qualitätsprüfung unter widrigen Bedingungen prädestiniert [Pat2017]. Dabei wird die Oberfläche kohärent beleuchtet und das Speckle-Streulichtmuster an einer Position mit einer Kamera aufgenommen und analysiert. Die mittlere quadratische Höhe  $S_q$  wurde historisch zuerst bei isotropen Oberflächen durch die Messung des Specklekontrasts  $C = \sigma(I)/\langle I \rangle$ , d. h. die Standardabweichung  $\sigma(I)$  geteilt durch den Mittelwert  $\langle I \rangle$  der Speckleintensität  $I$  bestimmt [Fuj1974, Ped1974]. Mit der auf dem Specklekontrast basierten Messung der mittleren quadratischen Höhe  $S_q$  im Bereich von  $(0,03 - 0,15)\lambda$  lässt sich eine minimale relative Messunsicherheit von  $1 - 2\%$  erreichen, welche primär von der Anzahl der ausgewerteten Speckle abhängt [Fis2023b]. Der Specklekontrast weist jedoch eine Querempfindlichkeit zur Korrelationslänge  $S_{al}$  auf [Goo2007]. Somit ist eine Kalibrierkurve des Specklekontrasts in Abhängigkeit der Rauheit immer nur für einen Oberflächentyp gültig. Ein weiterer Messansatz basiert auf der Auswertung der zweidimensionalen Autokorrelationsfunktion des Specklemusters [Leh1999]. Auch hier ist eine Kalibrierung für jeden Oberflächentyp, d. h. jede Oberflächenhöhenverteilung notwendig. Voraussetzung einer specklebasierten Rauheitsmessung ohne vorherige Kenntnis des Oberflächentyps ist deshalb eine zusätzliche Erfassung der Autokorrelationslänge  $S_{al}$  der Oberflächenhöhenverteilung.

Zusätzlich zur Messung der in ISO 25178-2 [Int2012] definierten Höhenparameter, wie  $S_q$  oder  $S_a$ , wurde nachgewiesen, dass auch die laterale Autokorrelationslänge  $S_{al}$  als räumlicher Parameter einer isotropen Oberfläche mit Specklemethoden messbar ist. Die laterale Korrelationslänge wurde zuerst aus Mehrfachmessungen mit verschiedenen optischen Aperturen bestimmt [Fuj1976, Kad1987, Kad1988]. Der Ansatz der Aperturmodulation wurde von Cheng [Che2002] weiterentwickelt, um die Messunsicherheit von  $S_{al}$  unter einen Mikrometer zu senken. Allerdings

war die Messrate aufgrund der manuellen Einstellung der Apertur über verschiedene Lochblenden immer noch begrenzt. Ein weiterer Ansatz ist die Bestimmung des Rauheitsparameters und der Korrelationslänge aus der Autokorrelation der Speckle im tiefen Fresnel-Bereich nahe der Oberfläche [Lia2013, Liu2014]. Hierbei lag der Arbeitsabstand allerdings unter 1 cm und es wurden ausschließlich isotrope Oberflächen betrachtet. Somit bleibt zu klären, ob sich auch die richtungsabhängige laterale Korrelationslänge anisotroper Oberflächen mit Specklemethoden in einer Single-Shot-Messung bestimmen lässt.

Zur Charakterisierung von anisotropen Oberflächen ist die Messung richtungsabhängiger Oberflächenparameter von Interesse. Bei unidirektionalen Fertigungsverfahren, wie dem Schleifen, sind das beispielsweise die mittlere quadratische Rauheit parallel und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung. Auch diese bidirektionalen Parameter lassen sich mit Specklemethoden bestimmen. Für die bidirektionale Rauheitsmessung wurden die zweidimensionale Korrelationsfunktion [Hir2006, Shi2015], die Grauwertmatrix [Lu2006, Pra2019] des Streulichtmusters oder das Gauß-Markov-Zufallsfeldmodell [Yan2010] des Streulichtfelds ausgewertet. In diesen Arbeiten wurden die anisotropen Proben manuell zum Kamerasensor ausgerichtet, d. h., die Bearbeitungsrichtung wurde nicht bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass die Bearbeitungsriefen auf dem gefertigten Werkstück aus dem Schleifprozess Oberflächenstrukturen bilden, die in einer Dimension deutlich größer als die Beugungsgrenze sind, was die Struktur des Speckle-Streulichtmusters verändert [Shi2015]. Es ist eine offene Forschungsfrage, welche Informationen sich bezüglich der Bearbeitungsrichtung und der Korrelationslänge  $S_{al}$  anisotroper Oberflächen aus den Speckle-Streulichtmustern gewinnen lassen, die sowohl Eigenschaften des statistisch verteilten Specklemusters aufweisen als auch Oberflächenstrukturen abbilden.

### 1.3 Zielsetzung und Aufbau

Das Ziel dieser Arbeit ist es, specklebasierte Ansätze für die hochaufgelöste Messung von Verformungsfeldern und die multiparametrische Charakterisierung anisotroper Oberflächen mittels adaptiver Optiken zu erweitern. Um die derzeitige Grenze der Messbarkeit der specklebasierten Verformungsmessung zu überwinden, soll insbesondere geklärt werden, inwieweit zufällige Messabweichungen aufgrund von Specklerauschen und systematische Messabweichungen aufgrund von Verformungsgradienten minimiert werden können. Damit wird eine Reduktion der Messunsicherheit unter Beibehaltung der räumlichen Auflösung erreicht. Die specklebasierte Rauheitsmessung soll für die multiparametrische Oberflächencharakterisierung erweitert werden, um auch anisotrope Oberflächentopographien mit richtungsabhängigen Parametern in einer schnellen Single-Shot-Messung charakterisieren zu können.

In **Kapitel 2** werden die Prinzipien der verschiedenen erweiterten Messansätze erläutert. Bei der Verformungsmessung wird eine adaptive Optik für eine räumliche Modulation der Laserbeleuchtung eingesetzt, um Mehrfachmessungen mit Ensemblemittelung zu realisieren. Das theoretische Potenzial des Messansatzes wird durch die Auswertung von simulierten Specklemustern untersucht. Für die Oberflächencharakterisierung werden adaptive Optiken eingesetzt, um das inverse Problem des specklebasierten Ansatzes zur Messung von  $S_q$  und  $S_{al}$  von anisotropen Oberflächen zu lösen. Dafür ersetzt ein phasenbasierter SLM das Messobjekt, um eine Vielzahl von vorgegebenen Oberflächentopographien zu emulieren. Auf diese Weise wird eine große Stichprobenanzahl bereitgestellt, die eine experimentelle Untersuchung der Sensitivität des Speckle-Streulichtmusters bezüglich verschiedener Oberflächenparameter ermöglicht. Zu beachten ist, dass in der vorliegenden Arbeit ausschließlich eine anisotrope Oberflächenklasse untersucht wird, bei der die Oberflächenstrukturen in einer Richtung deutlich kleiner und senkrecht dazu deutlich größer als die Auflösungsgrenze des abbildenden optischen Systems sind.

Die Ergebnisse der hochauflösenden Verformungsmessung werden anschließend in **Kapitel 3**

dargestellt. Dabei wird die Unschärferelation von Orts-, Zeit- und Messauflösung experimentell untersucht und geklärt, wie weit sich zufällige Messabweichungen durch Specklerauschen mittels einer Beleuchtungsmodulation reduzieren lassen. Darüber hinaus wird eine simulative Studie zu Messabweichungen aufgrund von Verformungsgradienten vorgestellt. Die Ergebnisse dieser Studie werden angewandt, um in experimentell gemessenen Daten systematische Messabweichungen zu korrigieren.

**Kapitel 4** stellt die Ergebnisse der multiparametrischen Charakterisierung von anisotropen Oberflächen vor. Mittels eines SLM als Referenztopographie wird gezeigt, welche Oberflächenparameter aus dem Speckle-Streulichtmuster anisotroper Oberflächen ausgewertet werden können. Weiterhin wird die Emulation einer großen Anzahl von Referenztopographien genutzt, um den Messbereich und die jeweilige experimentelle Messunsicherheit zu bestimmen. Um eine Oberflächencharakterisierung an komplexen Bauteilformen zu ermöglichen, werden außerdem die Querempfindlichkeiten bezüglich der Neigung und Krümmung untersucht.

Abgeschlossen wird die Dissertation in **Kapitel 5** mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen. Hier wird dargelegt, wie die vorgestellten Messansätze auf weitere anisotrope Oberflächenklassen erweitert werden können und inwieweit eine Integration in industrielle Fertigungsprozesse erreichbar ist.



## 2 Erweiterung von Specklemethoden mittels adaptiver Optiken

In diesem Kapitel werden die specklebasierten Prinzipien für die Verformungsmessung und die multiparametrische Oberflächencharakterisierung eingeführt. Als Grundlage werden zuerst in Abschnitt 2.1 die Entstehung, die Simulation und die für diese Arbeit messtechnisch relevanten Eigenschaften von Specklemustern beschrieben. Anhand der Simulation wird die Abhängigkeit des Specklemusters von der Oberflächenbeschaffenheit und Oberflächenverformung zunächst qualitativ demonstriert. Die quantitative Auswertung dieser Messeffekte wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. In Abschnitt 2.2 wird die Oberflächenverformung mittels Bildkorrelation aus dem Specklemuster berechnet. Außerdem wird das Messunsicherheitsbudget der specklebasierten Verformungsmessung aufgestellt und eine Erweiterung der Messmethode eingeführt, wodurch die zufälligen Messabweichungen mittels einer adaptiven Optik reduziert werden. Die specklebasierte Charakterisierung anisotroper Oberflächen wird in Abschnitt 2.3 beschrieben. Dabei kommt eine adaptive Optik zum Einsatz, um Referenztopographien zu emulieren und somit das inverse Problem der multiparametrischen Oberflächencharakterisierung zu lösen.

### 2.1 Entstehung, Simulation und Eigenschaften von Speckle

#### 2.1.1 Entstehung

Laserspeckle entstehen, wenn eine kohärente Lichtquelle auf eine Oberfläche mit Höhenvariationen in der Größenordnung der Wellenlänge leuchtet. Abbildung 2.1 zeigt, wie ein aufgeweiteter und kollimierter Laserstrahl an einer rauen Oberfläche gestreut wird. Durch Höhenvariationen in der Feinstruktur der Oberfläche gibt es viele Streuzentren, von denen sich Kugelwellen in alle Raumrichtungen ausbreiten. Bei Beobachtung des Streulichts auf einem Schirm (objektive Speckle) oder durch eine abbildende Optik (subjektive Speckle) wie das menschliche Auge ergibt sich

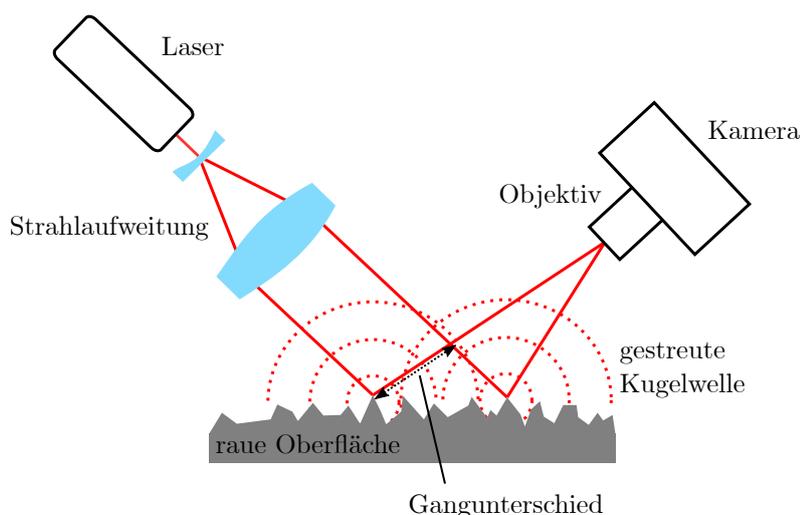


Abbildung 2.1: Entstehung subjektiver Speckle auf dem Kamerasensor.

ein Interferenzmuster aus vielen zufällig verteilten hellen und dunklen Flecken (engl. „speckle“), das Specklemuster. Diese konstruktiven und destruktiven Interferenzen entstehen durch Gangunterschiede der vielen gestreuten Kugelwellen, welche sich in der Beobachtungsebene überlagern. Deshalb hängt das Specklemuster sowohl von der Höhenverteilung als auch von der Position der streuenden Oberfläche ab.

### 2.1.2 Simulationsmodell

Im Folgenden wird die mathematische Beschreibung und Simulation von Specklemustern nach Goodman [Goo1996, Goo2007] beschrieben. Abbildung 2.2 zeigt einen Aufbau zur Messung des subjektiven Specklemusters einer rauen Oberfläche. Die Oberfläche wird mittels eines Strahlteilers senkrecht beleuchtet und das Specklemuster wird durch einen 4- $f$ -Aufbau mit einer Lochblende als Raumfilter auf einen Kamerasensor abgebildet. Der aufgeweitete und kollimierte Laserstrahl trifft als ebene Welle mit der komplexen Amplitude

$$W_1(x, y) = W_0 \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{r_{L,x}^2} - \frac{y^2}{r_{L,y}^2}\right)} \cdot e^{ik_w z} \quad (2.1)$$

und gaußscher Intensitätsverteilung an Position (1) auf die Oberfläche mit dem Koordinatensystem  $(x, y, z)$ . Dabei ist  $W_0$  die maximale Amplitude des Wellenfeldes an Position (1) und  $z$  die Ausbreitungsrichtung von der Oberfläche ausgehend.  $r_{L,x}$  und  $r_{L,y}$  bezeichnen den Abstand, in welchem die Strahlungsleistung auf das  $1/e^2$ -fache des Maximums in der Mitte des Strahls abnimmt [Pat2010].  $k_w = 2\pi/\lambda$  ist die Wellenzahl mit der Laserwellenlänge  $\lambda$ .

Die Streuung des Wellenfeldes an der Oberfläche mit der Höhenverteilung  $H(x, y)$  moduliert dessen Phasenverteilung, so dass eine neue Wellenfront

$$W_2(x, y) = W_1(x, y) \cdot e^{2ik_w H(x, y)} \quad (2.2)$$

an Position (2) in Abbildung 2.2 entsteht. Da die absolute Intensität des Specklemusters für die Auswertung mittels normierter Parameter wie Kontrast oder Autokorrelationsfunktion keine Rolle spielt, können der Reflexionsgrad und die Strahlungsintensität  $W_0$  gleich eins gesetzt

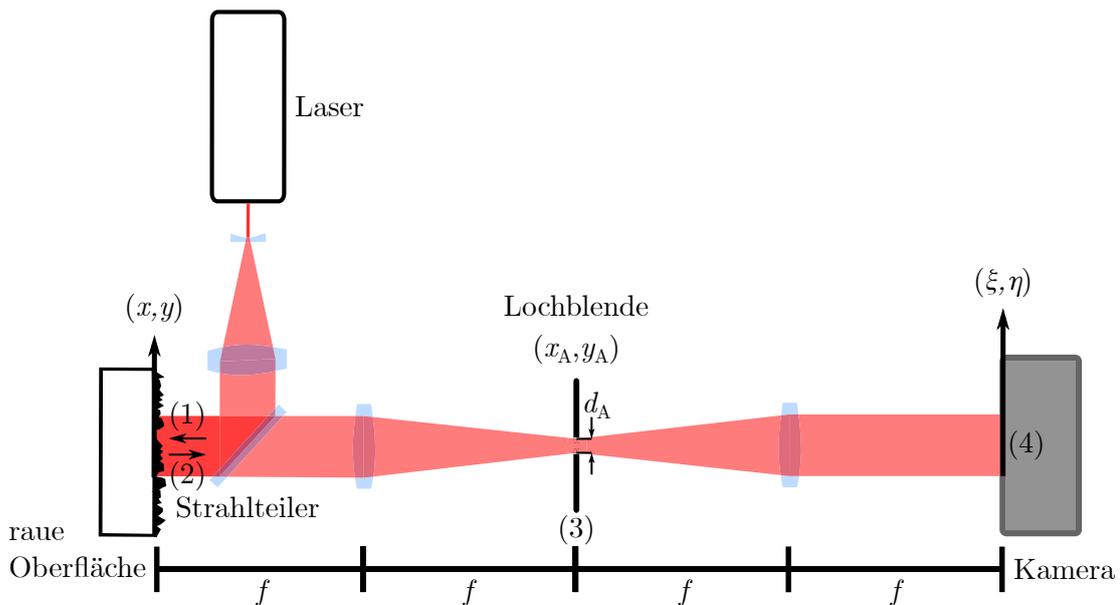


Abbildung 2.2: Beobachtung subjektiver Speckle im 4- $f$ -Aufbau.

werden. Nach der Streuung an der Oberfläche wird das Wellenfeld durch einen 4- $f$ -Aufbau auf einen Kamerasensor abgebildet. Der 4- $f$ -Aufbau besteht aus zwei Linsen der gleichen Brennweite  $f$  und einer Lochblende mit einer kreisförmigen Apertur

$$A_P(x_A, y_A) = \begin{cases} 1 & \text{für } \sqrt{x_A^2 + y_A^2} < d_A/2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.3)$$

mit dem Durchmesser  $d_A$ . Die Fokussierung des Laserstrahls in einer Sammellinse entspricht der räumlichen Fouriertransformation  $\mathcal{F}$  der komplexen Amplitude des Wellenfeldes, wodurch sich an Position (3) das Wellenfeld

$$W_3(x_A, y_A) = \mathcal{F}\{W_2(x, y)\} \cdot A_P(x_A, y_A) \quad (2.4)$$

ergibt. Die Apertur im Brennpunkt, d. h. der Fourierebene, entspricht einem Raumfilter, durch welchen sich die Größe der Speckle anpassen lässt. Eine Rücktransformation in den Zeitbereich durch die zweite Linse ergibt das Wellenfeld

$$W_4(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1}\{W_3(x_A, y_A)\} \quad (2.5)$$

des Specklemusters auf dem Kamerasensor mit dem Koordinatensystem  $(\xi, \eta)$  an Position (4).

Um auf Basis von Gleichung (2.5) Specklemuster zu simulieren, werden in Matlab für  $H(x, y)$  mit der Funktion `rand()` eine Matrix normalverteilter Höhenwerte mit der Standardabweichung  $S_q$  generiert und die Fouriertransformation, bzw. inverse Fouriertransformation, durch die Funktionen `fft2()` und `ifft2()` realisiert. Eine Graustufenmatrix des Specklemusters ergibt sich aus  $W_4^2(\xi, \eta)$ , dem Betragsquadrat des Wellenfeldes an Position (4).

### 2.1.3 Eigenschaften

In diesem Abschnitt werden anhand simulierter Specklemuster einige Eigenschaften von Specklemustern beschrieben, welche für die Messprinzipien der folgenden Abschnitte 2.2 und 2.3 ausschlaggebend sind. Abbildung 2.3 zeigt simulierte Specklemuster mit unterschiedlichen Standardabweichungen  $S_q$  der Höhenverteilung  $H(x, y)$ . Dabei sind die Laserwellenlänge  $\lambda = 638 \text{ nm}$ , die Brennweite  $f = 150 \text{ mm}$ , der Durchmesser der Apertur  $d_A = 4 \text{ mm}$  und die Pixelgröße  $s_{\text{pix}} = 8 \text{ }\mu\text{m}$ . Um die Bildebene homogen auszuleuchten, wird statt dem in Gleichung (2.1) eingeführten Gauß-Strahler ein Top-Hat-Strahlprofil mit einem ausreichend großen Durchmesser von 3 m verwendet. Für  $H(x, y)$  werden die Höhenverteilungen einer gaußschen Oberfläche mit der lateralen Korrelationslänge  $S_{\text{al}} = 10 \text{ }\mu\text{m}$  und den Standardabweichungen, bzw. den mittleren quadratischen Höhen,  $S_q = 0,01 \text{ }\mu\text{m} - 0,2 \text{ }\mu\text{m}$  eingesetzt. Die Simulation gaußscher Oberflächentopographien wird in Abschnitt 2.3.2 beschrieben. Bei einer ideal ebenen Oberfläche mit  $S_q = 0 \text{ }\mu\text{m}$  würde bei einem Reflexionsgrad von eins der gesamte Laserstrahl spekulär reflektiert. Sobald die Oberfläche Höhenvariationen aufweist, d. h. für  $S_q > 0 \text{ }\mu\text{m}$ , wird ein Teil der einfallenden Strahlung diffus gestreut, wodurch sich durch Interferenz des Streulichts in der Bildebene Speckle ausbilden. Wenn wie in Abbildung 2.3 (a), (b) und (c) sowohl spekuläre Reflexion als auch diffuse Streuung vorliegen, wird das Interferenzmuster als teilweise entwickeltes Specklemuster bezeichnet. Abbildung 2.3 (d) zeigt vollständig entwickelte Speckle, bei welchen ausschließlich diffuse Lichtstreuung vorliegt. Speckle sind vollständig entwickelt ab einer Oberflächenrauheit  $S_q \gtrsim \lambda/4$  [Goo2007]. Der genaue  $S_q$ -Wert des Übergangs ist abhängig von der lateralen Autokorrelationslänge  $S_{\text{al}}$  und dem Durchmesser der Apertur  $d_A$ . Die Abnahme des Anteils an spekulärer Reflexion bei zunehmender Rauheit  $S_q$  zeigt sich im Specklemuster an der globalen Reduktion der Strahlungsintensität und dem größeren Kontrast der Specklemuster. Bildlich gesprochen nimmt die Hintergrundstrahlung ab, wodurch die Speckle besser sichtbar werden. Während in Abbildung 2.3 (c) noch teilweise

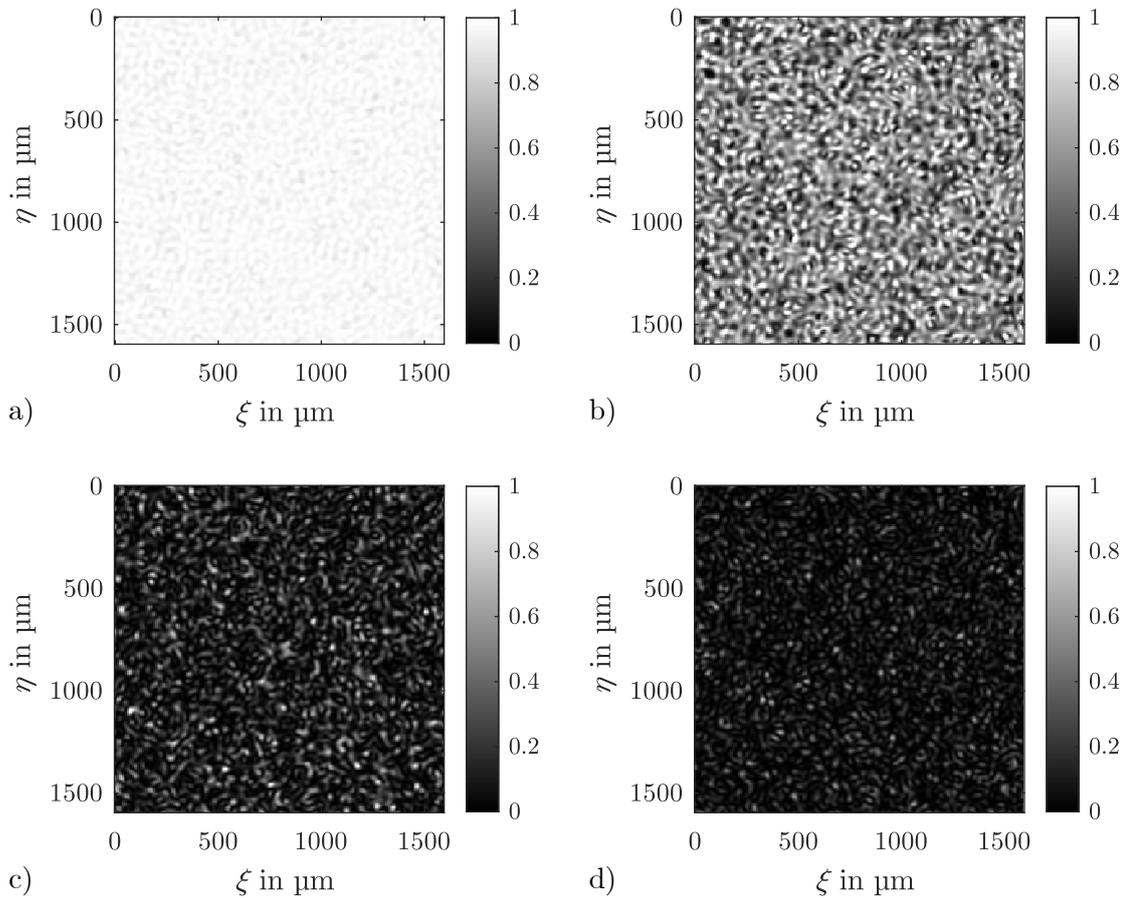


Abbildung 2.3: Simulierte Specklemuster für isotrope Oberflächenhöhenverteilungen  $H(x,y)$  mit unterschiedlicher Rauheit  $S_q$ . (a)  $S_q = 0,01 \mu\text{m}$ , (b)  $S_q = 0,05 \mu\text{m}$ , (c)  $S_q = 0,1 \mu\text{m}$ , (d)  $S_q = 0,2 \mu\text{m}$ .

mehrere Speckle durch größere graue Strukturen verbunden sind, sind die hellen und dunkeln Bereiche in Abbildung 2.3 (d) klar voneinander abgegrenzt.

Ein weiterer ausschlaggebender Parameter für das Specklemuster ist die Größe der Apertur, welche in Gleichung (2.4) in die Simulation eingeht. Die Größe der Speckle in der Bildebene wird bestimmt durch das Auflösungsvermögen der abbildenden Optik. Die mittlere Specklegröße

$$s_{\text{sp}} = \frac{\lambda z_A}{d_A \sqrt{\pi}}, \quad (2.6)$$

nach Goodman [Goo2007] ist abhängig von der Laserwellenlänge  $\lambda$ , dem Abstand zwischen Apertur und Sensor  $z_A$  sowie dem Durchmesser der kreisförmigen Apertur  $d_A$ . Somit muss die Apertur verkleinert werden, um größere Speckle zu erhalten. Abbildung 2.4 zeigt nach den gleichen Parametern wie Abbildung 2.3 (c) simulierte Specklemuster, bei welchen die Apertur  $d_A$  variiert wird.  $d_A$  wird von (a) bis (f) verkleinert, wodurch die Specklegröße  $s_{\text{sp}}$  von 1 Pixel auf 6 Pixel zunimmt. Außerdem ist zu erkennen, wie die Strahlungsintensität durch eine kleinere Apertur abnimmt. Je kleiner die Apertur wird, desto geringer wird die Anzahl an Speckle. Ein Vergleich von Abbildung 2.4 (c) und (d) zeigt, wie an verschiedenen Stellen des Musters aus (c) zwei helle Speckle in (d) nicht mehr einzeln aufgelöst werden können und zu einem weniger hellen Speckle werden. Für die specklebasierte Oberflächenmesstechnik ist die Größe der Apertur ein wichtiger Parameter, da eine zu große Apertur zu einem schlechten Kontrast und Pixelquantisierungsef-

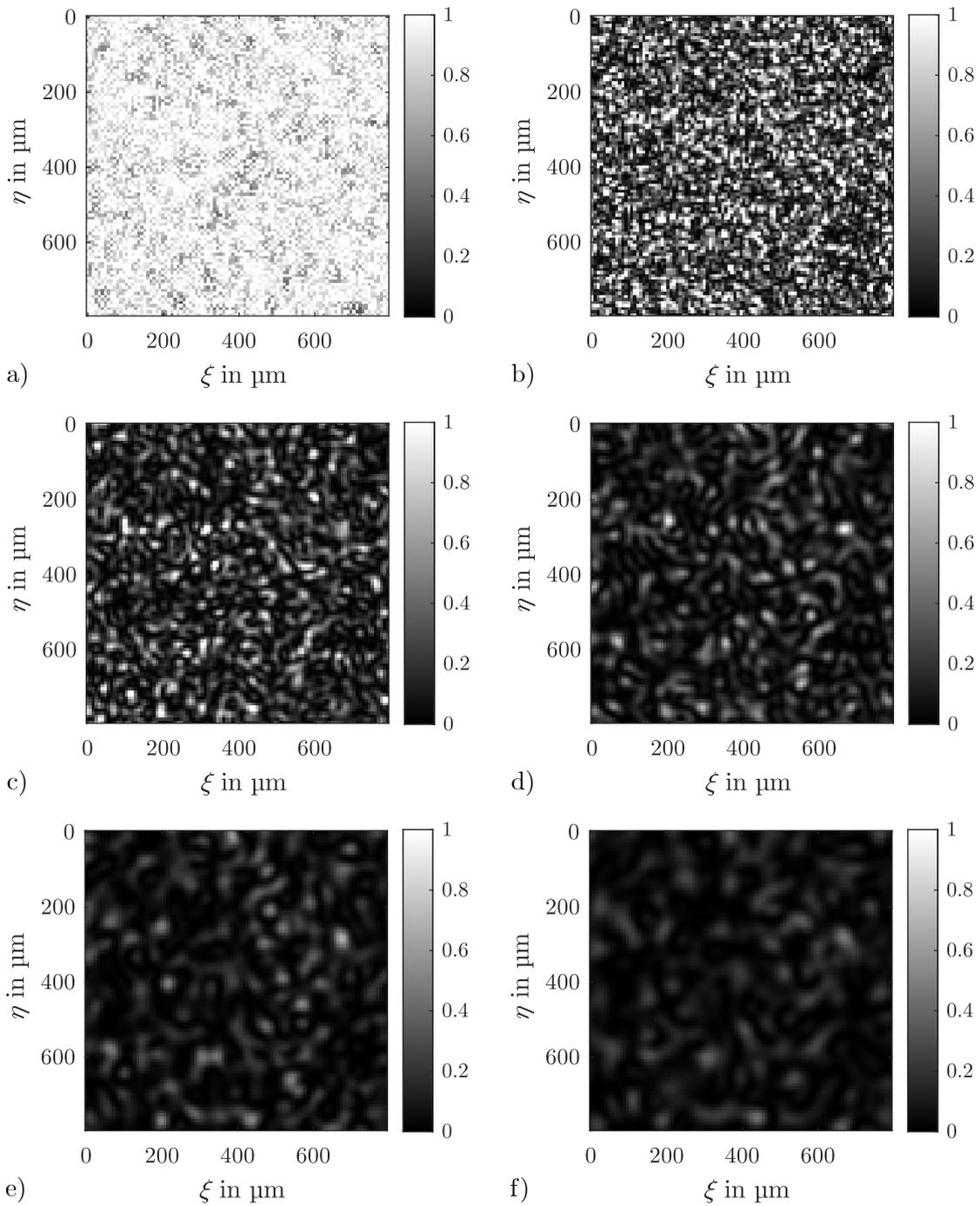


Abbildung 2.4: Simulierte Specklemuster für isotrope Oberflächenhöhenverteilungen  $H(x,y)$  mit der Rauheit  $S_q = 0,1\mu\text{m}$  bei Variation der Apertur  $d_A$ , wodurch sich die mittlere Specklegröße  $s_{\text{sp}}$ , die Intensität und der Kontrast der Specklemuster ändern. (a)  $d_A = 14,6\text{mm}$ ,  $s_{\text{sp}} = 1$  Pixel, (b)  $d_A = 7,3\text{mm}$ ,  $s_{\text{sp}} = 2$  Pixel, (c)  $d_A = 4,9\text{mm}$ ,  $s_{\text{sp}} = 3$  Pixel, (d)  $d_A = 3,6\text{mm}$ ,  $s_{\text{sp}} = 4$  Pixel, (e)  $d_A = 2,9\text{mm}$ ,  $s_{\text{sp}} = 5$  Pixel, (f)  $d_A = 2,4\text{mm}$ ,  $s_{\text{sp}} = 6$  Pixel.

fekten führt, siehe Abbildungen 2.4 (a) und (b). Eine zu kleine Apertur verringert wiederum den Informationsgehalt des Specklemusters durch eine geringe Intensität, geringen Kontrast und geringe Anzahl an Speckle, siehe Abbildungen 2.4 (e) und (f).

Abbildung 2.5 zeigt, wie sich das Specklemuster ändert, wenn die zugrundeliegende Oberfläche verschoben oder verformt wird. Die Simulationsparameter sind unverändert  $\lambda = 638\text{nm}$ ,  $f = 150\text{mm}$ ,  $d_A = 4\text{mm}$  und  $s_{\text{pix}} = 8\mu\text{m}$ . Die laterale Korrelationslänge der isotropen, gaußschen Oberfläche beträgt  $S_{\text{al}} = 10\mu\text{m}$  und die mittlere quadratische Höhe  $S_{\text{q}} = 0,1\mu\text{m}$ . In Abbildung 2.5 (a) und (b) ist eine konstante Starrkörperverschiebung um  $12\text{Pixel} \hat{=} 96\mu\text{m}$  in  $\xi$ -Richtung simuliert. Im Fall einer Starrkörperverschiebung der Oberfläche in  $x$ - oder  $y$ -Richtung (und ohne optische Vergrößerung) verschiebt sich das Specklemuster gleichermaßen in  $\xi$ - oder  $\eta$ -Richtung. Die Verschiebung ist an den eingezeichneten roten Kreisen verdeutlicht. In den markierten Bereichen ist erkennbar, dass sich das Muster verschiebt, ohne dass sich die Formen der einzelnen Speckle verändern. Im Gegensatz dazu sind in Abbildung 2.5 (c) und (d) die Specklemuster bei einer Verformung der Oberflächentopographie mit einem konstanten Verformungsgradienten zweiter Ordnung in  $\xi$ -Richtung gezeigt. Am rechten Bildrand von Abbildung 2.5 (d) beträgt die lokale Verformung  $V_{\xi}(\xi = 800\mu\text{m}, \eta) = 12\text{Pixel} \hat{=} 96\mu\text{m}$ , wie bei der Starrkörperverschiebung in Abbildung 2.5 (b). Die roten Markierungen zeigen auf, dass sich in diesem Fall das Specklemuster

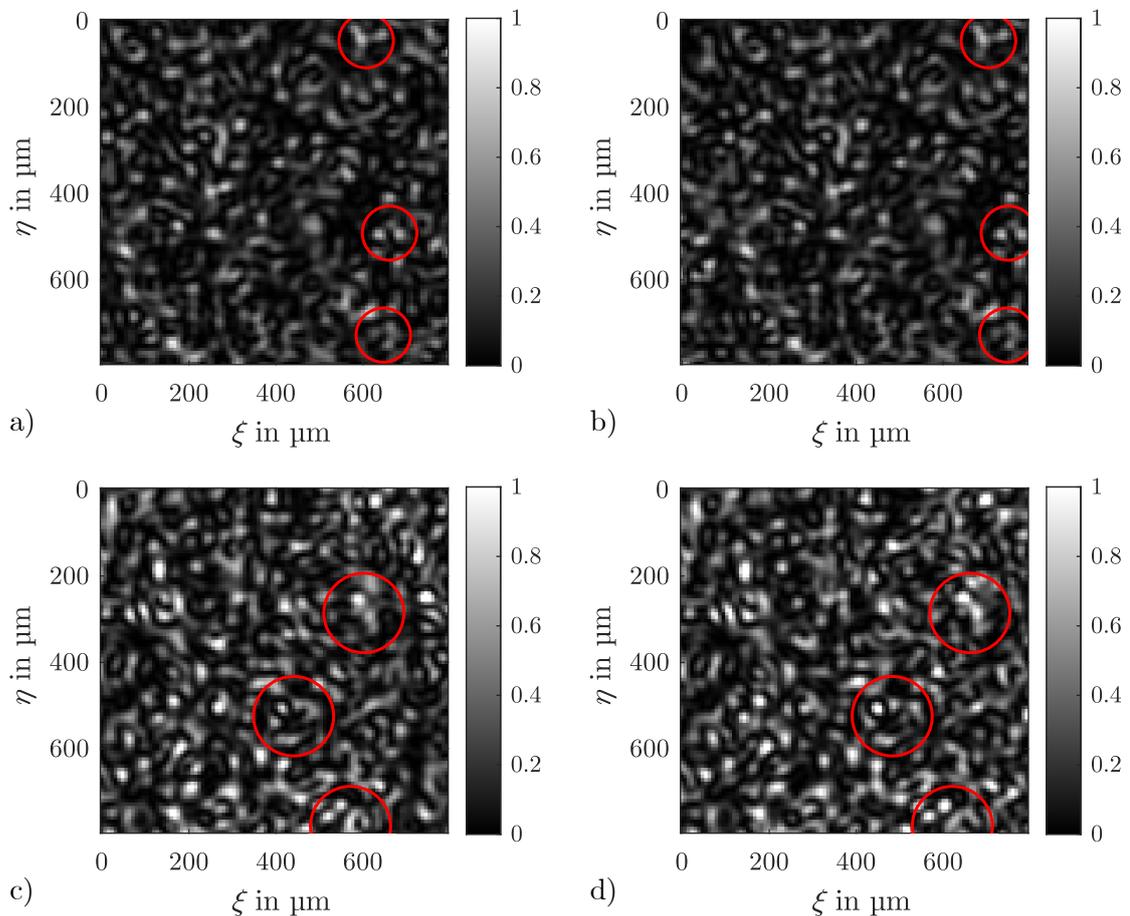


Abbildung 2.5: Veränderung des Specklemusters bei Verschiebung und Verformung der zugrundeliegenden Oberflächentopographie. (a), (b) Konstante Starrkörperverschiebung um  $12\text{Pixel} \hat{=} 96\mu\text{m}$  in  $\xi$ -Richtung. (c), (d) Verformung mit einem konstanten Gradienten zweiter Ordnung. Lokale Verformung:  $V_{\xi}(\xi = 800\mu\text{m}, \eta) = 12\text{Pixel} \hat{=} 96\mu\text{m}$ .

nicht nur verschiebt, sondern auch in seiner Struktur verändert. Einzelne Speckle verändern durch die Verformung der Oberflächentopographie ihre Form, Intensität oder Größe. Dabei werden die Speckle aber nicht wie die zugrundeliegende Oberfläche ausschließlich in  $\xi$ -Richtung gedehnt, sondern verändern ihre Form zufällig in alle Raumrichtungen. Diese statistische Variation des Specklemusters wird durch die Änderung der Feinstruktur der Oberfläche ausgelöst. Wie in Abbildung 2.1 beschrieben, wird ein Speckle nicht durch nur jeweils ein Oberflächenelement gebildet, sondern entsteht durch die Interferenz aller gestreuten Kugelwellen im beleuchteten Bereich. Dadurch hat eine Verformung eines Oberflächenbereichs eine (geringe) Auswirkung auf das gesamte Specklemuster. Die rot markierten Bereiche zeigen allerdings, dass die Speckle trotz kleiner lokaler Veränderungen weiterhin den lokalen Verformungen der Oberflächentopographie folgen. Diese Eigenschaft des Specklemusters wird im folgenden Abschnitt 2.2 für die Messung von Oberflächenverformungsfeldern mittels Bildkorrelation ausgenutzt.

## 2.2 Specklebasierte Messung der Oberflächenverformung

In der digitalen Specklephotographie (DSP) wird die Oberflächenverformung des Messobjekts aus der Verformung des Laserspecklemusters bestimmt. Im folgenden Abschnitt 2.2.1 wird der dafür genutzte Bildkorrelationsalgorithmus eingeführt. Da sich das Laserspecklemuster jedoch nicht exakt wie die streuende Oberfläche verformt und das Specklemuster darüber hinaus eine inhärente Statistik aufweist, beinhaltet das Ergebnis der DSP zufällige und systematische Messabweichungen. Die verschiedenen Komponenten des Messunsicherheitsbudgets werden in Abschnitt 2.2.2 erklärt. Für die Untergrenze der zufälligen Messabweichungen der DSP ergibt sich eine Unschärfere relation der Orts-, Zeit und Messauflösung, welche in Abschnitt 2.2.3 theoretisch beschrieben wird. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 2.2.4 eine Erweiterung der DSP mittels einer adaptiven Optik eingeführt, welche eine Reduktion der zufälligen Messabweichung bei gleichbleibender Ortsauflösung erlaubt. Abschließend werden in Abschnitt 2.2.5 die theoretisch gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der DSP und die sich daraus ergebenden offenen Forschungsfragen zusammengefasst. Dabei wird auf die betreffenden Abschnitte des folgenden Kapitels verwiesen, in welchen die experimentelle Validierung der vorgeschlagenen Messsystemerweiterung zur Reduktion der zufälligen Messabweichung sowie die Untersuchung systematischer Effekte aufgrund von Verformungsgradienten erfolgt.

### 2.2.1 Bildkorrelation

Bildkorrelationsalgorithmen werden neben der DSP auch von optischen Messmethoden wie Digital Image Correlation (DIC) oder Particle Image Velocimetry (PIV) [Adr2005] eingesetzt, um räumlich aufgelöste Verformungsfelder technischer Oberflächen bzw. Geschwindigkeitsfelder von Fluiden zu bestimmen. Dabei werden aus während einer Verformung nacheinander aufgenommenen Bildern des Messobjekts Bildpaare gebildet. Diese Bildpaare werden dann in Auswertefenster unterteilt und für jedes dieser Auswertefensterpaare werden die lokalen Positionsänderungen bestimmt. Die Grundhypothese des Messansatzes ist, dass die räumliche Verteilung der lokalen Positionsänderungen  $V_B(\xi, \eta)$  des Bildpaares dem Verformungsfeld  $V(x, y)$  der Oberfläche des Messobjekts bzw. der  $(x, y)$ -Ebene eines Fluids entspricht. Im allgemeinen Fall setzt sich das Verformungsfeld  $V(x, y)$  der  $(x, y)$ -Ebene aus einem Wert für die lokale Verformung  $V_x$  in  $x$ -Richtung und einem Wert für die lokale Verformung  $V_y$  in  $y$ -Richtung zusammen.

Abbildung 2.6 zeigt einen Ausschnitt eines Specklemusters mit den Graustufenwerten  $G_1(\xi_1, \eta_1)$  vor und  $G_2(\xi_2, \eta_2) = G_2(V_B(\xi_1, \eta_1))$  nach der Verformung  $V_B$ . Das rot eingezeichnete exemplarische Auswertefenster  $G_1(\xi_1, \eta_1)$  erfährt die Verformung  $V_B(\xi_1, \eta_1)$ . Das inverse Problem dieser Mes-

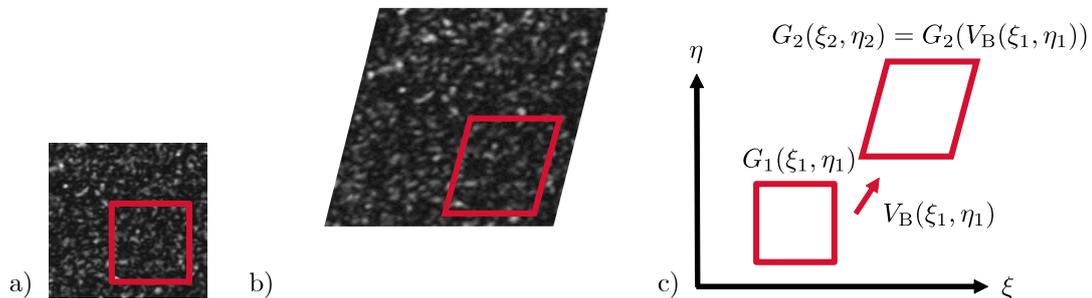


Abbildung 2.6: (a) Ausschnitt eines Specklemusters vor der Deformation mit rotem, quadratischem Auswertefenster  $G_1$ . (b) Gleicher Bildausschnitt im deformierten Specklemuster mit Auswertefenster  $G_2$ . (c) Mathematische Repräsentation der Auswertefenster als Graustufenmatrizen  $G_1(\xi_1, \eta_1)$  und  $G_2(V_B(\xi_1, \eta_1))$  mit der gesuchten Verformung  $V_B(\xi, \eta)$ .

sung besteht darin, das  $V_B(\xi_1, \eta_1)$  zu finden, welches die Bedingung  $G_1(\xi_1, \eta_1) = G_2(V_B(\xi_1, \eta_1))$  am besten erfüllt. Diese Gleichung kann nur im idealen, theoretischen Fall erfüllt werden, wenn sich die Graustufenwerte durch die Verformung nicht ändern. Bei realen Messungen mit zufälligem Rauschen und weiteren Quereinflüssen führt die Lösung des inversen Problems zu einer Optimierungsaufgabe, welche als das Integral der quadratischen Differenzen der Graustufenwerte in der Form

$$\int \int |G_1(\xi, \eta) - G_2(\xi + V_B(\xi), \eta + V_B(\eta))|^2 d\xi d\eta \rightarrow \text{minimieren über } V_B \quad (2.7)$$

formuliert werden kann [Yan2019]. Ein weiterer gängiger Ansatz ist die Berechnung der Kreuzkorrelation von  $G_1(\xi, \eta)$  und  $G_2(V_B(\xi, \eta))$ , um  $V_B(\xi, \eta)$  zu finden [Bla2015, Ale2020].

Um ein Verformungsfeld nach Gleichung (2.7) zu bestimmen, wird das Auswertefenster  $G_1(\xi, \eta)$  pixelweise in  $\xi$ - und  $\eta$ -Richtung verschoben. Damit nicht nur ideale Starrkörperverschiebungen fehlerfrei bestimmt werden können, wird das Auswertefenster darüber hinaus durch bestimmte Formfunktionen verformt, bis es am besten mit  $G_2(V_B(\xi, \eta))$  übereinstimmt, d. h., bis Gleichung (2.7) minimiert ist. Typische Formfunktionen sind eine Rotation, eine Scherung sowie ein Verformungsgradient erster oder zweiter Ordnung [Lu2000]. Mittels dieser Formfunktionen wird die gesuchte Verformung  $V_B(\xi, \eta)$  mathematisch angenähert. Um nicht nur lokale Verformungen von ganzzahligen Pixeln, sondern auch Subpixel-Verformungen bestimmen zu können, müssen die Graustufenmatrizen  $G_1(\xi, \eta)$  und  $G_2(V_B(\xi, \eta))$  interpoliert werden. Gängig ist eine Spline-Interpolation höherer Ordnung [Sch2000, Kna2003]. Die wichtigsten Eigenschaften des Bildkorrelationsalgorithmus bezüglich Messunsicherheit und räumlicher Auflösung sind somit die Größe des Auswertefensters, das Korrelationskriterium, die Formfunktion und die Subpixel-Interpolationsmethode [Pan2009].

Darüber hinaus sind die Oberflächenmarkierungen, bzw. das Specklemuster auf der Probenoberfläche, entscheidend für die Güte der Bildkorrelation [Don2017]. Eine fehlerfreie Bildkorrelation setzt ein zufälliges Muster ohne periodische Elemente und mit möglichst hohem Kontrast auf der Oberfläche voraus [Reu2015]. Des Weiteren sollte das Specklemuster in alle Richtungen isotrop verteilt sein und die Specklegröße sollte 3–5 Pixel betragen, um Alias-Effekte zu vermeiden [Reu2014a, Reu2014b]. Bei der DSP werden die Probenoberfläche kohärent beleuchtet und ein Laserspecklemuster für die Bildkorrelation verwendet. Wie im vorigen Abschnitt 2.1.3 diskutiert, sind somit bei ausreichend großer Oberflächenrauheit ( $S_q \gtrsim 0,2 \mu\text{m}$ ) ein zufälliges Specklemuster mit maximalem Kontrast und eine durch eine Apertur im optischen Pfad justierbare Specklegröße gegeben, siehe Abbildung 2.3 (d).

## 2.2.2 Messunsicherheitsbudget der DSP

Als laseroptisches Messverfahren ist die Messunsicherheit der Verformungsmessung mittels DSP aufgrund der quantenmechanischen Eigenschaften des Lichts grundlegend durch Photonschrottrauschen begrenzt. Die untere Grenze der Messunsicherheit wurde für DSP mit voll ausgebildeten Speckle und großen Auswertefenstern von  $200 \times 200$  Pixeln abgeleitet und zeigt das theoretische Potenzial der DSP [Fis2017]. Die theoretisch erreichbare Messunsicherheit stimmt mit den Simulationsergebnissen aus [Zho2001] überein, wo auch kleinere Auswertefenster von  $40 \times 40$  Pixeln untersucht wurden. Demnach kann DSP Subpixel-Verformungen bis zu 0,005 Pixel auflösen, was bei maximaler Bildvergrößerung weniger als einem Nanometer entspricht. Daher ist mit DSP theoretisch eine Verformungsmessunsicherheit im einstelligen Nanometerbereich möglich.

Das Photonschrottrauschen stellt eine physikalische Untergrenze für die Messunsicherheit dar. Bedingt durch die experimentelle Umsetzung treten bei realen Messungen weitere Unsicherheitsbeiträge auf. Kamerarauschen ist eine Komponente des Messunsicherheitsbudgets, die durch Ausleserauschen und Dunkelstromrauschen im Kamerasensor entsteht [Tau2018b]. Dagegen wird

Specklerauschen durch die fundamentalen statistischen Eigenschaften des Specklemusters hervorgerufen. Da der Kontrast des Specklemusters lokal variiert, lässt sich nicht jedes Auswertefenster eines Specklemuster-Paars gleich gut durch Bildkorrelation auswerten. Darüber hinaus wird Specklerauschen durch die Bildquantisierung aufgrund der endlichen Pixelgröße der Kamera verursacht. Eine Subpixel-Verformung der Oberfläche verändert das detektierte Specklemuster zusätzlich zur erwarteten Verformung, wodurch das Korrelationsergebnis abweicht. Daher ist das Specklerauschen maximal bei lokalen Verformungen von einem halben Pixel und nimmt mit zunehmender Specklegröße und einer steigenden Anzahl von Speckle im Auswertefenster ab.

Das Verformungsfeld, d. h. die Messgröße, kann darüber hinaus einen weiteren Beitrag zum Messunsicherheitsbudget leisten. Für DIC mit Weißlichtspeckle wurde gezeigt, dass durch Gradienten im Verformungsfeld zufällige und systematische Messabweichungen entstehen [Xu2017]. Wie im vorigen Abschnitt 2.2.1 diskutiert, bestimmt die Formfunktion des Bildkorrelationsalgorithmus, wie gut die gesuchte Verformung mathematisch angenähert wird. Wenn im Verformungsfeld Gradienten höherer Ordnung auftreten und diese durch Formfunktionen niedriger Ordnungen angenähert werden, führt dies zu systematischen Abweichungen im Messergebnis. Außerdem bewirken Verformungsgradienten bei DSP eine Dekorrelation der Laserspecklemuster. Wie in Abbildung 2.5 gezeigt, folgt das Laserspecklemuster einer Starrkörperverschiebung der Oberfläche. Ist die Verschiebung ausreichend klein, tritt dabei keine Dekorrelation zwischen den Specklemustern vor und nach der Verschiebung auf. Eine Verformung ändert allerdings nicht nur die Gesamtposition der Oberfläche, sondern auch die relativen Positionen einzelner Oberflächenelemente zueinander, d. h., die Feinstruktur der Oberfläche verändert sich. Somit verändert sich durch eine Oberflächenverformung auch das von der Feinstruktur abhängige Specklemuster. Die lokalen Veränderungen des Specklemusters entsprechen nicht gezwungenermaßen den lokalen Verformungen der Oberfläche, da ein Speckle nicht nur durch ein, sondern durch viele Oberflächenelemente hervorgerufen wird, siehe Abbildung 2.1. Diese zufällige Veränderung des Specklemusters führt in der DSP zu Dekorrelation und dadurch zu zufälligen Messabweichungen.

Da die in Abschnitt 1.2.1 definierten Messanforderungen eine hohe räumliche Auflösung fordern, müssen bei der Bildkorrelation kleine Auswertefenster verwendet werden. Wegen der geringen Anzahl von Speckle pro Auswertefenster limitiert somit das Specklerauschen die Messunsicherheit der DSP. Um die geforderte Messunsicherheit zu erreichen, muss das Specklerauschen bei gleichzeitig hoher räumlicher Auflösung reduziert werden. Zudem ist zu klären, welche zufälligen und systematischen Messabweichungen in der DSP durch Verformungsgradienten entstehen.

### 2.2.3 Unschärferelation der Orts-, Zeit- und Messauflösung

Um eine hochauflösende Verformungsmessung zu realisieren, müssen Orts-, Zeit- und Messauflösung, bzw. Messunsicherheit, optimiert werden. Die *Messunsicherheit*  $u(V)$  des Verformungsfelds  $V$  der DSP ist durch das Photonenschrottauschen limitiert [Fis2017]. Im allgemeinen Fall besteht das Verformungsfeld aus den zwei räumlich aufgelösten Komponenten  $V_\xi(\xi, \eta)$  und  $V_\eta(\xi, \eta)$ . Bei der Untersuchung der Messbarkeitsgrenzen der DSP in Abschnitt 3.1 werden aber nur eindimensionale Starrkörperverschiebungen betrachtet, wodurch sich der wahre Wert des konstanten Verformungsfelds bei ideal senkrechter Beobachtung und ohne Abbildungsfehler auf einen Skalar reduziert. Bedingt durch die im vorigen Abschnitt 2.2.2 besprochenen Unsicherheitsbeiträge ergeben sich bei realen Messungen auch bei einer ebenen Starrkörperverschiebungen lokale Abweichungen von dem wahren Wert der Verformung, d. h., die Standardabweichung von  $V_\xi(\xi, \eta)$  ist ungleich null.

Für ein voll entwickeltes Specklemuster und mit einer großen Anzahl an Speckle ( $> 10$ ) im Auswertefenster gilt ohne Berücksichtigung von Pixelquantisierungseffekten die in [Fis2017] her-

geleitete untere Grenze der Messunsicherheit

$$u(V)_{\min} = \frac{s_{\text{sp}}}{\sqrt{2\pi N_{\text{ph}}}}. \quad (2.8)$$

Demnach hängt die Messunsicherheit  $u(V)_{\min}$  von der Gesamtphotonenzahl  $N_{\text{ph}}$  und der Specklegröße  $s_{\text{sp}}$  ab.

Die laterale *Ortsauflösung*  $\Delta x$  der DSP wird durch die Größe der Auswertefenster bei der Bildkorrelation bestimmt. Nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem beträgt die maximale räumliche Abtastfrequenz  $f_s = 2/W_{\text{eval}}$  [Tau2018b]. Der Kehrwert dieser maximalen Abtastfrequenz ergibt die räumliche Auflösung

$$\Delta x = \frac{1}{f_s} = \frac{W_{\text{eval}}}{2}. \quad (2.9)$$

Die Verwendung einer höheren Abtastfrequenz ermöglicht zwar eine Erhöhung der Punktdichte im gemessenen Verformungsfeld, der Informationsgehalt wird jedoch nicht erhöht.

Die *Zeitauflösung*  $\Delta t$  ist bei DSP durch die Belichtungszeit der Kamera festgelegt. Dieser Parameter bestimmt die Anzahl der Photonen

$$N_{\text{ph}} = \frac{P_{\text{L}}}{E_{\text{ph}} \cdot \pi d_{\text{L}}^2 / 4} \cdot W_{\text{eval}}^2 \cdot \Delta t, \quad (2.10)$$

die pro Auswertefenster auf den Kamerasensor gelangen. Dabei sind  $P_{\text{L}}$  und  $d_{\text{L}}$  die Leistung bzw. der Strahldurchmesser des Lasers sowie  $E_{\text{ph}} = hc/\lambda$  die Energie eines Photons, welche durch das plancksche Wirkungsquantum  $h$ , die Lichtgeschwindigkeit  $c$  und die Wellenlänge  $\lambda$  des Lasers bestimmt wird.

Durch Kombination der Gleichungen (2.8) und (2.9) kann das Produkt aus Messunsicherheit und räumlicher Auflösung nun wie folgt ausgedrückt werden:

$$u(V) \cdot \Delta x \geq \frac{s_{\text{sp}} \cdot W_{\text{eval}}}{\sqrt{8\pi N_{\text{ph}}}}. \quad (2.11)$$

Einsetzen der Photonenzahl aus Gleichung (2.10) sowie der Specklegröße aus Gleichung (2.6) ergibt

$$u(V) \cdot \Delta x \cdot \sqrt{\Delta t} \geq \frac{\frac{\lambda z_{\text{A}}}{d_{\text{A}} \sqrt{\pi}} \cdot W_{\text{eval}}}{\sqrt{8\pi \frac{P_{\text{L}}}{E_{\text{ph}} \cdot \pi d_{\text{L}}^2 / 4} \cdot W_{\text{eval}}^2}} = \sqrt{\frac{hc}{8\pi}} \cdot \frac{z_{\text{A}}}{d_{\text{A}}} \cdot \frac{\lambda \cdot d_{\text{L}}}{\sqrt{\lambda \cdot P_{\text{L}}}}. \quad (2.12)$$

Somit ist die untere Schranke des Produkts aus Messunsicherheit, räumlicher Auflösung und der Wurzel der zeitlichen Auflösung konstant. Das Produkt hängt ab von Naturkonstanten (plancksches Wirkungsquantum  $h$ , Lichtgeschwindigkeit  $c$  und Kreiszahl  $\pi$ ), Parametern des optischen Systems (Abstand Sensor zu Apertur  $z_{\text{A}}$  und Durchmesser der Apertur  $d_{\text{A}}$ ) und Lasereigenschaften (Wellenlänge  $\lambda$ , Leistung  $P_{\text{L}}$  und Strahldurchmesser  $d_{\text{L}}$ ). Da die rechte Seite der Ungleichung konstant ist, kann eine der drei Größen auf der linken Seite nicht beliebig reduziert werden, ohne die anderen zu beeinflussen. Dieses Verhalten ist analog zur heisenbergschen Unschärferelation, nach welcher das Produkt der Unbestimmtheiten von Ort und Impuls eines Teilchens konstant ist [Hei1927]. Zu beachten ist, dass Gleichung (2.8) nur für eine hinreichend große Anzahl an Speckle im Auswertefenster ( $> 10$ ) gilt, so dass Gleichung (2.12) die untere Schranke der Unschärferelation für ein ausreichend großes  $\Delta x > 3 \cdot \Delta x_{\min}$  darstellt. Außerdem ist zu beachten, dass in der Unschärferelation nur zufällige Effekte betrachtet werden. Damit diese Untergrenze erreicht werden kann, müssen zunächst alle systematischen Messabweichungen identifiziert und korrigiert werden.

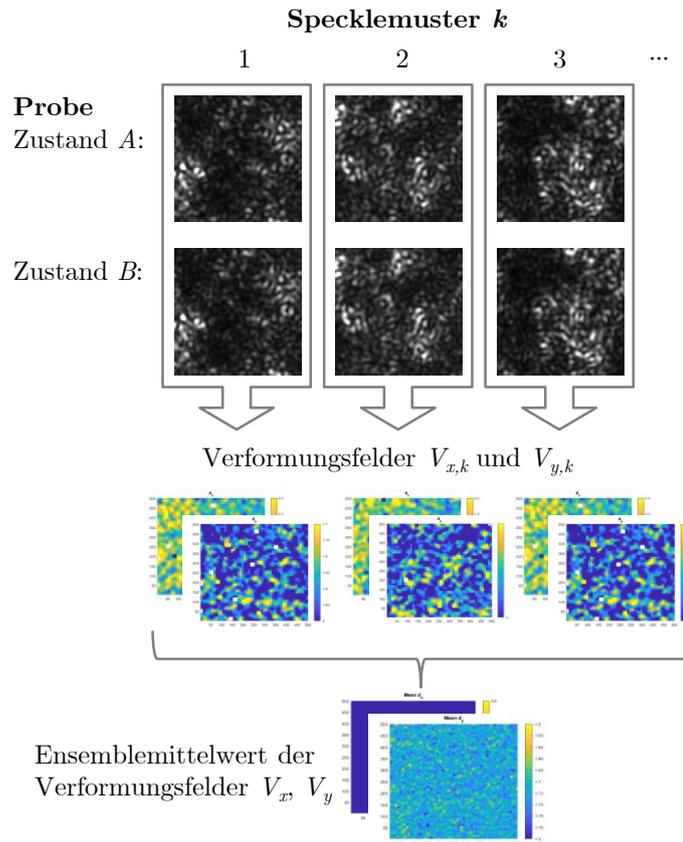


Abbildung 2.7: Schema des Messprinzips von DSP mit Ensemblemittelung.

### 2.2.4 Reduktion zufälliger Messabweichungen mittels adaptiver Optiken

Die in Abschnitt 1.2.1 definierten Messanforderungen für die prozessbegleitende Verformungsmessung geben sowohl eine geringe Messunsicherheit ( $< 100\text{nm}$ ) als auch eine hohe Ortsauflösung ( $\Delta x < 20\mu\text{m}$ ) und Zeitauflösung ( $\Delta t < 10\text{ms}$ ) vor. Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, muss für eine hohe Ortsauflösung die Größe des Auswertefensters in der Bildkorrelation reduziert werden. Ein kleines Auswertefenster führt wiederum zu großen zufälligen Messabweichungen durch Specklerausachen, siehe Abschnitt 2.2.2. Deshalb muss das bei hoher Ortsauflösung dominierende Specklerausachen reduziert werden, um die Messanforderungen zu erfüllen.

Die Ensemblemittelung ist ein Verfahren zur Verringerung zufälliger Messabweichungen, bei dem eine Mehrfachmessung bei Variation der Specklemuster durchgeführt wird. Abbildung 2.7 zeigt das Prinzip von DSP mit Ensemblemittelung. Dabei wird nicht nur ein Bildpaar, sondern ein Ensemble von  $k$  Bildpaaren mit unterschiedlichen Specklemustern ausgewertet. Dafür müssen auf der Probenoberfläche in Zustand A zuerst  $n$  unterschiedliche Specklemuster generiert und gemessen werden. Hat die Probe den Zustand B erreicht, müssen die gleichen  $n$  Beleuchtungszustände reproduziert werden, um Specklemuster zu messen, die sich mit denen von Probenzustand A korrelieren lassen. Der Ensemblemittelwert des Verformungsfelds

$$V(\xi, \eta) = \frac{\sum_{k=1}^n V_k(\xi, \eta) w_k}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (2.13)$$

ist das gewichtete arithmetische Mittel der  $n$  einzelnen Verformungsfelder  $V_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ , mit den Gewichten  $w_k$ . Das gewichtete arithmetische Mittel ist eine Lösung der Methode der kleinsten Quadrate. Verwendet man die inverse Kovarianzmatrix als Gewichtungsmatrix, so besagt der Satz von Gauß-Markov, dass der Kleinste-Quadrate-Schätzer der beste lineare erwartungstreue Schätzer ist, d. h., die Varianz des Schätzers ist minimal [Lew1966]. Die erforderliche Kovarianzmatrix besteht aus den Varianzen der einzelnen Verformungsmessungen auf der Hauptdiagonalen und den jeweiligen Kovarianztermen in den restlichen Matrixeinträgen. Wenn die einzelnen Verformungsmessungen unkorreliert sind, entfallen die Kovarianzterme. Der Kleinste-Quadrate-Schätzer in Gleichung (2.13) basiert auf dieser Annahme, d. h., die Kovarianzterme werden hier nicht berücksichtigt. Die Optimalität der Schätzung ist somit erreicht, wenn die Gewichtungen  $w_k$  direkt proportional zum Kehrwert der entsprechenden Varianzen  $u(V_k)^2$  sind, d. h., wenn  $w_k \sim u(V_k)^{-2}$  gilt.

Der Ensemblemittelwert wird angewendet, um die Messunsicherheit  $u(V)$  des Verformungsfeldes  $V$  zu reduzieren. Die Varianz des Ensemblemittelwerts lautet in erster Näherung

$$\text{var}(V) = u(V)^2 = \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial V}{\partial V_k} u(V_k) \right)^2 \quad (2.14)$$

für unkorrelierte Einzelmessungen  $V_k$ . Die optimalen Gewichtungsfaktoren sind  $w_k \sim u(V_k)^{-2}$ , so dass Gleichung (2.13) zusammen mit Gleichung (2.14) die minimal erreichbare Messunsicherheit

$$u(V) \geq \left( \sum_{k=1}^n \frac{1}{u(V_k)^2} \right)^{-1/2} \quad (2.15)$$

für unkorrelierte Specklemuster ergibt. Treten fehlerhafte Specklemuster mit teilweise nicht auswertbaren Bildbereichen auf, so haben diese keinen signifikanten Einfluss auf die Messunsicherheit des Ensemblemittelwerts. Durch die Gewichtung wird die Messunsicherheit  $u(V)$  nicht durch einige wenige Ausreißer, sondern durch die Mehrheit der Messungen mit der geringsten Varianz bestimmt. Die Messunsicherheit des Ensemblemittelwerts über wiederholte, unkorrelierte Verformungsmessungen ist somit näherungsweise proportional zu  $1/\sqrt{n}$ .

Tabelle 2.1 zeigt verschiedene Mittelungsmethoden, welche eingesetzt werden, um bei DSP zufällige Messabweichungen zu reduzieren. Gemäß der in Abschnitt 2.2.3 eingeführten Unschärferelation bedingt eine Reduktion der Messunsicherheit gleichzeitig auch eine Verschlechterung der Orts- oder Zeitauflösung. Allerdings lässt sich nicht mit allen drei Methoden eine Reduktion des Specklerausches erreichen. Eine räumliche Mittelung über mehrere Auswertefenster verschlechtert die Ortsauflösung und reduziert dafür das Specklerauschen sowie andere zufällige Unsicherheitsbeiträge wie Kamerarauschen und Schrotrauschen. Dagegen lassen sich mit einer zeitlichen Mittelung über eine längere Belichtungszeit oder mehrere sequenzielle Bilder zwar die zeitlich veränderlichen Unsicherheitsbeiträge Kamerarauschen und Schrotrauschen reduzieren, nicht aber das Specklerauschen. Da Specklerauschen von der Statistik des zeitlich konstanten

Tabelle 2.1: Auswirkungen von räumlicher-, zeitlicher- und Ensemblemittelung auf Specklerauschen, Ortsauflösung und Zeitauflösung der DSP.

Mittelung über	Specklerauschen	Ortsauflösung	Zeitauflösung
Raum	⬇️	⬇️	⬆️
Zeit	⬆️	⬆️	⬇️
Ensemble	⬇️	⬆️	⬇️

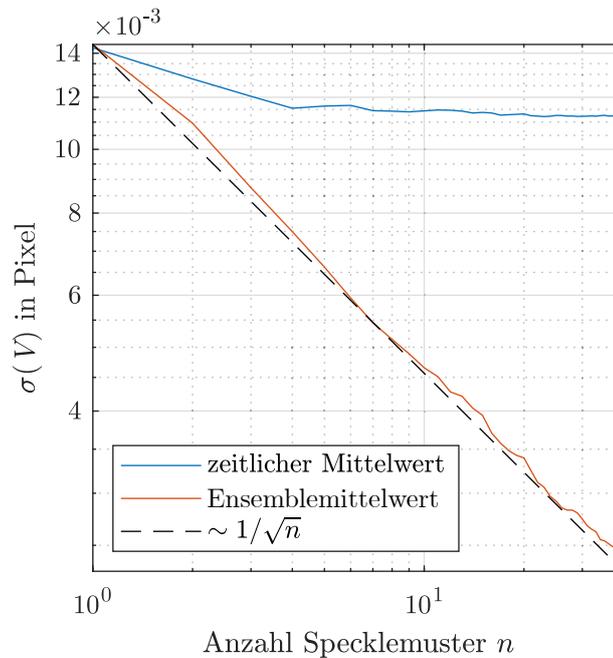


Abbildung 2.8: Standardabweichung  $\sigma(V)$  des Verformungsfeldes bei zeitlicher und Ensemblemittelung über  $n$  Specklemuster. Die Auswertung basiert auf simulierten Specklemustern.

Specklemusters abhängt, kann es durch eine einfache zeitliche Mittelung nicht verringert werden. Einzig die Mittelung über ein Ensemble mehrerer unkorrelierter Specklemuster erlaubt somit eine Reduktion des Specklerausens bei gleichbleibender Ortsauflösung.

Abbildung 2.8 zeigt anhand einer Simulation die Auswirkungen des zeitlichen und Ensemblemittelwerts auf die Messunsicherheit der DSP. Dafür werden Specklemuster nach dem in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Ansatz simuliert. Auf die Specklemuster wird anschließend normalverteiltes Kamerarauschen addiert und intensitätsabhängig poissonverteiltes Photonenschrotrauschen angewendet. Der wahre Wert der über dem Specklemuster konstanten Verschiebung beträgt 0,5 Pixel. Für den zeitlichen Mittelwert werden aus einer Höhenverteilung  $H(x, y)$  40 rauschbehaftete Specklemuster  $I_k(\xi, \eta)$  simuliert. Dagegen werden für den Ensemblemittelwert 40 Höhenverteilungen  $H_k(x, y)$  (mit gleichen Oberflächenparametern) und aus jeder Höhenverteilung jeweils ein Specklemuster simuliert. Aus den 40 Bildpaaren werden mit DSP Verformungsfelder  $V_k(\xi, \eta)$  berechnet. Anschließend werden die 40 Verformungsfelder gemittelt und die Standardabweichung  $\sigma$  der gemittelten Matrix  $V(\xi, \eta)$  bestimmt. Die Simulation bestätigt, dass der zeitliche Mittelwert über das gleiche Specklemuster zwar das Kamera- und Schrotrauschen reduziert, nicht aber das Specklerausens. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Mittelung über ein Ensemble unkorrelierter Specklemuster eine deutlich größere Verbesserung der Messunsicherheit proportional zum Kehrwert der Quadratwurzel der Anzahl der Specklemuster  $n$ . Die Simulationsergebnisse zeigen das Potenzial der Ensemblemittelung für specklebasierte Verformungsmessungen mit minimaler Messunsicherheit bei gleichzeitig hoher räumlicher Auflösung.

Um bei hoher Ortsauflösung zufällige Messabweichungen zu reduzieren, müssen möglichst viele unkorrelierte Specklemuster reproduzierbar auf der Probenoberfläche generiert werden. Damit die zeitliche Auflösung der Gesamtmessung nicht zu weit eingeschränkt wird, sollte die Variation der Specklemuster möglichst schnell geschehen. DSP ist prädestiniert für die Methode der Ensemblemittelwertbildung, da Laserspecklemuster im Gegensatz zu Weißlichtspeckle oder natürlichen Oberflächenstrukturen durch eine Modulation der Laserbeleuchtung unmittelbar angepasst wer-

den können. Um die in Abschnitt 1.2.1 definierten Messanforderungen zu erreichen, wird somit eine adaptive Optik benötigt, die schnell und reproduzierbar viele unkorrelierte Specklemuster auf der Probenoberfläche generieren kann.

### 2.2.5 Fazit

Bei der Starrkörperverschiebung einer Oberfläche bleibt das beobachtete Specklemuster nahezu unverändert. Somit lässt sich die Verschiebung der Oberfläche durch Bildkorrelation von aufeinanderfolgenden Specklemustern berechnen. Das Messunsicherheitsbudget dieser Methode umfasst neben Photonenschrottrauschen und Kamerarauschen, welche durch zeitliche und räumliche Mittelung reduziert werden können, auch das durch die inhärente Statistik des Specklemusters entstehende Specklerauschen, welches zeitlich invariant ist und somit nur durch eine räumliche Mittelung über eine große Anzahl von Speckle reduziert werden kann. Da die Mittelung über eine größere Anzahl von Speckle aber die räumliche Auflösung reduziert, gilt für die Untergrenze der zufälligen Messabweichung der DSP eine Unschärferelation der Orts-, Zeit- und Messauflösung. Mit dem Ziel einer hoher räumlichen Auflösung bei gleichzeitig geringer Messunsicherheit ist die DSP daher um eine adaptive Optik zu erweitern, welche eine Vielzahl unkorrelierter Specklemuster auf einer Probenoberfläche generieren kann. Dies würde eine Mittelung über das Ensemble dieser Specklemuster und dadurch eine Reduktion des Specklerauschens bei *gleichbleibender* Ortsauflösung erlauben. Eine experimentelle Validierung dieser Messsystemerweiterung erfolgt in Abschnitt 3.1. Dabei wird untersucht, wie viele unkorrelierte Specklemuster sich experimentell generieren lassen und welche Untergrenze für die Messunsicherheit des Ensemblemittelwerts sich daraus ergibt. Außerdem soll dort abgeschätzt werden, inwieweit die Zeitauflösung durch die Generierung und Messung der zusätzlichen Specklemuster reduziert wird.

Wenn die Messsystemerweiterung mittels adaptiver Optik die zufällige Messabweichung der DSP reduziert, steigt die Bedeutung der systematischen Messabweichung. Verformungsgradienten sind eine für die DSP bislang nicht umfassend untersuchte Ursache von Messabweichungen. Das Specklemuster folgt zwar der Starrkörperverschiebung, wird aber nicht gleich der streuenden Oberfläche verformt. Deshalb ist es eine bislang offene Forschungsfrage, welche zufälligen und systematischen Messabweichungen bei der DSP durch Verformungsgradienten entstehen und wie die Messabweichungen von Gradienten erster, zweiter oder höherer Ordnung abhängen. In Abschnitt 3.2 erfolgt mittels einer Simulation eine Untersuchung dieser Fragestellungen.

## 2.3 Specklebasierte Charakterisierung anisotroper Oberflächen

Wie in der Einleitung dargestellt, ist die Oberflächenbeschaffenheit entscheidend für die Funktionalität und Lebensdauer eines Bauteils. Für die flächenhafte Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit sind in der internationalen Norm ISO 25178-2 [Int2012] unter anderem der Höhenparameter  $S_q$  und räumliche Parameter  $S_{al}$  vorgegeben. Zur Bestimmung dieser Parameter von isotropen Oberflächen existieren bereits specklebasierte Theorien und Messansätze, siehe Abschnitt 1.2.2. In unidirektionalen Oberflächenendbearbeitungsprozessen wie dem Schleifen, Honen oder Polieren entstehen allerdings anisotrope Oberflächen, welche durch stochastisch verteilte unidirektionale Bearbeitungsriefen gekennzeichnet sind. Die Bearbeitungsriefen weisen überwiegend in Bearbeitungsrichtung eine große Ausdehnung im Millimeterbereich auf, während die Breite senkrecht zur Bearbeitungsrichtung im einstelligen Mikrometerbereich liegt. Wie in der Einleitung geschildert, ist für die Charakterisierung anisotroper Oberflächen dieses Typs noch keine specklebasierte Theorie etabliert.

Der grundlegende Ansatz zu Lösung des inversen Problems der specklebasierten Charakterisierung anisotroper Oberflächen wird im folgenden Abschnitt 2.3.1 geschildert. Dieser Ansatz verwendet eine adaptive Optik, um im Messaufbau viele verschiedene Oberflächentopographien mit bekannten Parametern zu emulieren. Die dafür notwendige Modellierung der Topographien dieser anisotropen Oberflächenklasse wird in Abschnitt 2.3.2 eingeführt. Darauf aufbauend werden in den Abschnitten 2.3.3 und 2.3.4 anhand simulierter Specklemuster die Auswerteverfahren zur Bestimmung der räumlichen sowie der Höhenparameter aus dem Specklemuster demonstriert. Abschnitt 2.3.5 fasst die der specklebasierten Charakterisierung anisotroper Oberflächen zugrundeliegenden Hypothesen zusammen und verweist dabei auf die Abschnitte in Kapitel 4, in welchen die betreffenden experimentellen Untersuchungen der offenen Forschungsfragen erfolgen.

### 2.3.1 Lösung des inversen Problems mittels adaptiver Optiken

Aus den genormten Oberflächentexturparametern  $S_q$  und  $S_{al}$  werden vier Messgrößen für die parametrische Charakterisierung des zuvor beschriebenen anisotropen Oberflächentyps abgeleitet: Erstens die Bearbeitungsrichtung, d. h. der Winkel  $\beta$  zwischen dem Oberflächenkoordinatensystem  $(x, y)$  und dem Koordinatensystem des Kamerasensors  $(\xi, \eta)$ , siehe Abbildung 2.2. Die  $x$ -Richtung des Oberflächenkoordinatensystem ist dabei als parallel zu den Bearbeitungsriefen definiert. Zweitens die Autokorrelationslänge  $S_{al,y}$  in  $y$ -Richtung, welche die räumliche Verteilung der Bearbeitungsriefen charakterisiert.  $S_{al,y}$  ist der räumliche Verschiebungswert  $l_y$  in  $y$ -Richtung, für den die Autokorrelationsfunktion

$$K_{\text{surf}}(l_x = 0, l_y) = \frac{1}{N_x(N_y - l_y)} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y - l_y} H(x, y)H(x, y + l_y) \quad (2.16)$$

der Oberflächentopographie auf das  $1/e$ -Fache des Werts im Ursprung fällt, d. h.  $K_{\text{surf}}(0, S_{al,y}) = 1/e \cdot K_{\text{surf}}(0, 0)$  [Tac2007].  $N_x$  und  $N_y$  bezeichnen die Anzahl der Oberflächenhöhenwerte  $H(x, y)$  in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung. Zuletzt ist die quadratische mittlere Höhe

$$S_{q,x} = \frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{N_y} \sqrt{\frac{1}{N_x} \sum_{x=1}^{N_x} \left[ H(x, y) - \frac{1}{N_x} \sum_{x=1}^{N_x} H(x, y) \right]^2} \quad (2.17)$$

in  $x$ -Richtung ein Maß für die Höhenverteilung entlang der Bearbeitungsriefen. Analog dazu kann der Parameter  $S_{q,y}$  senkrecht zu den Bearbeitungsriefen berechnet werden. Wichtig ist dabei die Unterscheidung zu dem in ISO 4287 [Int2010b] definierten Oberflächenparameter  $R_q$ , der durchschnittlichen quadratischen Abweichung bzw. quadratischen Rauheit.  $R_q$  wird beispielsweise mit

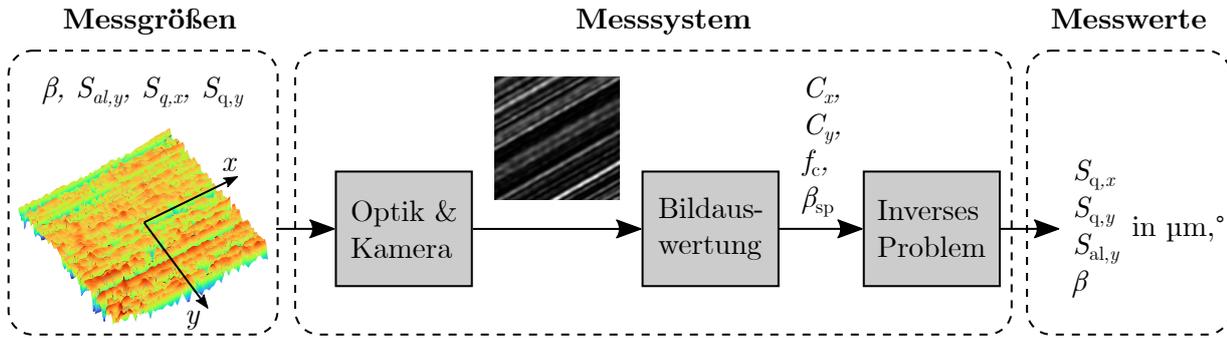


Abbildung 2.9: Grundschematische Darstellung der specklebasierten Charakterisierung anisotroper Oberflächen.

einem Tastschnittverfahren entlang eines oder mehrerer Oberflächenprofile gemessen.  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  sind auch Kennwerte für die Höhenverteilung in eine Richtung, beinhalten aber statistische Informationen der gesamten, flächig gemessenen Oberflächentopographie. Analog zu der Bestimmung von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  aus der Oberflächentopographie wird auch das Specklemuster flächig in  $x$ - und  $y$ -Richtung ausgewertet. Mit integrativer Streulichtmesstechnik können ausschließlich Aussagen über den gesamten beleuchteten Bereich getroffen werden, d. h. über die Statistik der Oberflächentopographie, nicht über einzelne Oberflächenprofile.

Abbildung 2.9 zeigt eine schematische Darstellung der specklebasierten Charakterisierung anisotroper Oberflächen. Mit einem specklebasierten Messsystem sollen die Messgrößen  $S_{q,x}$ ,  $S_{q,y}$ ,  $S_{al,y}$  und  $\beta$  bestimmt werden. Der Specklesensor, Messaufbau siehe Abbildung 2.2, liefert ein Specklemuster, aus dem die statistischen Parameter  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $f_c$  und  $\beta_{sp}$  abgeleitet werden können. Eine genauere Erklärung dieser Speckleparameter und ihrer Beziehungen zu den Messgrößen erfolgt in den folgenden Abschnitten 2.3.3 und 2.3.4. Um aus dem Specklemuster die Messgrößen zu bestimmen, muss das inverse Problem

$$S_{q,x}, S_{q,y}, S_{al,y}, \beta = P^{-1}(C_x, C_y, f_c, \beta_{sp}) \quad (2.18)$$

gelöst werden. Die Lösung des inversen Problems ergibt Messgrößen, welche auf Basis einer Kalibrierung mit SI-Einheiten verglichen werden. Außerdem ist für die Angabe des vollständigen Messergebnisses nach dem *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) die Bestimmung der Messunsicherheit der einzelnen Messwerte erforderlich [JCG2008].

Um das inverse Problem empirisch zu lösen, müssen umfassende Messungen an einer großen Anzahl von Referenzproben durchgeführt werden. Da Querempfindlichkeiten zwischen den Speckleparametern nicht auszuschließen sind, müssen die Messgrößen unabhängig voneinander variiert werden. Auch die experimentelle Bestimmung des Messbereichs jeder Messgröße erfordert viele unterschiedliche Proben. Schließlich ist für eine Analyse der Messunsicherheit in Abhängigkeit des Messbereichs an mehreren Arbeitspunkten ein hoher Stichprobenumfang von Proben mit gleichen Oberflächenparametern, aber unterschiedlichen Oberflächentopographien erforderlich. Allerdings ist aufgrund der inhärenten Stochastik von spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide eine gezielte Variation einzelner Oberflächenparameter nicht möglich, sondern lässt sich nur näherungsweise durch eine nachträgliche Referenzmessung und Probenauswahl erreichen. Somit stellt die empirische Lösung des inversen Problems auf Basis von physischen Referenzproben hohe fertigungstechnische Anforderungen.

Aus diesem Grund wird als Messobjekt für die empirische Lösung des inversen Problems der specklebasierten Charakterisierung anisotroper Oberflächen ein räumlicher Phasenmodulator (engl. „Spatial Light Modulator“ – SLM) vorgeschlagen, der im Messaufbau beliebige Oberflächentopographien emuliert. Die Emulation einer Oberfläche bezeichnet in dieser Arbeit die Nachahmung der Streulichteigenschaften einer Oberfläche, nicht die physische Nachbildung der

Höhenverteilung. Dieser Emulationsansatz soll es erlauben, durch eine adaptive Optik innerhalb kürzester Zeit an beliebigen Arbeitspunkten Experimente mit einer hohen Stichprobenanzahl durchzuführen. Ziel dieses Ansatzes ist eine umfassende Untersuchung des Auftretens systematischer Messabweichungen, der Messbarkeitsgrenzen und der Messunsicherheit der verschiedenen Messgrößen.

### 2.3.2 Simulation anisotroper Oberflächentopographien

Der im vorigen Abschnitt 2.3.1 vorgeschlagene experimentelle Ansatz zur Lösung des inversen Problems basiert auf der Emulation einer Vielzahl verschiedener Oberflächentopographien mit definierten Oberflächenparametern. Als Ausgangstopographien für die Emulation können WLI-Messungen von Referenzproben verwendet werden, die angestrebte Probenvielfalt lässt sich allerdings nur durch eine modellbasierte Simulation von Oberflächentopographien erreichen. Das dafür verwendete Oberflächenmodell nach [Pat2010] basiert auf der Methode des gleitenden Mittelwerts [Ogi1989, Fun1985]. Dabei wird die Oberflächentopographie

$$\tilde{H}(x, y) = \text{randn}(x, y) * f_{\text{filter}}(x, y, S_{\text{al},x}, S_{\text{al},y}) \cdot \frac{S_{\text{q}}}{\text{std}} \quad (2.19)$$

aus einer Matrix normalverteilter Zufallszahlen berechnet, die mit einer Filterfunktion gefaltet werden. Zur Anpassung der Rauheit wird das Ergebnis der Faltung durch seine Standardabweichung  $\text{std}$  geteilt und mit der gewünschten mittleren quadratischen Höhe  $S_{\text{q}}$  multipliziert. Eine gaußsche Filterfunktion

$$f_{\text{filter}}(x, y, S_{\text{al},x}, S_{\text{al},y}) = \exp\left(-\frac{2x^2}{S_{\text{al},x}^2} - \frac{2y^2}{S_{\text{al},y}^2}\right) \quad (2.20)$$

ergibt eine gaußsche Oberfläche mit den lateralen Korrelationslängen  $S_{\text{al},x}$  und  $S_{\text{al},y}$ . Abbildung 2.10 zeigt, wie eine gaußsche Oberflächentopographie  $\tilde{H}(x, y)$  aus einer Zufallsmatrix und der Filterfunktion mit den Korrelationslängen  $S_{\text{al},x} = S_{\text{al},y} = 10 \mu\text{m}$  zusammensetzt ist.

In Abbildung 2.11 ist gezeigt, welche Oberflächentopographien sich für unterschiedliche laterale Korrelationslängen ergeben. In Abbildungen 2.11 (b) und (d) sind die Topographien isotrop ( $S_{\text{al},x} = S_{\text{al},y}$ ), während in (f) eine anisotrope Topographie ( $S_{\text{al},x} \neq S_{\text{al},y}$ ) dargestellt ist.

Das Modell aus Gleichung (2.19) kann verwendet werden, um sowohl isotrope ( $S_{\text{al},x} = S_{\text{al},y}$ , Abbildung 2.12 (a)) als auch anisotrope ( $S_{\text{al},x} \neq S_{\text{al},y}$ ) Oberflächen zu erzeugen. Isotrope simulierte Oberflächentopographien bilden reale isotrope Referenzflächen zufriedenstellend nach [Ogi1989, Fun1985]. Anisotrope Oberflächen, die aus unidirektionalen Fertigungsprozessen wie dem Schleifen oder Polieren resultieren, können jedoch nicht zufriedenstellend modelliert werden: Wird eine Korrelationslänge deutlich größer als die andere gesetzt ( $S_{\text{al},x} \gg S_{\text{al},y}$ ), entsteht eine nahezu zweidimensionale Oberflächentopographie, die der Grobstruktur, d. h. der Welligkeit, aber nicht der Feinstruktur, also der Rauheit, einer real gefertigten Oberfläche entspricht. Um eine realitätsnähere Modellierung zu erreichen, wird daher eine isotrope Oberfläche mit einer anisotropen Oberfläche zu überlagert.

Das entsprechend erweiterte mathematische Oberflächenmodell

$$H(x, y) = \left[ \text{randn} * \exp\left(-\frac{2x^2}{M_{\text{i,L}}^2} - \frac{2y^2}{M_{\text{i,L}}^2}\right) \right] \cdot \frac{M_{\text{i,R}}}{\text{std}} + \left[ \text{randn} * \exp\left(-\frac{2y^2}{M_{\text{a,L}}^2}\right) \right] \cdot \frac{M_{\text{a,R}}}{\text{std}} \quad (2.21)$$

wird durch vier Modellparameter definiert: Die isotrope Rauheit  $M_{\text{i,R}}$ , die isotrope laterale Korrelationslänge  $M_{\text{i,L}}$  und die jeweiligen anisotropen Parameter  $M_{\text{a,R}}$ ,  $M_{\text{a,L}}$ . Die Bearbeitungsrichtung ist parallel zur  $x$ -Achse definiert. Abbildung 2.12 zeigt, wie sich eine simulierte Oberflächentopo-

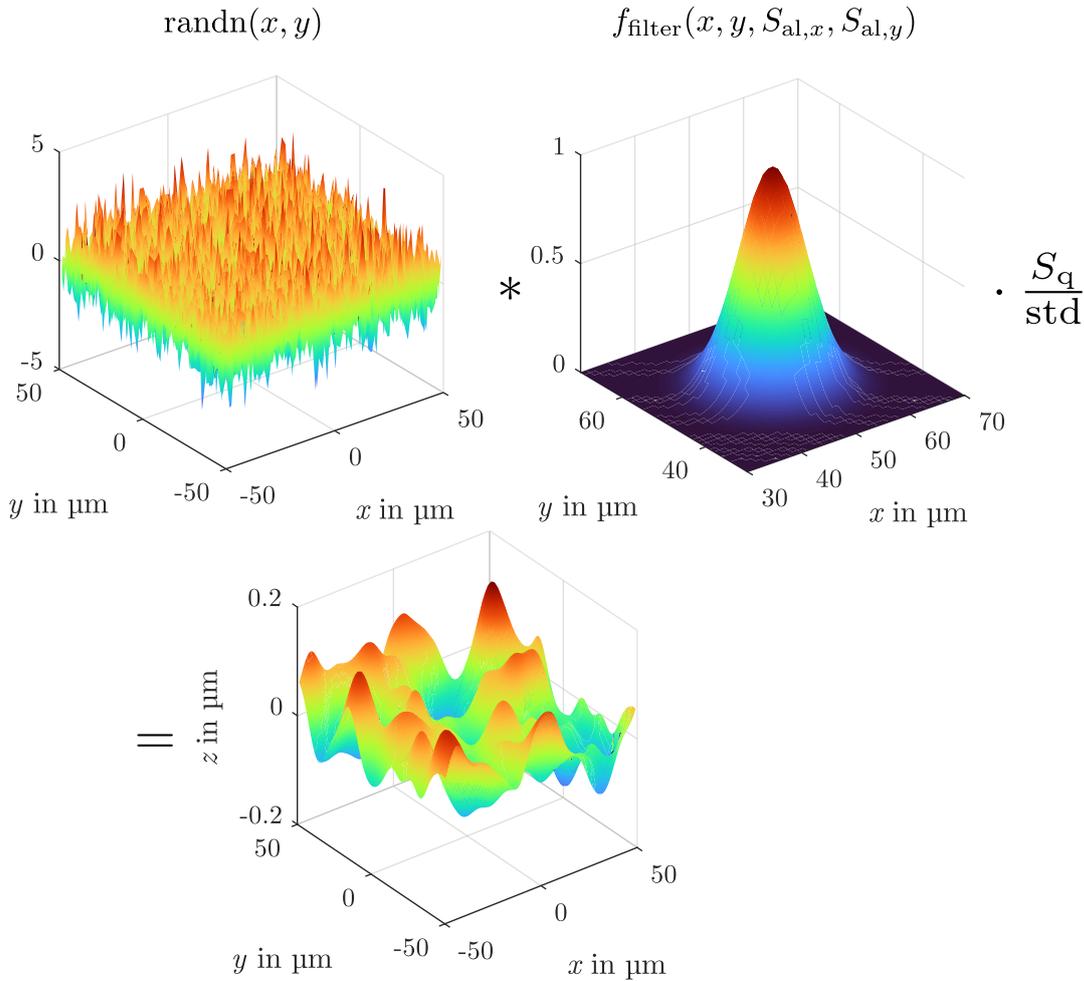


Abbildung 2.10: Visualisierung von Gleichung (2.19) für  $S_q = 0,05 \mu\text{m}$  und  $S_{al,x} = S_{al,y} = 10 \mu\text{m}$ .

graphie (c) aus einer isotropen Komponente (a) und einer anisotropen Komponente (b) zusammensetzt. Außerdem ist zum Vergleich in Abbildung 2.12 (d) die Oberflächentopographie einer mittels WLI gemessenen Referenzprobe gezeigt.

Um reale Oberflächentopographien mit dem Simulationsmodell nachzubilden, muss ein Bezug zwischen den Modellparametern ( $M_{i,R}$ ,  $M_{i,L}$ ,  $M_{a,R}$ ,  $M_{a,L}$ ) und den Oberflächenstrukturparametern ( $S_{q,x}$ ,  $S_{q,y}$ ,  $S_{al,y}$ ) hergestellt werden, welche nach Abbildung 2.9 die Messgrößen der specklebasierten Charakterisierung anisotroper Oberflächen bilden. Die Rauheit  $S_{q,x}$  der simulierten Oberflächentopographie  $H(x, y)$  ergibt sich direkt aus  $M_{i,R}$ , da die anisotrope Oberflächenkomponente nicht in  $x$ -Richtung variiert (siehe Abbildung 2.12 (b)). Die Rauheit senkrecht zur Bearbeitungsrichtung  $S_{q,y}$  wird jedoch sowohl durch  $M_{a,R}$  als auch durch  $M_{i,R}$  beeinflusst. Die Gesamtrauheit  $S_{q,y} = \sqrt{M_{a,R}^2 + M_{i,R}^2}$  ergibt sich gemäß dem gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz aus der pythagoreischen Addition der Einzelrauheiten. Bei unidirektional bearbeiteten Oberflächen wie in Abbildung 2.12 (d) wird  $S_{q,y}$  jedoch hauptsächlich von der anisotropen Rauheit  $M_{a,R}$  beeinflusst, da sie deutlich größer ist als  $M_{i,R}$ . Dasselbe gilt für die laterale Korrelationslänge  $S_{al,y}$  senkrecht zur Bearbeitungsrichtung, die hauptsächlich von der anisotropen Komponente  $M_{a,L}$  und in geringerem Maße von der isotropen Komponente  $M_{i,L}$  bestimmt wird.

Abbildung 2.12 (c) zeigt eine nach Gleichung (2.21) simulierte Oberflächentopographie, die sich aus einer isotropen Komponente (Abbildung 2.12 (a)) und einer anisotropen Komponente (Abbildung 2.12 (b)) zusammensetzt. Die isotropen Modellparameter sind  $M_{i,R} = 0,05 \mu\text{m}$ ,  $M_{i,L} = 1 \mu\text{m}$

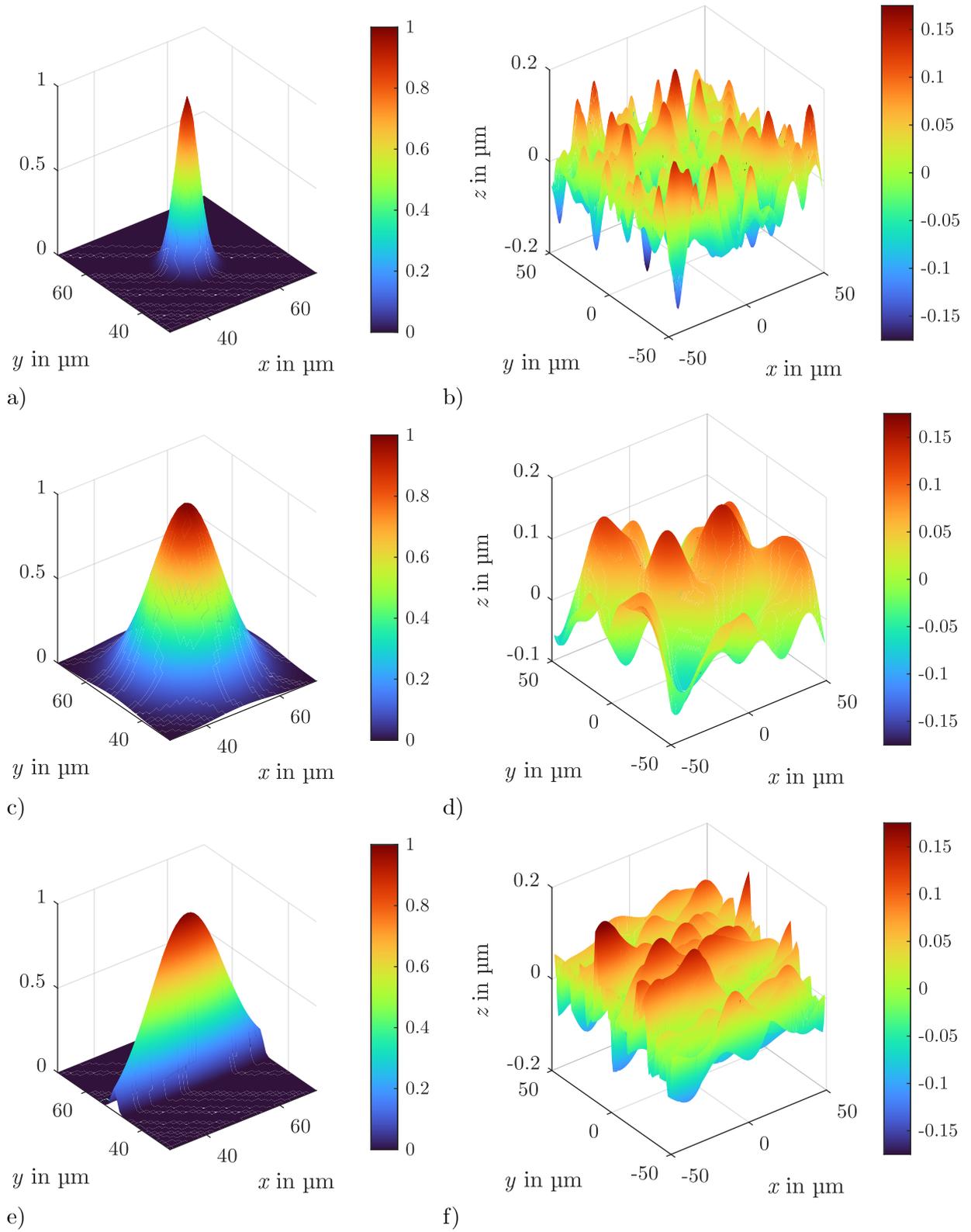


Abbildung 2.11: (a) Filterfunktion für  $S_{al,x} = S_{al,y} = 5 \mu\text{m}$ . (b) Oberflächentopographie für  $S_q = 0,05 \mu\text{m}$ . (c) Filterfunktion für  $S_{al,x} = S_{al,y} = 15 \mu\text{m}$ . (d) Oberflächentopographie für  $S_q = 0,05 \mu\text{m}$ . (e) Filterfunktion für  $S_{al,x} = 20 \mu\text{m}$  und  $S_{al,y} = 2 \mu\text{m}$ . (f) Oberflächentopographie für  $S_q = 0,05 \mu\text{m}$ .

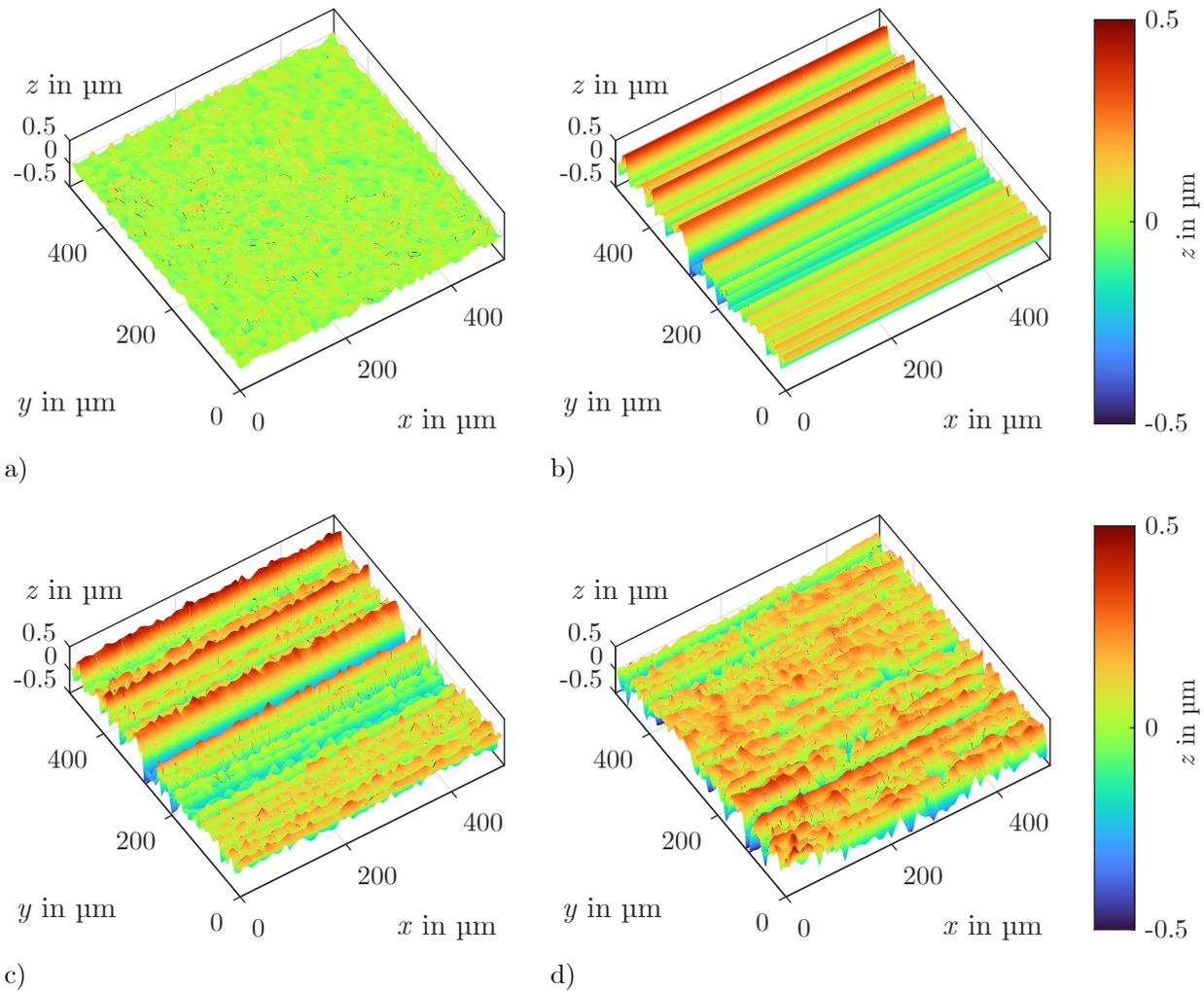


Abbildung 2.12: Topographien von (a) einer nach Gleichung (2.19) simulierten isotropen Oberfläche mit  $S_{al,x} = S_{al,y}$ , (b) einer simulierten anisotropen Oberfläche mit  $S_{al,x} = \infty$ , (c) der Summe aus (a) und (b) nach Gleichung (2.21) und (d) einer *Rugotest* Referenzprobe.

und die anisotropen Modellparameter in  $y$ -Richtung sind  $M_{a,R} = 0,185 \mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 4 \mu\text{m}$ . Die Oberflächentopographie in Abbildung 2.12 (d) wurde von einer *Rugotest Nr. 5 N3*-Referenzprobe mit einer nominellen Rauheit  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$  in  $y$ -Richtung gemessen. Die Oberflächentopographien sind mit einer räumlichen Auflösung von  $8 \mu\text{m}$  dargestellt. Gewisse qualitative Unterschiede zwischen der realen und der simulierten Oberflächentopographie bleiben bestehen, z. B. sind die Bearbeitungsriefen nicht unendlich lang in  $x$ -Richtung und auch nicht vollkommen unidirektional. Eine hinreichend gute qualitative Übereinstimmung der Oberflächentopographie und der simulierten Specklemuster zwischen Simulation und Referenz wird jedoch bei aufeinander abgestimmten quantitativen Oberflächenparametern erreicht. Hier wurden die Modellparameter der simulierten Oberfläche so gewählt, dass die simulierte Oberfläche vergleichbare Parameter wie die physikalische Referenzprobe aufweist, für die  $S_q = 0,19 \mu\text{m}$  und  $S_{al,y} = 6 \mu\text{m}$  sind.

### 2.3.3 Merkmalsbasierte Messung räumlicher Parameter

Ein Specklemuster ist ein Interferenzmuster, welches durch Höhenvariationen der Oberfläche entsteht, deren räumliche Ausdehnung in der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Spek-

trums liegt. Bei den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Specklemustern sind die zugrundeliegenden Oberflächenstrukturen kleiner als die Auflösungsgrenze des optischen Systems, welche für die experimentellen Aufbauten dieser Arbeit bei etwa  $10\ \mu\text{m}$  liegt. Gleiches gilt für die mittlere Größe der Speckle, welche durch die Auflösungsgrenze bestimmt wird. Die in Abschnitt 2.3.1 eingeführten anisotropen Oberflächentopographien weisen allerdings Bearbeitungsriefen auf, welche in Bearbeitungsrichtung  $\gg 10\ \mu\text{m}$  sind, siehe Abbildung 2.12 (d).

Simulierte Speckle-Streulichtmuster dieser anisotropen Oberflächenklasse sind in Abbildung 2.13 gezeigt. Für alle Oberflächen sind die Modellparameter  $M_{i,L} = 10\ \mu\text{m}$  und  $M_{a,R} = 0,15\ \mu\text{m}$  bei einer mittleren Specklegröße von 4,5 Pixel. Der Parameter  $M_{i,R}$  wird von  $0,04\ \mu\text{m}$  bis  $0,07\ \mu\text{m}$  variiert und der Parameter  $M_{a,L}$  von  $20\ \mu\text{m}$  bis  $60\ \mu\text{m}$ . Im Gegensatz zu den in Abbildung 2.3 gezeigten Specklemustern isotroper Oberflächentopographien weisen die Specklemuster in Abbildung 2.13 unterschiedliche Eigenschaften in  $\xi$ - und  $\eta$ -Richtung auf. Neben den Speckle erscheinen lange, schmale Bildmerkmale in  $\xi$ -Richtung, welche die Grundlage für die merkmalsbasierte Messung der räumlichen Oberflächenparameter bilden. Die hellen und dunklen Streifen treten im Speckle-Streulichtmuster auf, da die Bearbeitungsriefen der anisotropen Oberflächentopographien in  $x$ - bzw.  $\xi$ -Richtung, deutlich länger als die Auflösungsgrenze sind und zudem die Höhenvariationen in  $x$ -Richtung geringer sind als in  $y$ - bzw.  $\eta$ -Richtung. Abbildung 2.13 zeigt, dass das Streifenmuster prominenter wird, je größer das Verhältnis  $M_{a,L}/M_{i,L}$  bzw.  $M_{a,R}/M_{i,R}$  wird. Durch Höhenvariationen mit einer lateralen Ausdehnung  $< 10\ \mu\text{m}$  entstehen aber weiterhin auch klassische Speckle. Somit ist das resultierende Speckle-Streulichtmuster eine Überlagerung der Streifen und der Speckle. In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie sich die räumlichen Parameter, d. h. Bearbeitungsrichtung  $\beta$  und laterale Korrelationslänge  $S_{al,y}$ , aus dem Speckle-Streulichtmuster auswerten lassen. Ferner werden in Abschnitt 2.3.4 der Kontrast und die Autokorrelationsfunktion des Specklemusters ausgewertet, um die bidirektionalen Höhenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  aus dem Speckle-Streulichtmuster zu bestimmen.

In lateraler Richtung wird eine Oberflächentopographie durch die Autokorrelationslänge charakterisiert. Bei in  $x$ -Richtung unidirektional bearbeiteten Oberflächen beschreibt der Parameter  $S_{al,y}$  insbesondere die Form und Verteilung der Bearbeitungsriefen. In Abbildung 2.12 (c) und (d) sind in den Oberflächentopographien die markanten unidirektionalen Bearbeitungsriefen in  $x$ -Richtung zu sehen. Abbildung 2.14 (a) zeigt das Speckle-Streulichtmuster der simulierten Oberfläche aus Abbildung 2.12 (c). Das  $(\xi, \eta)$ -Koordinatensystem des Kamerasensors ist um den Winkel  $\beta$  zu dem  $(x, y)$ -Koordinatensystem der Probenoberfläche rotiert. Da die von den Bearbeitungsriefen verursachten hellen und dunklen Streifen als periodische, unidirektionale Merkmale im Speckle-Streulichtmuster erscheinen, wird eine Auswertung mittels Frequenzanalyse vorgeschlagen. Diese wird in Matlab mit der Funktion `fft2()` durch eine zweidimensionale schnelle Fouriertransformation realisiert. Das damit berechnete Amplitudenspektrum ist in Abbildung 2.14 (b) dargestellt. Da die Bearbeitungsriefen stochastisch auf der anisotropen Oberflächentopographie verteilt sind, erscheinen im Spektrum eine große Anzahl von Ortsfrequenzen in  $y$ -Richtung senkrecht zur Bearbeitungsrichtung. Das Spektrum hat ein globales Maximum am Ursprung bei den Ortsfrequenzen  $f_\xi = f_\eta = 0$  und mehrere lokale Maxima entlang der  $y$ -Achse. Somit kann aus der Lage dieser lokalen Maxima die Bearbeitungsrichtung  $\beta_{sp}$ , d. h. der Winkel zwischen der  $y$ - und der  $\eta$ -Achse bestimmt werden.

Der Schwerpunkt des Spektrums  $f_c$  ist das gewichtete Mittel aller Ortsfrequenzen im Speckle-Streulichtmuster. Für die in Abschnitt 2.3.1 eingeführte Klasse anisotroper Oberflächentopographien bedeutet eine höhere Ortsfrequenz in  $y$ -Richtung, dass die Bearbeitungsriefen im Mittel näher beieinander liegen, was zu einer kleineren Korrelationslänge  $S_{al,y}$  führt. Um die laterale Korrelationslänge  $S_{al,y}$  zu bestimmen, wird daher folgende heuristisch abgeleitete Hypothese genutzt:

$$S_{al,y} \sim -f_c. \quad (2.22)$$

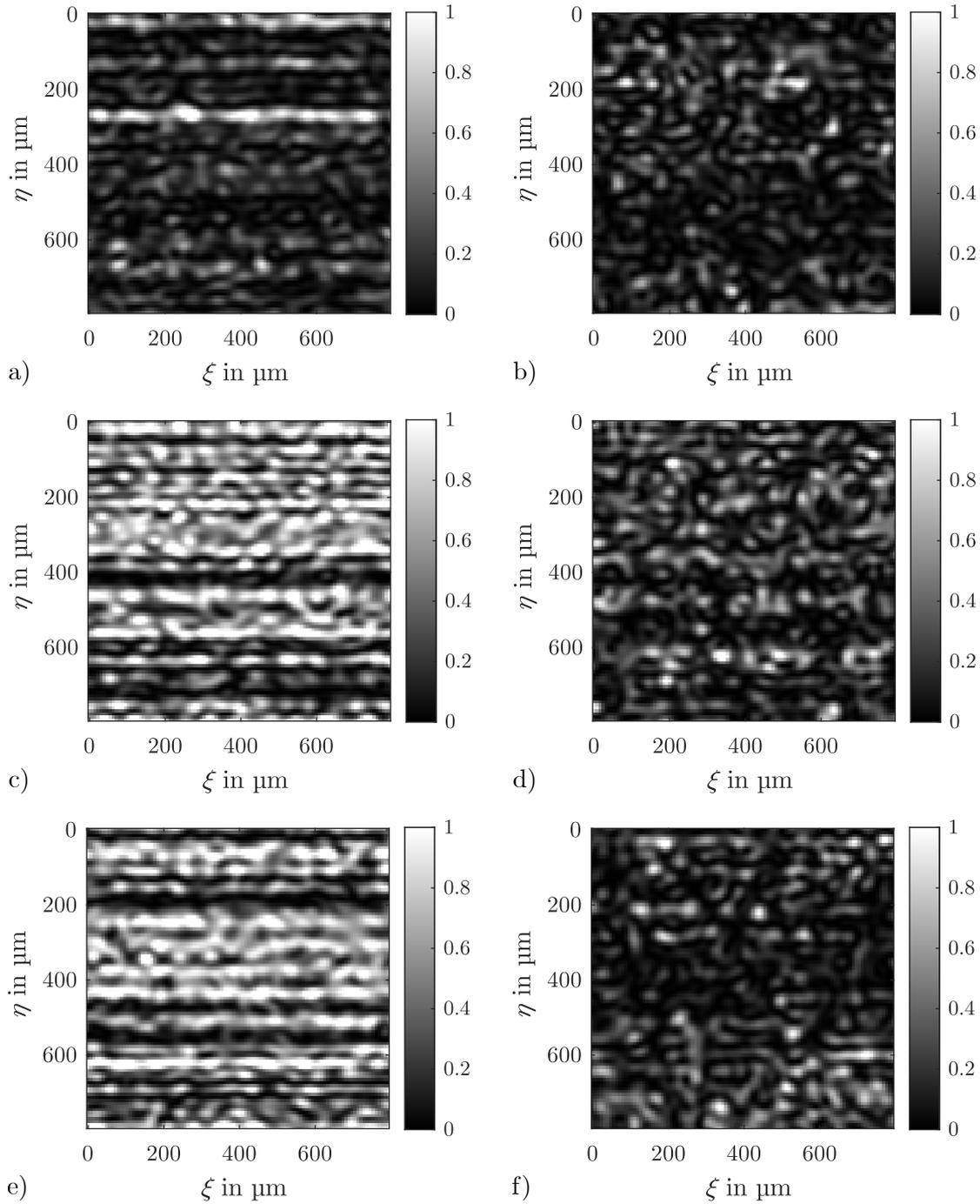


Abbildung 2.13: Nach Gleichung (2.21) simulierte Specklemuster für anisotrope Oberflächenhöhenverteilungen  $H(x, y)$ . Die Modellparameter sind  $M_{i,L} = 10\mu\text{m}$  und  $M_{a,R} = 0,15\mu\text{m}$  bei einer mittleren Specklegröße von 4,5 Pixel. Variiert werden die Rauheit in  $\xi$ -Richtung und die Autokorrelationslänge in  $\eta$ -Richtung. (a)  $M_{i,R} = 0,04\mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 20\mu\text{m}$ , (b)  $M_{i,R} = 0,07\mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 20\mu\text{m}$ , (c)  $M_{i,R} = 0,04\mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 40\mu\text{m}$ , (d)  $M_{i,R} = 0,07\mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 40\mu\text{m}$ , (e)  $M_{i,R} = 0,04\mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 60\mu\text{m}$ , (f)  $M_{i,R} = 0,07\mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 60\mu\text{m}$ .

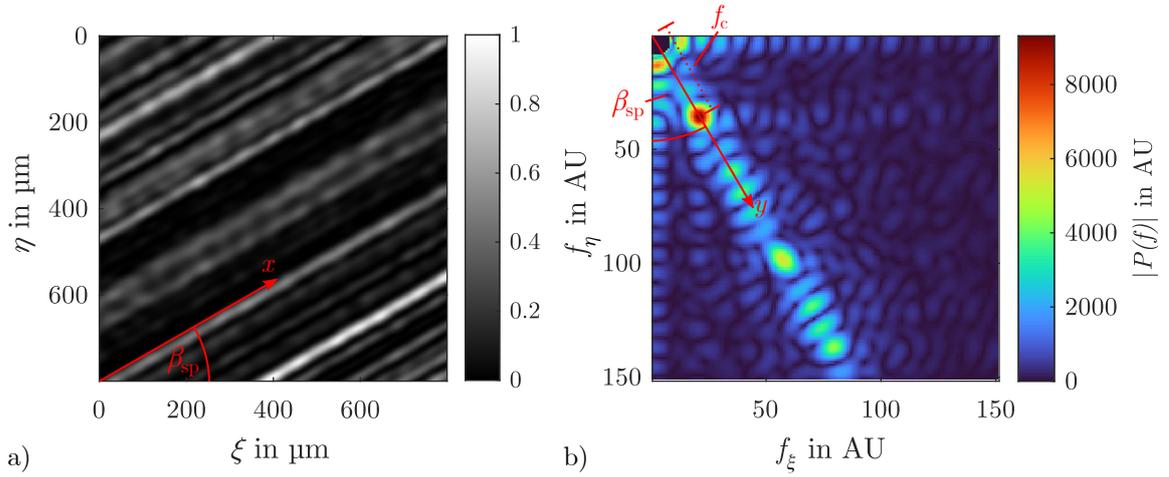


Abbildung 2.14: (a) Das simulierte Speckle-Streulichtmuster einer anisotropen Oberfläche und (b) das zugehörige zweidimensionale Amplitudenspektrum. In rot sind die aus dem Speckle-Streulichtmuster bestimmte Bearbeitungsrichtung  $\beta_{\text{sp}}$  und die räumliche Frequenz  $f_c$  eingezeichnet.

Die für die Parameter  $\beta$  und  $S_{\text{al},y}$  vorgeschlagenen Auswerteverfahren werden in Abbildung 2.15 in einer Simulation demonstriert. Dafür werden Speckle-Streulichtmuster simuliert und sowohl die Bearbeitungsrichtung  $\beta$  als auch der Oberflächenmodellparameter  $M_{\text{a,L}}$  variiert.  $M_{\text{a,L}}$  bestimmt die laterale Korrelationslänge  $S_{\text{al},y}$  in  $y$ -Richtung. Die simulierten Speckle-Streulichtmuster werden mittels des zweidimensionalen Ortsfrequenzspektrums merkmalsbasiert ausgewertet. Abbildung 2.15 (a) zeigt die Messabweichung der Bearbeitungsrichtung, d. h. die Differenz von  $\beta_{\text{sp}}$  und  $\beta$ , über den wahren Wert  $\beta$ . Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung des Mittelwerts aus 50 Bildern. Da alle Konfidenzintervalle der doppelten Standardabweichung die Null-Achse der Messabweichung schneiden, treten im gesamten Messbereich von  $\beta = \pm 90^\circ$  keine systematischen Messabweichungen auf. Die zufälligen Messabweichungen sind im gesamten Messbereich  $< 0,01^\circ$ .

Abbildung 2.15 (b) zeigt die Schwerpunktfrequenz  $f_c$  über den Oberflächenmodellparameter  $M_{\text{a,L}}$ . Die isotropen Modellparameter sind  $M_{\text{i,R}} = 0,03 \mu\text{m}$ ,  $M_{\text{i,L}} = 1 \mu\text{m} - 20 \mu\text{m}$  und die anisotropen Modellparameter in  $y$ -Richtung sind  $M_{\text{a,R}} = 0,15 \mu\text{m}$  und  $M_{\text{a,L}} = 5 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ . Die Simulationsergebnisse zeigen eine Abhängigkeit der Ortsfrequenz  $f_c$  von  $M_{\text{a,L}}$  im Bereich  $5 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ . Im Bereich  $15 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$  ist die Schwerpunktfrequenz  $f_c$  näherungsweise linear abhängig von dem Modellparameter  $M_{\text{a,L}}$ . Eine signifikante Querempfindlichkeit bezüglich  $M_{\text{i,L}}$  ist erst ab  $M_{\text{a,L}} > 50 \mu\text{m}$  zu erkennen. Es bleibt zu klären, inwieweit sich diese Erkenntnisse von der Simulation auf experimentelle Untersuchungen übertragen lassen und für welchen Messbereich sich die Hypothese aus Gleichung (2.22) validieren lässt.

### 2.3.4 Bidirektionale Messung von Höhenparametern

#### Specklekontrast

Um die Höhenparameter der Oberflächentopographie zu bestimmen, wird die Statistik des Specklemusters ausgenutzt. In Abschnitt 2.1.3 wurde bereits in Abbildung 2.3 qualitativ anhand von simulierten Specklemustern der Übergang von teilweise zu vollständig entwickelten Specklemustern gezeigt. Dieser Übergang ist charakterisiert durch einen steigenden Specklekontrast

$$C = \frac{\sigma(I)}{\langle I \rangle}, \quad (2.23)$$

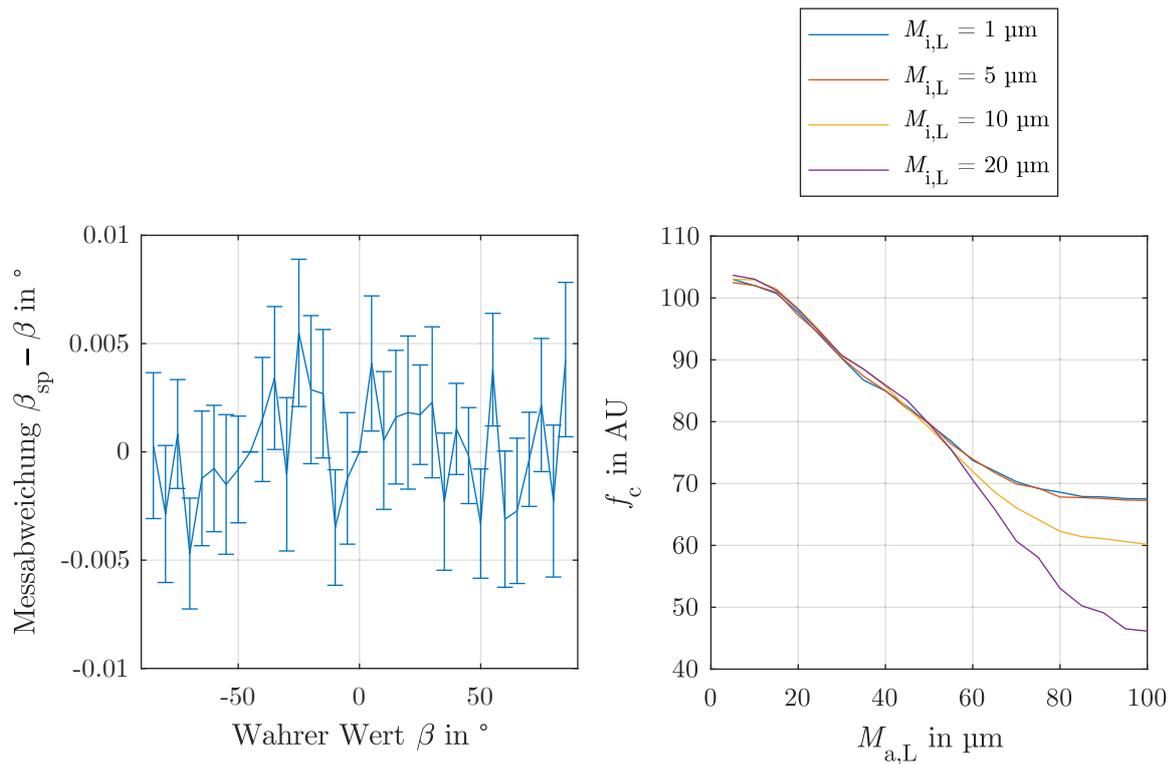


Abbildung 2.15: Merkmalsbasierte Messung der Bearbeitungsrichtung und der lateralen Korrelationslänge aus simulierten Speckle-Streulichtmustern. (a) Messabweichung der aus dem Specklemuster bestimmten Bearbeitungsrichtung  $\beta_{sp}$  vom wahren Wert  $\beta$ . (b) Schwerpunktfrequenz  $f_c$  über den Oberflächenmodellparameter  $M_{a,L}$  für unterschiedliche  $M_{i,L}$ .

welcher sich aus dem Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert der Graustufenwerte  $I$  ergibt. Das Specklemuster in Abbildung 2.3 (a) mit  $S_q = 0,01 \mu\text{m}$  ist durch überwiegend spekulare Reflexion nahezu homogen ausgeleuchtet und weist somit einen geringen Kontrast auf. Dagegen sind im voll entwickelten Specklemuster in Abbildung 2.3 (d) gleichermaßen helle und dunkle Bildbereiche vertreten, wodurch sich ein Kontrast von  $\approx 1$  ergibt. Der Messeffekt des rauheitsabhängigen Specklekontrasts ist schon seit den 1970er Jahren bekannt [Fuj1974, Fuj1976] und von Goodman für isotrope Oberflächen mit gaußscher Höhenverteilung theoretisch beschrieben, siehe Gleichung (2.200) in [Dai1975]. Abbildung 2.16 zeigt den Specklekontrast simulierter Specklemuster bei Variation der Oberflächenrauheit  $S_q$ . Zudem ist der nach der Theorie von Goodman berechnete Specklekontrast

$$C_{\text{theo}} = \frac{\sqrt{\frac{4}{N} \left[ \text{Chi}(\sigma_\phi^2) - \gamma - \ln(\sigma_\phi^2) \right] + \frac{2}{N^2} \left[ \left( \text{Chi}(\sigma_\phi^2) - \gamma - \ln(\sigma_\phi^2) \right)^2 + \left( \text{Shi}(\sigma_\phi^2) \right)^2 \right]}}{1 + \frac{1}{N} \left[ \text{Ei}(\sigma_\phi^2) - \gamma - \ln(\sigma_\phi^2) \right]} \quad \text{mit} \quad (2.24)$$

$$N = \frac{\lambda^2 f^2}{S_{\text{al}}^2 \pi^2 (d_A/2)^2}, \quad (2.25)$$

$$\sigma_\phi = \frac{4\pi}{\lambda} S_q \quad (2.26)$$

dargestellt. Demnach ist der Specklekontrast  $C_{\text{theo}}$  abhängig von der Anzahl der Oberflächenkorrelationsbereiche  $N$ , die an der Lichtstreuung beteiligt sind, der Variation der Phase  $\sigma_\phi^2$  des Wellenfelds nach der Lichtstreuung und der Euler-Mascheroni-Konstante  $\gamma \approx 0,57721$ . Die Funktionen  $\text{Ei}(\cdot)$ ,  $\text{Shi}(\cdot)$  und  $\text{Chi}(\cdot)$  bezeichnen die Integraleponentialfunktion, die Sinus-hyperbolicus-Integralfunktion und die Cosinus-hyperbolicus-Integralfunktion. Die Anzahl der Oberflächenkorrelationsbereiche  $N$  ist wiederum abhängig von der lateralen Korrelationslänge  $S_{\text{al}}$  der Oberfläche sowie den Parametern des optischen Systems: Wellenlänge  $\lambda$ , Brennweite  $f$  der Linsen in 4- $f$ -Konfiguration und Durchmesser der Apertur  $d_A$ . Die Variation der Phase  $\sigma_\phi^2$  des Wellenfelds nach der Lichtstreuung ist proportional zu der Variation  $S_q^2$  der Höhenwerte der Oberflächentopographie  $H(x, y)$ .

Abbildung 2.16 zeigt, dass der nach Gleichung (2.24) berechnete Specklekontrast mit der Auswertung von simulierten Specklemustern nahezu übereinstimmt. Die Übereinstimmung mit der Theorie ist eine Verifikation des Simulationsansatzes, welche die Oberflächenmodellierung aus Gleichung (2.19) mit der Simulation von Specklemustern nach Gleichung (2.5) kombiniert. Die Simulationsparameter sind: laterale Korrelationslänge  $S_{\text{al}} = 10 \mu\text{m}$ , Wellenlänge  $\lambda = 638 \text{ nm}$ , Brennweite  $f = 150 \text{ mm}$  und Durchmesser der Apertur  $d_A = 1 \text{ mm}$ . Der Messbereich der auf dem Specklekontrast basierten Rauheitsmessung ist  $0 < S_q \lesssim \lambda/4 = 0,16 \mu\text{m}$  mit der größten Sensitivität bei  $S_q \approx 0,1 \mu\text{m}$ .

Für den Specklekontrast von der in Abschnitt 2.3.2 eingeführten Klasse anisotroper Oberflächen existiert jedoch keine theoretische Beschreibung. Die Speckle-Streulichtmuster dieser Oberflächenklasse zeigen allerdings eine qualitative Veränderung des Kontrasts in  $\xi$ -Richtung bei Änderung des Oberflächenparameters  $M_{i,R}$ , siehe Abbildung 2.13. Daraus leitet sich die Hypothese ab, dass die Rauheitsparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  anisotroper Oberflächen durch eine bidirektionale Kontrastauswertung bestimmt werden können. Der Specklekontrast

$$C_x = \frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{N_y} \frac{\sqrt{\frac{1}{N_x} \sum_{x=1}^{N_x} [I(x, y) - \langle I \rangle_x(y)]^2}}{\langle I \rangle_x(y)}, \quad \text{mit} \quad \langle I \rangle_x(y) = \frac{1}{N_x} \sum_{x=1}^{N_x} I(x, y) \quad (2.27)$$

in  $x$ -Richtung wird analog zu Gleichung (2.17) parallel zur Bearbeitungsrichtung ausgewertet

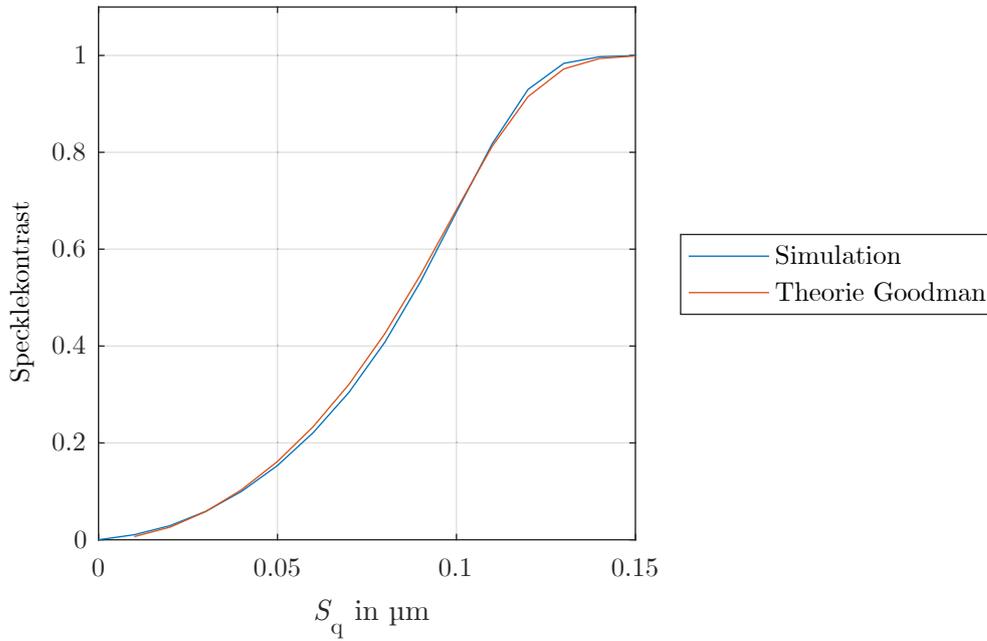


Abbildung 2.16: Specklekontrast einer isotropen Oberfläche mit der Rauheit  $S_q$  berechnet nach der Theorie von Goodman [Dai1975, Goo2007] und ausgewertet aus simulierten Specklemustern. Dabei sind die Laserwellenlänge  $\lambda = 638 \text{ nm}$ , die Apertur  $d_A = 1 \text{ mm}$  und die laterale Korrelationslänge  $S_{al} = 10 \mu\text{m}$ .

und entsprechend senkrecht dazu  $C_y$ . Voraussetzung für diese Auswertung entlang der Zeilen und Spalten des Specklemusters ist allerdings eine korrekte Ausrichtung. Um aussagekräftige Ergebnisse für den Kontrast und somit die mittlere quadratische Höhe  $S_{q,x}$  in Bearbeitungsrichtung zu erhalten, muss das Koordinatensystem  $(\xi, \eta)$  des Kamerasensors gleich orientiert sein wie das Koordinatensystem  $(x, y)$  der Oberflächentopographie, d. h.  $\beta = 0$ . Im vorherigen Abschnitt 2.3.3 wurde gezeigt, wie der Winkel  $\beta = 0$  aus dem Specklemuster bestimmt werden kann. Diese Messung ist somit eine Voraussetzung für die experimentelle Umsetzung der bidirektionalen Kontrastauswertung.

Abbildung 2.17 zeigt die bidirektionale Auswertung des Specklekontrasts von simulierten Specklemustern. In dieser Simulation ist  $\beta = 0$  und deshalb stimmen  $\xi$  und  $\eta$  mit  $x$  und  $y$  überein. In Abbildung 2.17 (a) bleibt die anisotrope Oberflächenkomponente konstant mit  $M_{a,R} = 0,15 \mu\text{m}$ , während die isotrope Oberflächenkomponente  $M_{i,R}$  von 0 bis  $0,15 \mu\text{m}$  variiert wird. Dabei zeigt die Auswertung in  $x$ -Richtung ein mit dem isotropen Fall vergleichbares Verhalten, siehe Abbildung 2.16. Somit gilt gemäß der Simulation für die betrachtete Klasse unidirektional gefertigter anisotroper Oberflächen: Durch eine bidirektionale Specklekontrastauswertung können Variationen der Rauheit in Bearbeitungsrichtung getrennt von der Rauheit senkrecht zur Bearbeitungsrichtung bestimmt werden. Abbildung 2.17 (b) zeigt eine Variation der anisotropen Oberflächenkomponente  $M_{a,R}$  von 0 bis  $0,15 \mu\text{m}$ , während die Rauheit  $M_{i,R}$  der isotropen Oberflächenkomponente konstant bei  $0,05 \mu\text{m}$  liegt. Somit ist der minimale Wert für die beiden Oberflächenparameter  $S_{q,x} = S_{q,y} = 0,05 \mu\text{m}$ . Hier ist eine Querempfindlichkeit der beiden Komponenten  $C_x$  und  $C_y$  des Specklekontrasts zu erkennen. Obwohl die Rauheit  $S_{q,x}$  konstant bleibt, steigt der Specklekontrast  $C_x$ .

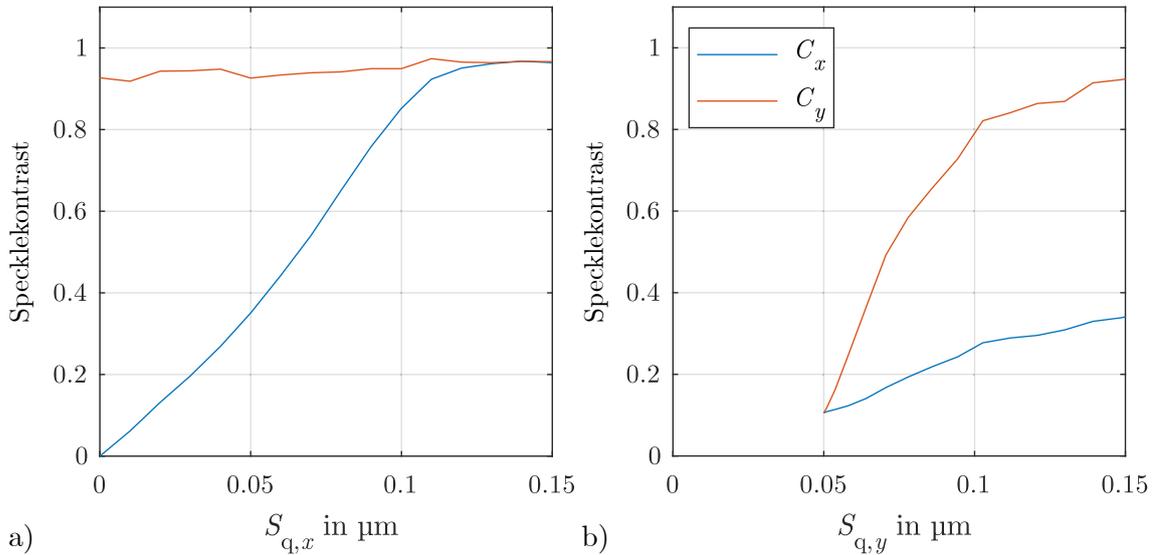


Abbildung 2.17: Specklekontrast anisotroper Oberflächentopographien bidirektional in  $x$ - und  $y$ -Richtung ausgewertet. (a) Variation des Oberflächenmodellparameters  $M_{a,R}$ , bzw.  $S_{q,x}$ . (b) Variation des Oberflächenmodellparameters  $M_{i,R}$ , bzw.  $S_{q,y}$ .

### Autokorrelation

Ein weiterer bereits seit den 1970er Jahren untersuchter Ansatz zur Messung von Oberflächenhöhenparametern ist die Auswertung der Autokorrelationsfunktion des Specklemusters [Ped1975, Ruf1985, Leh1999]. Wie bei Auswertung des Specklekontrasts wird mit der Autokorrelationsfunktion im Übergang von teilweise zu voll entwickelten Specklemustern das Verhältnis von diffus gestreutem zu spekulär reflektiertem Licht bewertet. Die diskrete zweidimensionale Autokorrelationsfunktion

$$K_{\text{sp}}(\Delta\xi, \Delta\eta) = \sum_{\xi=1}^{N_{\xi}} \sum_{\eta=1}^{N_{\eta}} (I(\xi, \eta) \cdot I(\xi + \Delta\xi, \eta + \Delta\eta)) \quad (2.28)$$

beschreibt die Korrelation der Intensitäten  $I(\xi, \eta)$  eines Specklemusters mit demselben Specklemuster, welches um  $\Delta\xi$  in  $\xi$ -Richtung und  $\Delta\eta$  in  $\eta$ -Richtung verschoben ist. Dabei sind  $N_{\xi}$  und  $N_{\eta}$  die Anzahlen der Pixel des Specklemusters in  $\xi$ - bzw.  $\eta$ -Richtung. Im folgenden wird ein auf Patzelt et. al. basierender Ansatz zur Auswertung der Autokorrelation des Specklemusters vorgestellt [Pat2016, Pat2017, Pat2019]. Dafür wird die Autokorrelationsfunktion zunächst normiert:

$$K_{\text{sp},N}(\Delta\xi, \Delta\eta) = \frac{K_{\text{sp}}(\Delta\xi, \Delta\eta) - K_{\text{sp}}(\max(\Delta\xi), \max(\Delta\eta))}{K_{\text{sp}}(\Delta\xi = 0, \Delta\eta = 0) - K_{\text{sp}}(\max(\Delta\xi), \max(\Delta\eta))}. \quad (2.29)$$

Die Autokorrelationsfunktion nimmt für eine maximale Verschiebung ( $\max(\Delta\xi), \max(\Delta\eta)$ ) die kleinsten Werte und im Ursprung ( $\Delta\xi = 0, \Delta\eta = 0$ ) den größten Wert an, welcher für  $K_{\text{sp},N}(\Delta\xi, \Delta\eta)$  auf 1 normiert wird. Abbildung 2.18 zeigt die normierten Autokorrelationsfunktionen  $K_{\text{sp},N}(\Delta\xi, \Delta\eta)$  der Speckle-Streulichtmuster verschiedener anisotroper Oberflächentopographien. In Abbildung 2.18 (a)–(c) sind Ausschnitte aus der Autokorrelationsfunktion desselben Specklemusters gezeigt. Im größten Ausschnitt ist der gesamte Abfall von  $K_{\text{sp},N}(\Delta\xi = 0, \Delta\eta = 0) = 1$  bis  $K_{\text{sp},N}(\Delta\xi = 4,5\text{mm}, \Delta\eta = 4,5\text{mm}) \approx 0$  zu abgebildet. Bei einem Specklemuster einer isotropen Oberflächentopographie ist die Autokorrelationsfunktion achsensymmetrisch, während eine anisotrope Oberflächentopographie zu einem unterschiedlichen Verhalten in  $\Delta\xi$ - und  $\Delta\eta$ -Richtung führt. Diese Asymmetrie ist bei einer näheren Betrachtung des Maximums der Autokorrelati-

onsfunktion erkennbar. Abbildung 2.18 (c) zeigt qualitativ, dass die Autokorrelationsfunktion in  $\Delta\eta$ -Richtung deutlich schneller abfällt als in  $\Delta\xi$ -Richtung.

Um die Form der Autokorrelationsfunktion quantitativ auszuwerten, wird der charakteristische Parameter

$$R_{\text{opt}}(\widetilde{\Delta\xi}, \widetilde{\Delta\eta}) = \frac{K_{\text{sp,N}}(\Delta\xi = 0, \Delta\eta = 0) - K_{\text{sp,N}}(\widetilde{\Delta\xi}, \widetilde{\Delta\eta})}{\sqrt{\widetilde{\Delta\xi}^2 + \widetilde{\Delta\eta}^2}} = \frac{1 - K_{\text{sp,N}}(\widetilde{\Delta\xi}, \widetilde{\Delta\eta})}{\sqrt{\widetilde{\Delta\xi}^2 + \widetilde{\Delta\eta}^2}} \quad (2.30)$$

definiert, der die Steigung einer Sekante angibt, welche die Autokorrelationsfunktion im Ursprung ( $\Delta\xi = 0, \Delta\eta = 0$ ) und an einem nahegelegenen Punkt  $(\widetilde{\Delta\xi}, \widetilde{\Delta\eta})$  schneidet. In Abbildung 2.18 zeigen die schwarzen Geraden die Sekanten mit der Steigung  $R_{\text{opt},\xi} = R_{\text{opt}}(\widetilde{\Delta\xi} = -8\mu\text{m}, \widetilde{\Delta\eta} = 0)$  und die blauen Geraden die Sekanten mit der Steigung  $R_{\text{opt},\eta} = R_{\text{opt}}(\widetilde{\Delta\xi} = 0, \widetilde{\Delta\eta} = -8\mu\text{m})$ . Die Pixelgröße in der Simulation ist  $8\mu\text{m}$ . Abbildung 2.19 zeigt die Abhängigkeit des Auswerteparameters  $R_{\text{opt}}$  von den Oberflächenparametern  $S_{\text{q}}$  und  $S_{\text{al}}$  zunächst für simulierte Specklemuster auf Basis isotroper Oberflächentopographien. Die Kurven zeigen ein ähnliches Verhalten wie der Specklekontrast in Abbildung 2.16. Der Bereich hoher Sensitivität der Kalibrierkurven liegt in Abhängigkeit von der Autokorrelationslänge etwa zwischen  $S_{\text{q}} = 0,03\mu\text{m}$  und  $0,13\mu\text{m}$ . Wie der Specklekontrast ist auch der autokorrelationsbasierte Parameter  $R_{\text{opt}}$  ein Maß für den Interferenzkontrast des ausgewerteten Speckle-Streulichtmusters. Je größer die Rauheit der Oberfläche ist, desto größer wird der Anteil des Streulichts im Vergleich zum spekulär reflektierten Licht. Ein höherer Streulichtanteil vergrößert die Intensität des Interferenzmusters, d. h. der Speckle. Somit steigt der Kontrast zwischen der Intensität der Speckle und der Intensität des Hintergrundlichts. Je größer dieser Kontrast, desto stärker sind die Speckle entwickelt und desto schneller fällt die Autokorrelationsfunktion des Specklemusters vom Ursprung nach außen hin ab. Für voll entwickelte Speckle erreicht die Steigung der Sekante durch den Ursprung, d. h. der Parameter  $R_{\text{opt}}$ , ihr Maximum und die Obergrenze des Messbereichs ist erreicht. Der Absolutwert des Maximalwerts von  $R_{\text{opt}}$  hängt von den Abständen  $\widetilde{\Delta\xi}$  und  $\widetilde{\Delta\eta}$  der Schnittpunkte der Sekanten ab, der charakteristische Kurvenverlauf wird dadurch allerdings nicht beeinflusst. Der Messeffekt besteht, solange der untere Schnittpunkt der Sekante nicht den Wendepunkt der Autokorrelationsfunktion erreicht. In Abbildung 2.18 (f) liegen diese Wendepunkte bei  $|\Delta\xi| \approx 40\mu\text{m} \hat{=} 5$  Pixel und bei  $|\Delta\eta| \approx 32\mu\text{m} \hat{=} 4$  Pixel. In [Pat2019] wird empfohlen,  $|\widetilde{\Delta\xi}|$  und  $|\widetilde{\Delta\eta}| \leq 4$  Pixel zu wählen.

Wie Abbildung 2.18 (c)–(f) zeigt, weist die Autokorrelationsfunktion der Specklemuster anisotroper Oberflächen eine richtungsabhängige Verteilung auf, welche sich bei Variation der Rauheit in  $x$ - und  $y$ -Richtung ändert. In Abbildung 2.20 wird untersucht, inwieweit sich durch eine Auswertung der Steigungen  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  der Sekanten in  $x$ - und  $y$ -Richtung die Oberflächenparameter  $S_{\text{q},x}$  und  $S_{\text{q},y}$  bestimmen lassen. Die Simulationsparameter entsprechen der in Abbildung 2.17 gezeigten Simulation, welche mittels bidirektionalen Specklekontrasts ausgewertet wurde. In Abbildung 2.20 (a) wird durch eine Variation von  $M_{\text{i,R}}$  von 0 bis  $0,15\mu\text{m}$  die Rauheit in Bearbeitungsrichtung verändert. Dabei zeigt sich auch bei der autokorrelationsbasierten Auswertung in  $x$ -Richtung ein mit dem isotropen Fall vergleichbares Verhalten, siehe Abbildung 2.19. Die Auswertung senkrecht zur Bearbeitungsrichtung weist eine größere Streuung auf, bleibt im Mittel aber auch näherungsweise konstant. Abbildung 2.20 (b) zeigt eine Variation der Rauheit senkrecht zur Bearbeitungsrichtung. Der minimale Wert für die beiden Oberflächenparameter ist wieder  $S_{\text{q},x} = S_{\text{q},y} = 0,05\mu\text{m}$ . Die autokorrelationsbasierte Auswertung zeigt allerdings ein anderes Ergebnis als die Auswertung des Specklekontrasts in Abbildung 2.17 (b). Wenn  $M_{\text{a,R}}$  vergrößert wird, steigt  $S_{\text{q},y}$ , nicht aber  $S_{\text{q},x}$ . Dieses Verhalten zeigt sich auch in den Auswerteparametern  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$ . Somit lassen sich auch bei einer Variation der Rauheit senkrecht zur Bearbeitungsrichtung die Oberflächenparameter  $S_{\text{q},x}$  und  $S_{\text{q},y}$  nahezu ohne Querempfindlichkeit aus der Autokorrelation des Specklemusters bestimmen. Wie auch bei der auf dem Specklekontrast

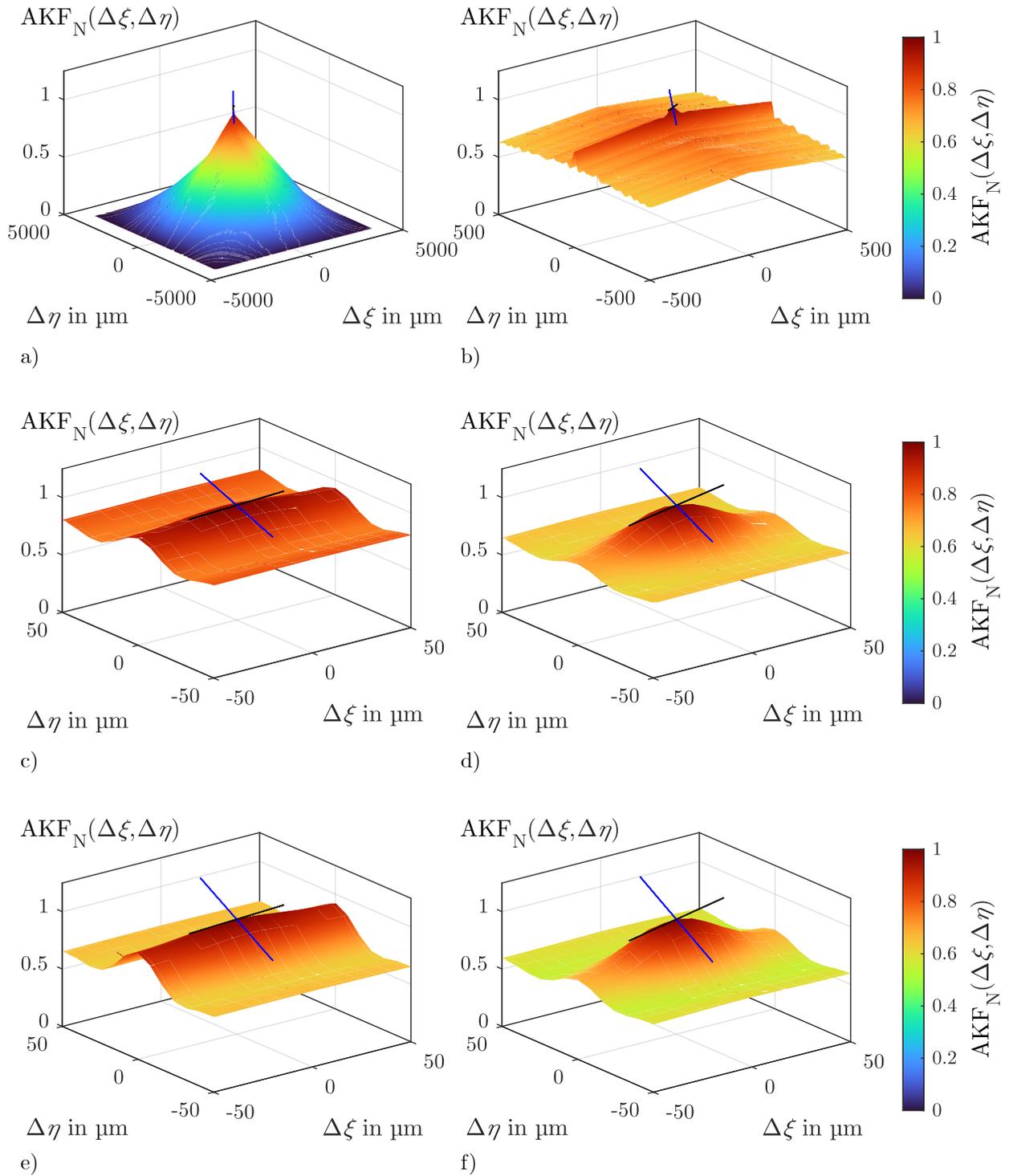


Abbildung 2.18: Normierte Autokorrelationsfunktion  $K_{sp,N}(\Delta\xi, \Delta\eta)$  der Speckle-Streulichtmuster von anisotropen Oberflächentopographien. Die Steigung der schwarzen Tangente ergibt den Parameter  $R_{opt,\xi}$  und die Steigung der blauen Tangente ergibt den Parameter  $R_{opt,\eta}$ . Die Oberflächenmodellparameter sind  $M_{i,L} = 1\ \mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 40\ \mu\text{m}$  sowie in (a)–(c)  $M_{i,R} = 0,04\ \mu\text{m}$  und  $M_{a,R} = 0,1\ \mu\text{m}$ , (d)  $M_{i,R} = 0,07\ \mu\text{m}$  und  $M_{a,R} = 0,1\ \mu\text{m}$ , (e)  $M_{i,R} = 0,04\ \mu\text{m}$  und  $M_{a,R} = 0,15\ \mu\text{m}$ , (f)  $M_{i,R} = 0,07\ \mu\text{m}$  und  $M_{a,R} = 0,15\ \mu\text{m}$ .

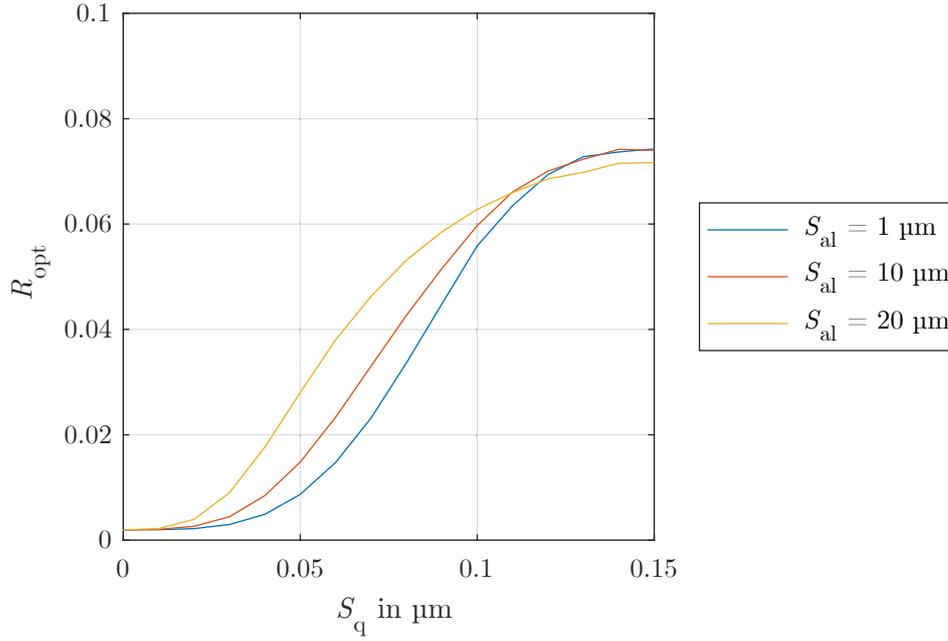


Abbildung 2.19: Aus der normierten Autokorrelationsfunktion ausgewerteter Parameter  $R_{\text{opt}}$  isotroper Oberflächentopographien. Variation der mittleren quadratischen Höhe  $S_q$  bei unterschiedlichen Autokorrelationslängen  $S_{\text{al}}$ .

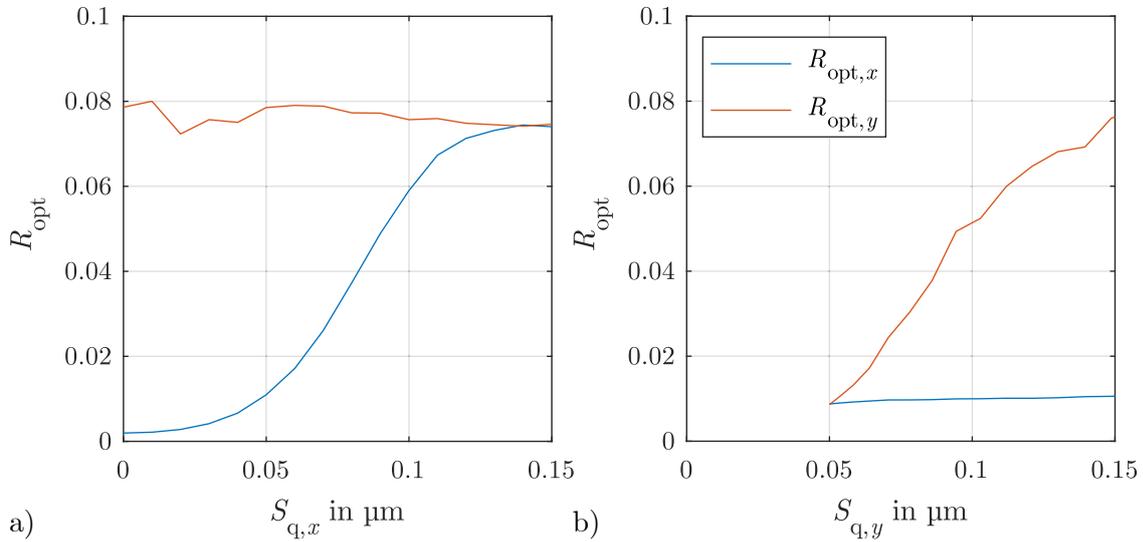


Abbildung 2.20: Aus der normierten Autokorrelationsfunktion in  $x$ - und  $y$ -Richtung ausgewertete Parameter  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  anisotroper Oberflächentopographien mit den Modellparametern  $M_{i,L} = 1 \mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 40 \mu\text{m}$ . (a) Variation des Oberflächenmodellparameters  $M_{i,R}$  bei  $M_{a,R} = 0,15 \mu\text{m}$ . (b) Variation des Oberflächenmodellparameters  $M_{a,R}$  bei  $M_{i,R} = 0,05 \mu\text{m}$ .

basierten Auswertung setzt eine Messung von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  allerdings eine Kalibrierung an referenzierten Oberflächenproben voraus.

### 2.3.5 Fazit

Um unidirektional gefertigte anisotrope Oberflächen zu charakterisieren, werden die Parameter Bearbeitungsrichtung  $\beta$ , Autokorrelationslänge  $S_{al,y}$  senkrecht dazu sowie die mittleren quadratischen Höhenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  aus den genormten Oberflächenparametern abgeleitet. Mit dem Ziel, diese Parameter single-shot aus einem einzigen Specklemuster erfassen zu können, wird ein zweistufiges Auswerteverfahren vorgeschlagen. Da in den Specklemustern dieser Oberflächenklasse charakteristische unidirektionale Bildmerkmale auftreten, sollen  $\beta$  und  $S_{al,y}$  aus dem mittels einer schnellen Fouriertransformation bestimmten zweidimensionalen Amplitudenspektrum des Specklemusters bestimmt werden. Diese Bestimmung der Bearbeitungsrichtung erlaubt anschließend eine Auswertung von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  auf Basis des Specklekontrasts oder der zweidimensionalen Autokorrelationsfunktion des Specklemusters. Da die Lösung des inversen Problems dieses Auswerteansatzes sowie die experimentelle Untersuchung der Messbereichsgrenzen und der Messunsicherheit eine Vielzahl von Referenztopographien mit gezielt variierten Oberflächenparametern erfordern, soll eine adaptive Optik eingesetzt werden, um modellbasierte Referenztopographien zu emulieren. Die experimentelle Validierung dieser Oberflächenemulation sowie der Auswerteansätze der multiparametrischen Oberflächencharakterisierung erfolgen in Abschnitt 4.1. Dabei werden die Forschungsfragen untersucht, inwieweit sich ein phasenbasierter SLM als Referenzobjekt im Specklemessaufbau einsetzen lässt und ob die Abweichungen von der Realität bei der Emulation der Oberflächen die experimentelle Analyse anstelle einer idealisierten Simulation rechtfertigt.

Die Emulation einer Vielzahl von Oberflächen mit definierten Parametern erlaubt die Quantifizierung der zufälligen Messabweichung. Darüber hinaus ist es eine offene Forschungsfrage, welche systematischen Messabweichungen bei unidirektional gefertigten anisotropen Oberflächen durch eine Neigung oder eine Krümmung entstehen. Die Untersuchung dieser systematischen Effekte wird in Abschnitt 4.2 durchgeführt. Die Variation der Krümmung der Oberflächentopographie erfordert die Fertigung dedizierter Proben, da der phasenbasierte SLM nur Höhenvariationen  $< 2\lambda$  emulieren kann.

## 3 Hochaufgelöste Messung der Oberflächenverformung

In diesem Kapitel werden mittels DSP eine hochaufgelöste Messung der Oberflächenverformung experimentell umgesetzt und die in Abschnitt 2.2 hierzu aufgeworfenen Forschungsfragen untersucht. Mit dem Ziel einer Reduktion der zufälligen Messabweichung erfolgt in Abschnitt 3.1 die Messsystemerweiterung durch eine adaptive Optik und darauf basierend eine Ensemblemittelung. Dabei wird die erreichbare Messunsicherheit in Abhängigkeit von der räumlichen und zeitlichen Auflösung untersucht. Um neben den zufälligen auch die systematischen Messabweichungen zu reduzieren, wird in Abschnitt 3.2 der Effekt von Verformungsgradienten untersucht. Mittels einer Simulation soll geklärt werden, wie die zufälligen und systematischen Messabweichungen der DSP von Verformungsgradienten erster, zweiter und höherer Ordnung abhängen. Die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse erlauben anschließend eine Korrektur der systematischen Messabweichungen in experimentell gemessenen Verformungsfeldern. Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchung der hochaufgelösten Messung der Oberflächenverformung mittels DSP in Abschnitt 3.3 zusammengefasst.

### 3.1 Reduktion zufälliger Messabweichungen durch Ensemblemittelung

Im Folgenden wird die in Abschnitt 2.2.4 eingeführte Methode der Ensemblemittelung bei DSP angewendet, um bei hoher Ortsauflösung zufällige Messabweichungen zu reduzieren. Dafür werden zwei Messaufbau-Varianten eingesetzt, welche in Abschnitt 3.1.1 eingeführt werden, zunächst ein Aufbau, bei dem ein rotierender Glasdiffusor verwendet wird, um unterschiedliche Specklemuster auf der Probenoberfläche zu generieren. Die zweite Messaufbau-Variante setzt eine adaptive Optik ein, um schnell und reproduzierbar eine Vielzahl an Specklemustern zu generieren. Auf diese Weise wird eine Reduktion zufälliger Messabweichungen durch Ensemblemittelung erreicht, was in Abschnitt 3.1.2 experimentell validiert wird. Dabei werden die Ergebnisse beider Messaufbau-Varianten bezüglich der Messanforderungen an Messunsicherheit, Ortsauflösung und Zeitauflösung verglichen.

#### 3.1.1 Experimenteller Aufbau

Abbildung 3.1 zeigt die zwei Varianten des Messaufbaus. In beiden Aufbauten wird der Laserstrahl durch einen geschliffenen Glasdiffusor auf die Probenoberfläche gestreut. Eine monochrome CMOS-Kamera (*DMK 37BUX264*, The Imaging Source) mit 5 Megapixel fotografiert die Probenoberfläche durch ein  $f/1,4$ -Objektiv mit einer Brennweite von 25 mm. Die Vergrößerung des optischen Systems wird mit einem 60 mm langen Zwischenring auf 1,4 erhöht. Die Probe wird mit einem Piezo-Präzisionspositionierer (*P-625.1CD*, Physik Instrumente) mit einer linearen Positionswiederholgenauigkeit von  $\pm 5$  nm parallel zum Kamerasensor bewegt.

Die beiden Messaufbau-Varianten unterscheiden sich in der Art und Weise, wie das Laserlicht moduliert wird, d. h., wie unterschiedliche Specklemuster generiert werden. In Abbildung 3.1 (a), (c) ist der Diffusor in einem motorisierten Rotationssteller (*KPRM1E/M*, Thorlabs) montiert mit einer bidirektionalen Winkelpositionswiederholbarkeit von  $\pm 0,1^\circ$ . Durch die Drehung des Diffu-

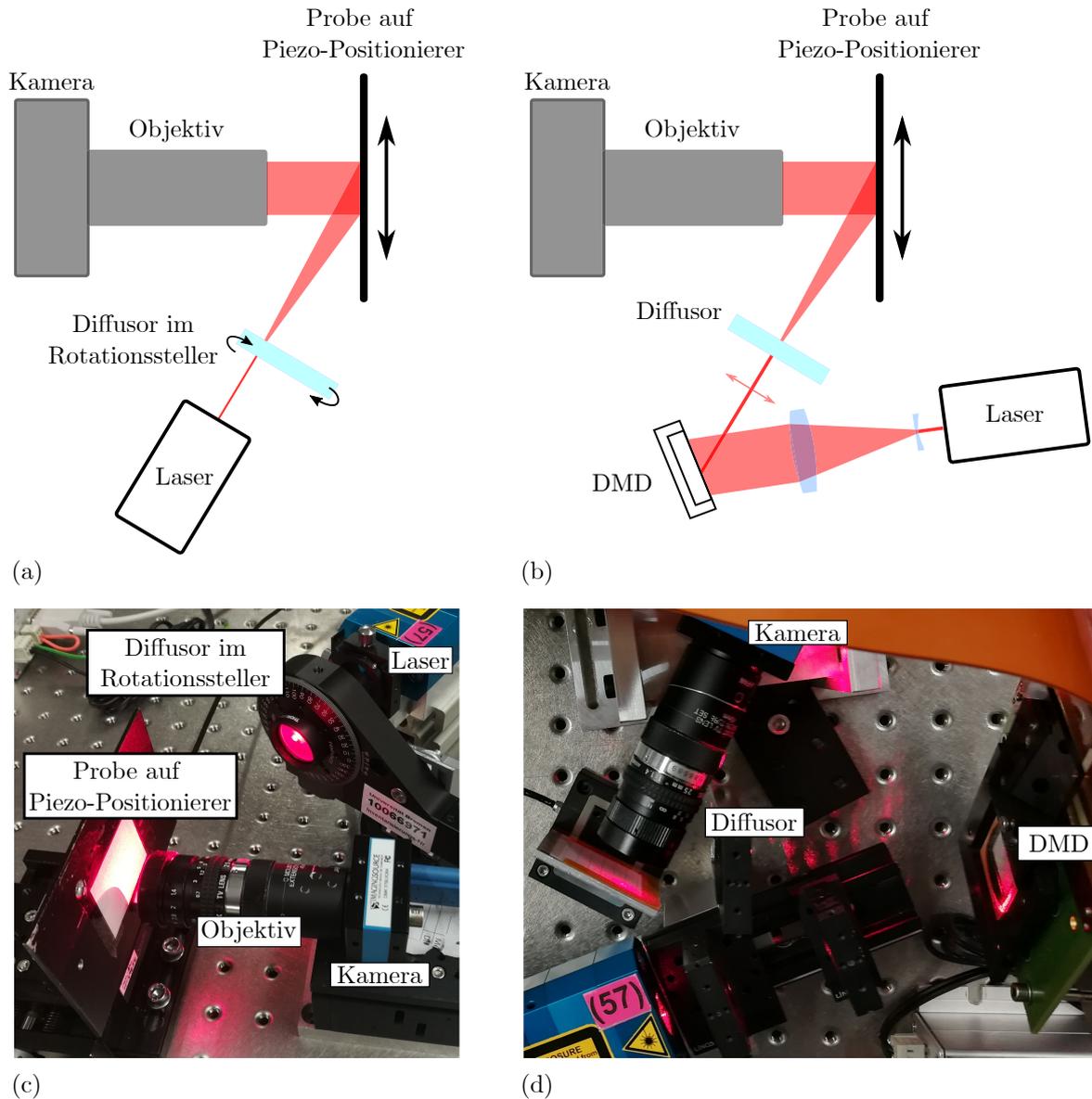


Abbildung 3.1: Schema und Fotos der beiden Messaufbauten. (a), (c) Erzeugung verschiedener Specklemuster mittels eines rotierenden Diffusors; (b), (d) sowie mittels DMD in Kombination mit einem stationären Diffusor.

sors wird der Laserstrahl auf verschiedene Positionen des Diffusors gerichtet, wodurch sich das Specklemuster ändert. Eine hohe Winkelwiederholbarkeit ist notwendig, da die gleichen Specklemuster vor und nach der Bewegung der Probe präzise reproduziert werden müssen. Die maximale Rotationsgeschwindigkeit des Rotationstisches beträgt  $25^\circ$  pro Sekunde. Die erreichbare Specklemuster-Rate hängt von der gewünschten Anzahl von Mustern ab, welche das Winkelinkrement bestimmt. Bei 180 Specklemustern beträgt die maximale Messrate somit 12,5 Hz.

Abbildung 3.1 (b), (d) zeigt die zweite Messaufbau-Variante mit einem Mikrospiegelaktor (engl. „digital micromirror device“ – DMD). Ein DMD ist eine halbleiterbasierte Matrix von Mikrospiegeln, die einzeln durch Kippen um  $+12^\circ$  oder  $-12^\circ$  aus der neutralen Position angesteuert werden können [Hor1997]. Der einfallende Lichtstrahl kann somit räumlich moduliert werden, indem Teile der Wellenfront in bestimmten Bereichen entfernt werden. Der DMD vom Typ *DLP9500* und der Controller *DLPC410* von Texas Instruments werden zusammen als Teile des Moduls *V-9501* der ViALUX GmbH eingesetzt. Der DMD besteht aus  $1920 \times 1080$  Mikrospiegeln und hat eine Bildrate von 17,9 kHz für 1 bit Binärbilder. Zwei Linsen werden verwendet, um den Laserstrahl so aufzuweiten, dass er die gesamte aktive Fläche des DMDs abdeckt. Der Einfallswinkel auf den DMD ist auf  $12^\circ$  eingestellt, um die höchste Lichteffizienz zu erreichen [Sch2020]. Die Spiegel stehen im ausgeschalteten Zustand senkrecht zum einfallenden Strahl. Der DMD wird verwendet, um das Laserlicht auf verschiedene Positionen des stationären Diffusors zu richten. Zu diesem Zweck wird ein Quadrat aus beispielsweise  $70 \times 70$  Mikrospiegeln im angeschalteten Zustand (etwa  $0,76 \text{ mm} \times 0,76 \text{ mm}$ ) über den beleuchteten Bereich des DMD bewegt, während sich die übrigen Mikrospiegel im ausgeschalteten Zustand befinden. Die Lichtintensität wird durch die Strahlaufweitung und die anschließende räumliche Modulation erheblich verringert. Mit einer Bildrate von 17,9 kHz ermöglicht der DMD jedoch eine mehr als 1000-mal schnellere Messrate und eine genauere Steuerung der Laserstrahlposition auf dem Diffusor als der Rotationssteller der Messaufbau-Variante (a).

### 3.1.2 Validierungsmessungen

#### Rotierender Diffusor

Abbildung 3.2 zeigt Ausschnitte aus Specklemustern in drei Winkelstellungen des Diffusors mit je  $6^\circ$  Winkeldifferenz. Dadurch wird demonstriert, dass sich durch die Rotation des Diffusors unterschiedliche Specklemuster generieren lassen und sich diese Muster nach Verschiebung der Probe von Position A zu Position B auch wieder reproduzieren lassen. In den  $20 \times 20$  Pixel großen Auswertefenstern sind charakteristische Merkmale in den Position A und B wiederzuerkennen, allerdings sind auch Abweichungen erkennbar. Durch diese Abweichungen dekorrelieren die jeweiligen Bildpaare, d. h., der Korrelationskoeffizient sinkt. Je geringer die Korrelation, desto größer werden die zufälligen Messabweichungen des Verformungsfeldes. Im Folgenden wird untersucht, inwieweit sich diese zufälligen Messabweichungen durch eine Ensemblemittelung über viele verschiedene Diffusorpositionen reduzieren lassen.

Um das Potenzial der in Abschnitt 2.2.4 vorgestellten Ensemblemittelung experimentell zu untersuchen, wird zunächst ein Vergleich verschiedener Mittelungsmethoden herangezogen. Abbildung 3.3 zeigt den Verlauf des zeitlichen, räumlichen und Ensemblemittelwerts bei Vergrößerung des effektiven Auswertebereichs. Für jede Kurve wurden fünf Messreihen durchgeführt, die Fehlerbalken zeigen die jeweilige Standardabweichung des Mittelwerts. Zu beachten ist die doppellogarithmische Achsenskalierung, in welcher die Quadratwurzelfunktion aus der theoretischen Vorhersage eine gerade Linie (schwarz) mit einer Steigung von  $-1/2$  bildet. Die Probe wird parallel zum Kamerasensor verschoben und deshalb werden die wahren Werte der lokalen Verformungen über das gesamte Bildfeld als konstant angenommen. Somit ist die Standardabweichung  $\sigma(V)$  des Verformungsfeldes ein Maß für die Messunsicherheit. Das untersuchte Sichtfeld

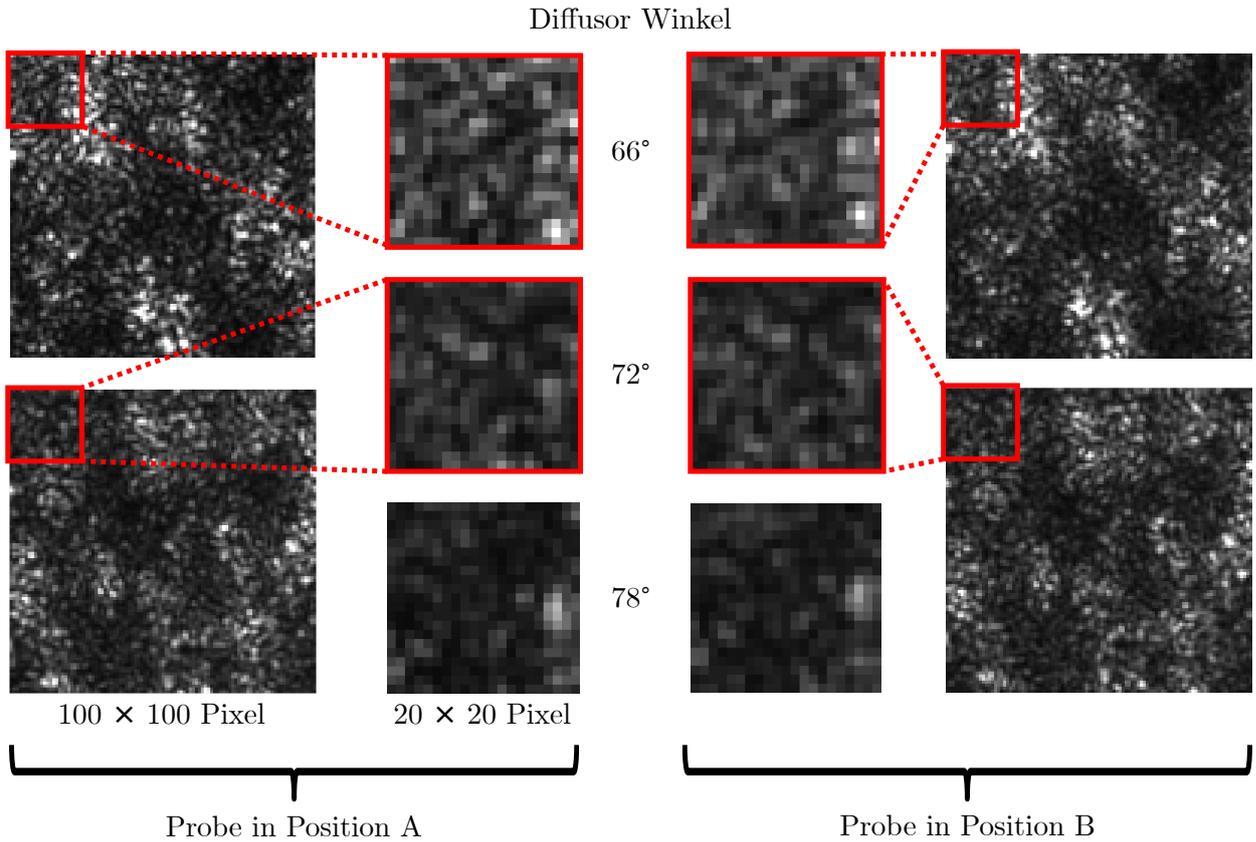


Abbildung 3.2: Durch Rotation des Glasdiffusors generierte Specklemuster mit der Probe in Position A und in Position B, welche um 2 Pixel nach oben verschoben ist.

ist  $500 \times 500$  Pixel groß. Bei der Auswertefenstergröße  $A_1$  mit  $W_{\text{eval}} = 20$  Pixel entspricht dies 625 Auswertefenstern. Die verschiedenen Mittelungsansätze werden anhand der effektiven Auswertefläche verglichen, d. h. der Gesamtfläche, die entweder in einem Bildpaar (räumlicher Mittelwert) oder über mehrere Bildpaare (zeitlicher und Ensemblemittelwert) ausgewertet wird. Die effektive Auswertefläche geteilt durch  $A_1$  wird auf der Abszisse als  $n$  dargestellt. Für den zeitlichen und den Ensemblemittelwert ändert sich die Größe des Auswertefensters gegenüber  $A_1$  nicht und  $n$  entspricht der Anzahl der zu mittelnden Verformungsfelder. Beim räumlichen Mittelwert gibt der Wert der Abszisse das Verhältnis an, um das die Fläche des Auswertefensters vergrößert wird, d. h.  $A_n = n \cdot A_1$ . Der effektive Auswertebereich für die verschiedenen Mittelungsansätze ist in Abbildung 3.4 für das Beispiel von  $n = 3$  visualisiert.

Um den zeitlichen Mittelwert zu bestimmen, wurden 60 Bilder desselben Specklemusters vor und nach der Verformung aufgenommen. Der Mittelwert wird dann aus den resultierenden Verformungsfeldern berechnet. Bei dieser Methode bleibt zwar die ursprüngliche räumliche Auflösung erhalten, jedoch führt sie nicht zu einer wesentlichen Verringerung der Messunsicherheit. Für den räumlichen Mittelwert wird nur ein Specklemuster-Paar mehrfach ausgewertet, wobei der Bereich des Auswertefensters auf bis zu  $60 \cdot A_1$  vergrößert wird. Dadurch verschlechtert sich zwar die räumliche Auflösung, aber die Messunsicherheit wird erheblich reduziert. Die Verringerung der Messunsicherheit entspricht weitgehend der theoretischen Vorhersage, derzufolge die Messunsicherheit umgekehrt proportional zur Quadratwurzel aus der Anzahl der Messungen ist, wenn unkorrelierte Messungen gemittelt werden. Zur Berechnung des Ensemblemittelwerts wurden wiederum 60 Bilder aufgenommen, allerdings von 60 verschiedenen Specklemustern. Diese Muster wurden mit einem in  $6^\circ$ -Schritten rotierenden Glasdiffusor erzeugt. Der Ensemblemittelwert aus

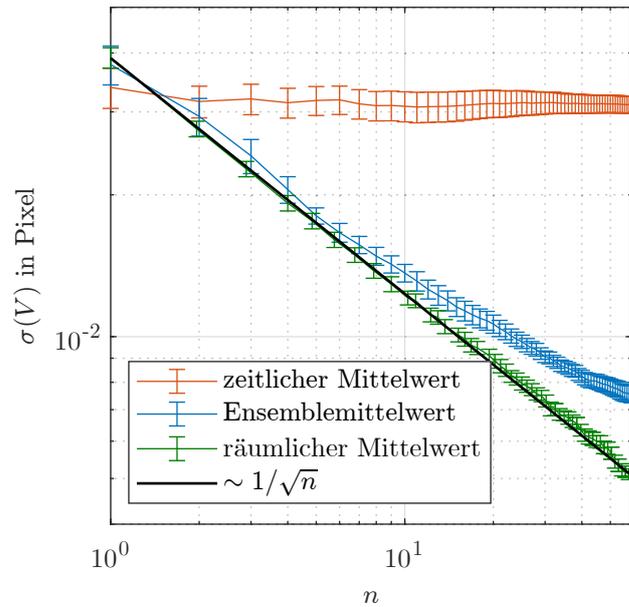


Abbildung 3.3: Vergleich der zeitlichen, räumlichen und Ensemblemittelung anhand der Standardabweichung  $\sigma(V)$  des Verformungsfeldes über  $n$ . Dabei ist  $n$  der effektive Auswertebereich geteilt durch die ursprüngliche Auswertefenstergröße  $A_1 = 20 \times 20$  Pixel. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwerts von 5 Messreihen. Man beachte die doppellogarithmische Achsenskalierung, in welcher die Quadratwurzelfunktion eine Gerade bildet.

60 Mustern hat eine deutlich geringere Messunsicherheit als die Einzelmessung oder der zeitliche Mittelwert, erreicht aber bei zunehmender effektiver Auswertefläche nicht das Ergebnis des räumlichen Mittelwerts. Die unterschiedlichen  $\sigma(V)$  Startwerte bei  $n = 1$  für den zeitlichen Mittelwert und den Ensemblemittelwert sind darauf zurückzuführen, dass sie aus unterschiedlichen Messreihen berechnet wurden. Daher sind die ersten Bilder in jeder Serie unterschiedlich und haben eine leicht unterschiedliche Standardabweichung.

Die minimale Messunsicherheit des Ensemblemittelwerts entspricht dem Wert des räumlichen Mittelwerts der Auswertefenster von  $29 \cdot A_1$ . Das bedeutet, dass mit dem Ensemblemittelwert von 60 Bildern bei gleicher räumlicher Auflösung die Messunsicherheit um den Faktor 5 reduziert werden kann. Um diese Verringerung durch räumliche Mittelung zu erreichen, muss die räumliche Auflösung um den Faktor  $\sqrt{29} = 5,4$  verringert werden. Die unterschiedliche Steigung der Kurve des Ensemblemittels deutet darauf hin, dass nicht alle erzeugten Specklemuster unkorreliert sind. Es ist zu beachten, dass der Ensemblemittelwert aus demselben Auswertefenster mit unterschiedlich modulierten Specklemustern, d. h. derselben Oberflächenregion, berechnet wird, während der räumliche Mittelwert über ein größeres Auswertefenster, d. h. verschiedene Oberflächenregionen, gebildet wird. Trotz der Beschränkung auf eine feste Oberflächenregion reduziert der Ensemblemittelwert die Messunsicherheit erheblich.

Das Verhalten der Messunsicherheit  $u(V)$  des Ensemble-gemittelten Verformungsfeldes in Abhängigkeit von der Anzahl der Specklemuster  $n$  ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Dafür werden mehrere Messreihen mit unterschiedlichen Winkelinkrementen des Diffusors zwischen den Einzelmessungen gezeigt. Bei jeder Messreihe wird der Diffusor insgesamt um  $360^\circ$  gedreht, so dass das Winkelinkrement die Anzahl der Specklemuster  $n$  bestimmt. Die Kurven der einzelnen Messreihen von  $u(V)$  über  $n$  für 10 Winkelinkremente zwischen  $36^\circ$  ( $n = 10$ ) und  $1^\circ$  ( $n = 360$ ) sind in Rot dargestellt, während die sich daraus resultierenden Messunsicherheiten (Endpunkte der roten Kurven) mit schwarzen Sternchen markiert und durch eine dünne schwarze Linie verbun-

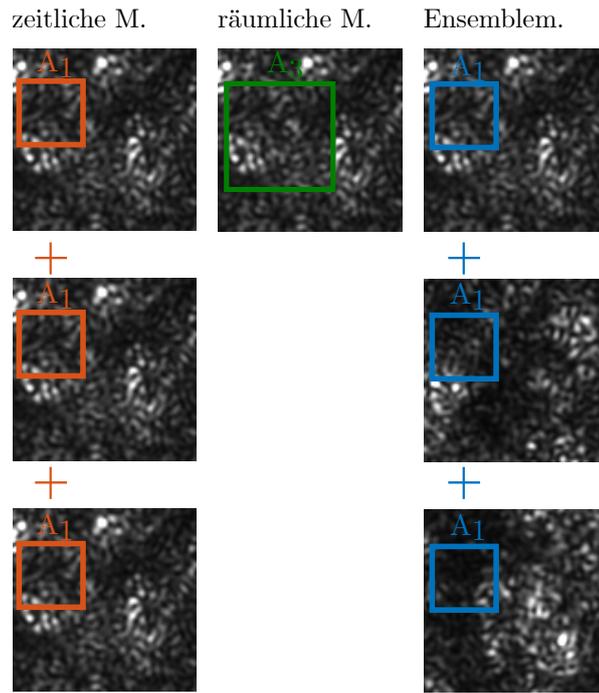


Abbildung 3.4: Visualisierung des effektiven Auswertebereichs des zeitlichen, räumlichen und Ensemblemittelwerts für  $n = 3$ . Zeitlicher Mittelwert: Auswertefenster  $A_1$  in 3 Bildern desselben Specklemusters. Räumlicher Mittelwert: Auswertefenster  $A_3 = 3 \cdot A_1$  in einem Specklemuster. Ensemblemittelwert: Auswertefenster  $A_1$  in 3 Bildern von 3 verschiedenen Specklemustern.

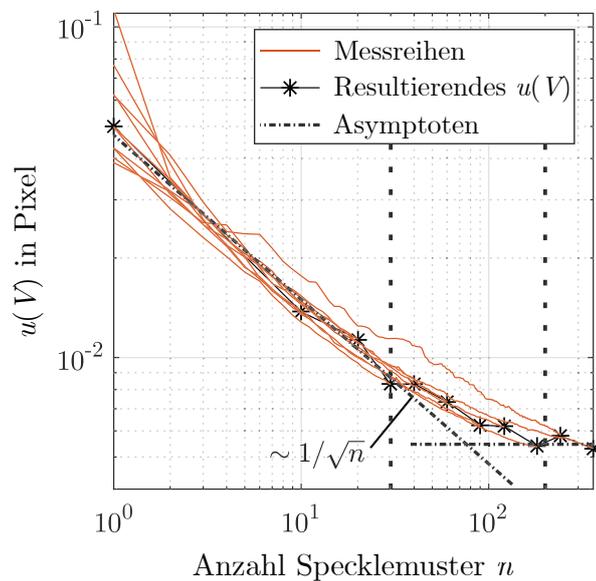


Abbildung 3.5: Messunsicherheit  $u(V)$  des über die Anzahl  $n$  der Specklemuster Ensemblegemittelten Verformungsfeldes. Die roten Linien zeigen mehrere Messreihen mit variierender Anzahl von Specklemustern.

den sind. Die Messung bestätigt den Trend aus Abbildung 3.3: Zunächst folgen die Kurven der  $1/\sqrt{n}$ -Proportionalität (geneigte, strichpunktierte schwarze Linie), dann nimmt die negative Steigung asymptotisch ab, bis die Messunsicherheit eine untere Grenze erreicht (horizontale, strichpunktierte schwarze Linie). Dieses Verhalten ist über alle Messreihen mit unterschiedlichen Winkelinkrementen hinweg konsistent.

Die Verringerung der Messunsicherheit in Abbildung 3.5 zeigt, dass dieser Messaufbau in der Lage ist, eine begrenzte Anzahl von unkorrelierten Specklemustern zu erzeugen. Die Anzahl der unkorrelierten Specklemuster liegt zwischen 10 und 100, da in diesem Intervall der Betrag der Steigung der Kurve abnimmt. Diese Anzahl limitiert die erreichbare untere Grenze der Messunsicherheit. Durch Verkleinerung des Winkelinkrements können mehr Specklemuster erzeugt werden, aber die Anzahl der unkorrelierten Muster wird durch die Eigenschaften des Diffusors bestimmt. Hier beträgt die Anzahl der unkorrelierten Specklemuster etwa 30. Abbildung 3.5 ist in drei Abschnitte unterteilt, die durch zwei gestrichelte, vertikale Linien gekennzeichnet sind: Im ersten Abschnitt von etwa 1–30 Specklemustern folgt die Kurve eindeutig der  $1/\sqrt{n}$ -Proportionalität. Dann, zwischen 30–200 Mustern, nimmt die negative Steigung ab, aber die Messunsicherheit wird immer noch kontinuierlich reduziert. Im dritten Abschnitt  $> 200$  Muster ist die untere Grenze der Messunsicherheit erreicht. Kleinere Winkelinkremente liefern keine neuen Informationen mehr für die Ensemblemittelung. Ab diesem Punkt ist die Kurve vergleichbar mit der zeitlichen Mittelung aus Abbildung 3.3.

Die mit Ensemblemittelung erreichbare Messunsicherheit hängt nicht nur von der Anzahl der Specklemuster, sondern auch von der räumlichen Auflösung bzw. der Auswertefenstergröße ab. Je kleiner der Auswertebereich ist, desto größer ist die Messunsicherheit bei der Verformung [Wan2009, Xu2017]. Abbildung 3.6 zeigt die Messunsicherheit in Abhängigkeit der räumlichen Auflösung einer Messreihe vor und nach der Ensemblemittelung von 180 Specklemustern. Zusätzlich eingezeichnet sind die Messanforderungen sowie die theoretische Untergrenze  $u(V)_{\min}$  der Messunsicherheit. Die Anforderungen für die Verformungsmessung bei der elektrohydraulischen Extrusion von Mikroproben sind eine Ortsauflösung im Bereich von  $20\ \mu\text{m}$  und eine Messunsicherheit von weniger als  $100\ \text{nm}$ . Um  $u(V)_{\min}$  zu berechnen, wird die Anzahl der Photonen  $N_{\text{ph}}$  aus der Anzahl der Pixel pro Auswertefenster, der mittleren Pixelintensität von 50, des 8 Bit-Maximums von 255, der Full-Well-Kapazität von 11000 Elektronen und der Quanteneffizienz des Kamerasensors von 0,56 abgeschätzt. Der Bereich zwischen den Messanforderungen und den jeweiligen Untergrenzen ist grau schattiert. Darüber hinaus wird die durchschnittliche Anzahl der Speckle pro Auswertefenster auf einer zweiten oberen Abszisse angezeigt. Die durchschnittliche Anzahl der Speckle wird berechnet, indem die Fläche des Auswertefensters  $W_{\text{eval}}^2$  durch die quadrierte Specklegröße  $s_{\text{sp}}^2$  aus Gleichung (2.6) geteilt wird. Die Ergebnisse in Abbildung 3.6 zeigen, wie die Ensemblemittelung die Messunsicherheit für verschiedene räumliche Auflösungen verringert. Mit Einzelmessungen (blau) lassen sich die Messanforderungen nicht erfüllen, aber durch Ensemblemittelung (rot) mehrerer verschiedener Specklemuster sind Messungen innerhalb des geforderten Bereichs (grau) möglich. Bei einer optischen Vergrößerung von 1,44 und einer Pixelgröße von  $3,45\ \mu\text{m}$  enthält ein Auswertefenster von  $6 \times 6$  Pixel im Durchschnitt etwa 5 Speckle und ergibt ein  $\Delta x = 6 \cdot 3,45\ \mu\text{m} / 1,44 = 14,4\ \mu\text{m}$  und eine Messunsicherheit  $u(V)$  von  $0,087\ \mu\text{m}$ . Auch das  $8 \times 8$  Pixel große Auswertefenster mit etwa 9 Speckle erfüllt die Messanforderungen und ergibt  $\Delta x = 19,2\ \mu\text{m}$  und  $u(V) = 0,038\ \mu\text{m}$ . Hier beträgt die Messunsicherheit ohne Ensemblemittelung  $0,71\ \mu\text{m}$ , was einer Verringerung von  $u(V)$  um mehr als eine Größenordnung entspricht. Bei größeren Auswertefenstern liegt die Verringerung etwas unter einer Größenordnung. Das  $40 \times 40$  Pixel große Auswertefenster ergibt  $\Delta x = 95,8\ \mu\text{m}$  und die Messunsicherheit wird von  $0,061\ \mu\text{m}$  auf  $0,008\ \mu\text{m}$  reduziert.

In den bislang gezeigten Ergebnissen wurde die Reduktion zufälliger Messabweichungen durch Ensemblemittelung demonstriert. Um zudem zu untersuchen, ob die Variation der Auswertefenstergröße zu systematischen Messabweichungen in der Verformungsmessung führt, wird die Mess-

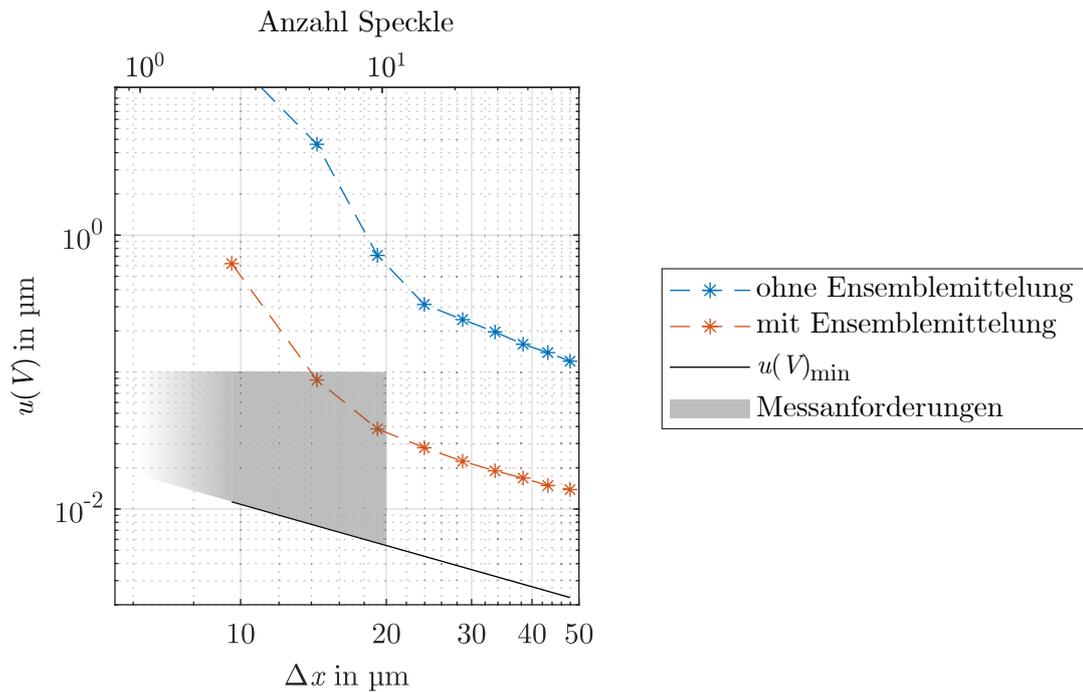


Abbildung 3.6: Unsicherheit  $u(V)$  der Verformungsmessung über die räumliche Auflösung  $\Delta x$  mit und ohne Ensemblemittelung. Die durchgezogene schwarze Linie zeigt  $u(V)_{\min}$  aus Gleichung (2.8). Die Messanforderungen für Verformungsfeldmessungen von Mikroproben, die durch elektrohydraulische Extrusion erzeugt werden, sind grau schattiert. Eine zweite, obere Abszisse zeigt die durchschnittliche Anzahl der Speckle pro Auswertefenster.

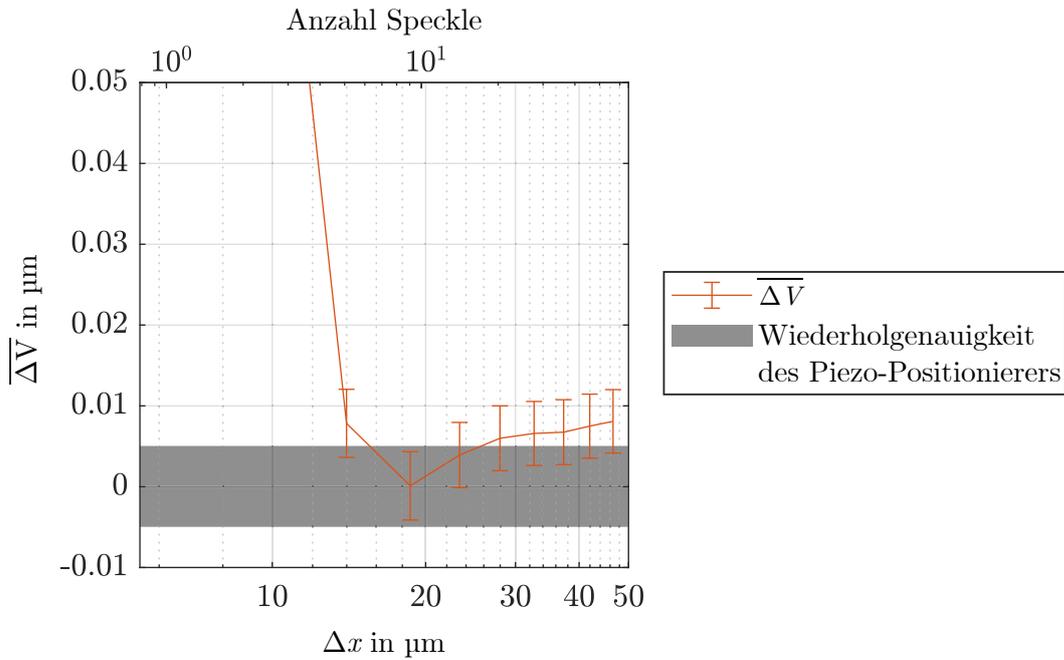


Abbildung 3.7:  $\overline{\Delta V}$  ist die mittlere Messabweichung des Verformungsfeldes  $V$ . Der Mittelwert von 10 Messreihen von  $\Delta V$  mit Fehlerbalken der doppelten Standardabweichung ( $k = 2$ ) des Mittelwerts ist über  $\Delta x$  aufgetragen. Die lineare Wiederholgenauigkeit des Piezo-Positionierers von  $\pm 5 \text{ nm}$  ist grau schattiert.

abweichung  $\Delta V$  der Verformungsmessung für verschiedene Auswertefenstergrößen analysiert. Die Messabweichung  $\Delta V$  wird durch Subtraktion des wahren Verformungswerts, der am Piezoaktor eingestellt ist, vom gemittelten Verformungsfeld berechnet.  $\overline{\Delta V}$  ist die mittlere Messabweichung des Verformungsfeldes. Abbildung 3.7 zeigt den Mittelwert von  $\overline{\Delta V}$  von 10 Messreihen, aufgetragen über die räumliche Auflösung. Die Fehlerbalken zeigen die doppelte Standardabweichung ( $k = 2$ ) des Mittelwerts von 10 Messreihen an. Die Ergebnisse zeigen, dass sehr kleine Auswertefenster zu signifikanten systematischen Messabweichungen führen. Ab einer Anzahl von mehr als 5 Speckle im Auswertefenster liegt das Konfidenzintervall der mittleren Messabweichung aber im Bereich der linearen Wiederholbarkeit des Piezoaktors (grau). Für räumliche Auflösungen von 14 nm–50 nm ergeben sich keine signifikanten systematischen Messabweichungen.

### Mikrospiegelaktor

In der zweiten Messaufbau-Variante wird ein Mikrospiegelaktor (engl. „digital micromirror device“ – DMD) genutzt, um Laserlicht auf verschiedene Bereiche eines stationären Glasdiffusors zu lenken. Dabei wird die Anzahl der generierten Specklemuster durch die nutzbare DMD-Fläche und die Anzahl der aktiven Mikrospiegel, d. h. der Querschnittsfläche des Laserstrahls, bestimmt. Die Position des aktiven Bereichs auf dem DMD wird für jede Einzelmessung variiert. Je nach Position des Sichtfelds der Kamera wird eine Maske verwendet, um den nutzbaren Bereich der aktiven Mikrospiegel zu begrenzen. Die Maske verhindert über- oder unterbelichtete Specklemuster, die zu einer hohen Messunsicherheit führen würden. Zusätzlich wird die Belichtungszeit der Kamera an die Anzahl der aktiven Mikrospiegel, d. h. an die Strahlungsintensität, angepasst.

Abbildung 3.8 zeigt die Ergebnisse aus mehreren Messreihen mit unterschiedlicher Anzahl von aktiven Mikrospiegeln. Jede Kurve zeigt den Mittelwert von 10 Messreihen. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten der Mikrospiegel beträgt  $10,8 \mu\text{m}$  und somit entspricht ein aktiver Bereich von  $100 \times 100$  einer Fläche von  $1,08 \text{ mm} \times 1,08 \text{ mm}$ . Da die Fläche der möglichen aktiven

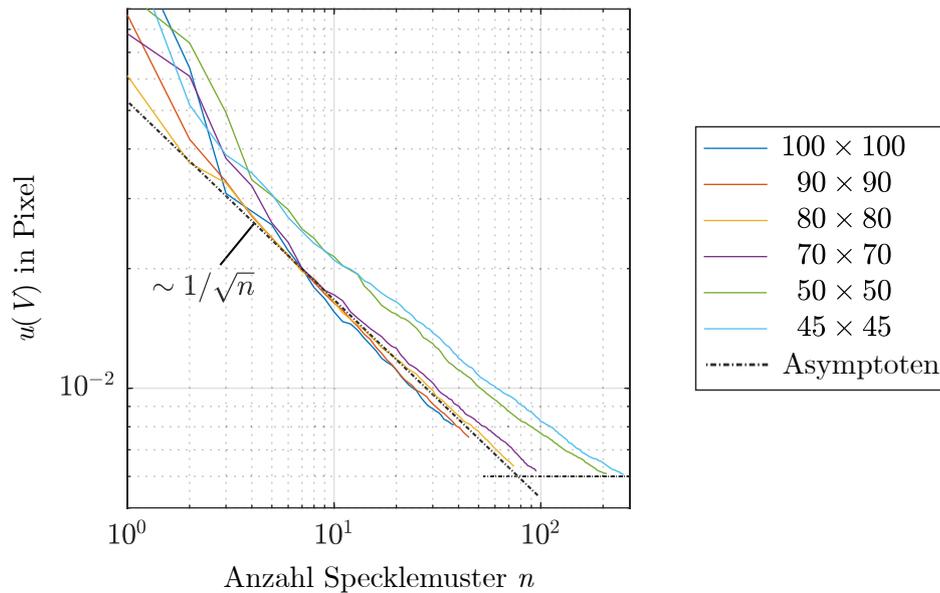


Abbildung 3.8: Messunsicherheit  $u(V)$  des über die Anzahl  $n$  der Specklemuster Ensemble-gemittelten Verformungsfeldes für unterschiedliche Anzahlen aktiver Mikrospiegel.

Positionen auf dem DMD begrenzt ist, bedeutet eine kleinere Anzahl aktiver Spiegel eine höhere Anzahl von Specklemustern. Die Messunsicherheit  $u(V)$  in Abhängigkeit von der Anzahl  $n$  der Specklemuster zeigt zunächst eine Proportionalität zu  $1/\sqrt{n}$  und für größere  $n$  ein asymptotisches Verhalten (horizontale, strichpunktierte schwarze Linie). Auch bei diesem Messaufbau zeigt sich eine Grenze, jenseits derer eine weitere Erhöhung der Anzahl der Specklemuster die Messunsicherheit nicht wesentlich verbessert. Die ersten drei Kurven ( $100^2$ ,  $90^2$ ,  $80^2$ ) haben alle annähernd die gleiche Steigung, die proportional zu  $1/\sqrt{n}$  ist, d. h. das theoretische Verhalten für die Mittelung unkorrelierter Einzelmessungen (strichpunktierte, geneigte schwarze Linie). Die Kurven mit kleinerer Anzahl an aktiven Mikrosiegeln haben zunehmend geringere absolute Steigungen, was darauf hindeutet, dass die generierten Specklemuster nicht unkorreliert sind. Für 95 Specklemuster ( $70 \times 70$  Mikrospiegel) bei einer räumlichen Auflösung von 20 Pixel, bzw.  $47 \mu\text{m}$ , verringert sich die Messunsicherheit von  $0,180 \mu\text{m}$  auf  $0,014 \mu\text{m}$  bzw. von  $0,080$  Pixel auf  $0,006$  Pixel. Für den verwendeten Messaufbau und das gewünschte Sichtfeld ist  $70 \times 70$  die optimale Anzahl aktiver Mikrospiegel.

In Abbildung 3.9 ist ein Vergleich der beiden Messaufbauten mit rotierendem Diffusor und mit DMD dargestellt. Die Ergebnisse der Messunsicherheit aus Abbildung 3.5 und 3.8 sind mit Fehlerbalken dargestellt, die die experimentelle Standardabweichung des Mittelwerts von  $u(V)$  über 5 Messreihen zeigen. Die Ergebnisse aus beiden Messaufbauten zeigen ein ähnliches Verhalten. Sowohl der lineare (in doppellogarithmischer Achsenskalierung) Bereich als auch die untere Messunsicherheitsgrenze für eine höhere Anzahl von Specklemustern liegen überwiegend innerhalb der jeweiligen Konfidenzintervalle. Somit liefern beide Messaufbauten ähnliche und konsistente Ergebnisse. Die Messfrequenz des DMD-Aufbaus ist jedoch dank der hohen Bildrate des DMD von  $17,9 \text{ kHz}$  um den Faktor 1000 schneller als die des rotierenden Diffusors. 100 Specklemuster lassen sich mit dem DMD in  $5,6 \text{ ms}$  generieren. Darüber hinaus ist die nahezu perfekte Reproduzierbarkeit der DMD-Muster der begrenzten Winkelwiederholbarkeit der Rotationshalterung überlegen. Während die Methode der Ensemblemittelung bei DSP das Erreichen der Messanforderungen an Messunsicherheit und räumliche Auflösung ermöglicht, siehe Abbildung 3.6, lässt sich durch die schnelle adaptive Optik des DMD zudem auch die geforderte zeitliche Auflösung erreichen.

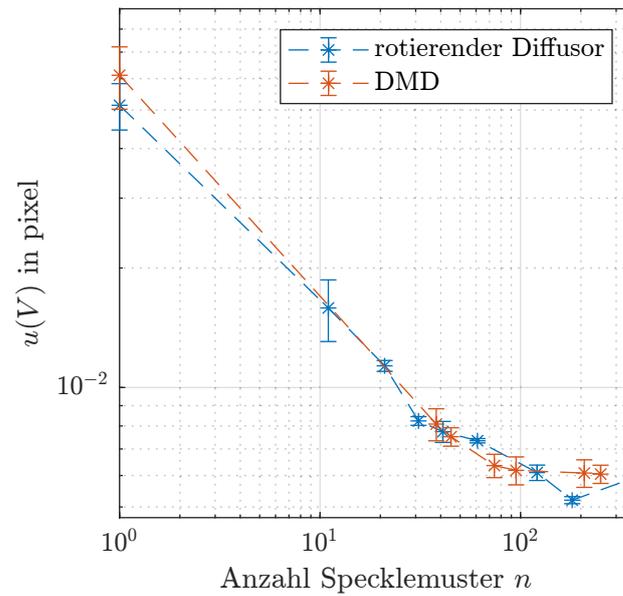


Abbildung 3.9: Vergleich der resultierenden Messunsicherheit  $u(V)$  der Versuchsaufbauten mit rotierendem Diffusor und mit DMD, bei Ensemblemittelung über eine zunehmende Anzahl von Specklemustern  $n$ . Die Fehlerbalken zeigen die experimentelle Standardabweichung des Mittelwerts von 5 Messreihen.

## 3.2 Korrektur systematischer Messabweichungen bei Verformungsgradienten

In diesem Abschnitt werden Messabweichungen untersucht, welche bei der DSP unter Einfluss von Verformungsgradienten auftreten. Dafür wird in Abschnitt 3.2.1 zunächst ein Simulationsansatz für die Messkette der DSP vorgestellt. Dabei werden auf Basis von simulierten und verformten Oberflächentopographien Specklemuster generiert und mittels Bildkorrelation ausgewertet. Mit diesem Simulationsansatz werden anschließend simulative Studien durchgeführt, um in Abschnitt 3.2.2 die unter Einfluss von Verformungsgradienten auftretenden zufälligen Messabweichungen sowie in Abschnitt 3.2.3 die systematischen Messabweichungen zu untersuchen. Aus den Simulationsergebnissen werden die Messabweichungen in Abhängigkeit von Verformungsgradienten erster und zweiter Ordnung abgeleitet. Diese Erkenntnisse werden abschließend in Abschnitt 3.2.4 eingesetzt, um in prozessnahen DSP-Messungen zufällige Messabweichungen aufgrund von Verformungsgradienten zu quantifizieren und systematische Messabweichungen zu korrigieren.

### 3.2.1 Simulationsansatz

Um die Auswirkungen von Verformungsgradienten auf DSP statistisch zu untersuchen und die daraus resultierenden Messabweichungen zu quantifizieren, werden das Messobjekt und das Messsystem in MATLAB simuliert. Der Simulationsansatz ist schematisch in Abbildung 3.10 dargestellt. Das Messobjekt ist eine isotrope, gaußsche Oberfläche mit der Rauheit  $S_q = 0,07 \mu\text{m}$  und einer lateralen Autokorrelationslänge  $S_{al} = 20 \mu\text{m}$ . Die Oberflächentopographie wird, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, nach der Methode des gleitenden Mittelwerts simuliert [Fun1985]. Um Subpixel-Verformungen genauer darzustellen und Alias-Effekte zu vermeiden, wird die Oberfläche mit einer 30-mal höheren Auflösung als das endgültige Specklemuster simuliert. Der Skalierungsfaktor von 30 erwies sich als ausreichend hoch, so dass konstante Subpixel-Verschiebungen ohne signifikante systematische Messabweichungen ausgewertet werden konnten. In diesem Fall wird für ein Specklemuster von  $256 \times 256$  Pixel mit einer Pixelgröße von  $3,45 \mu\text{m}$  eine Oberflächentopographie von  $7680 \times 7680$  Pixel mit einer Pixelgröße von  $0,115 \mu\text{m}$  simuliert. Anschließend wird mit der Funktion `imwarp()` ein Verformungsfeld auf die Oberfläche angewendet.

Um die Simulation durchzuführen, muss die Größe der Oberflächenmatrix gleich der Größe der Matrix des Specklemusters sein. Daher werden die ursprüngliche und die deformierte Oberfläche durch bikubische Interpolation um den Faktor 30 herunterskaliert. Der Einfluss der bikubischen

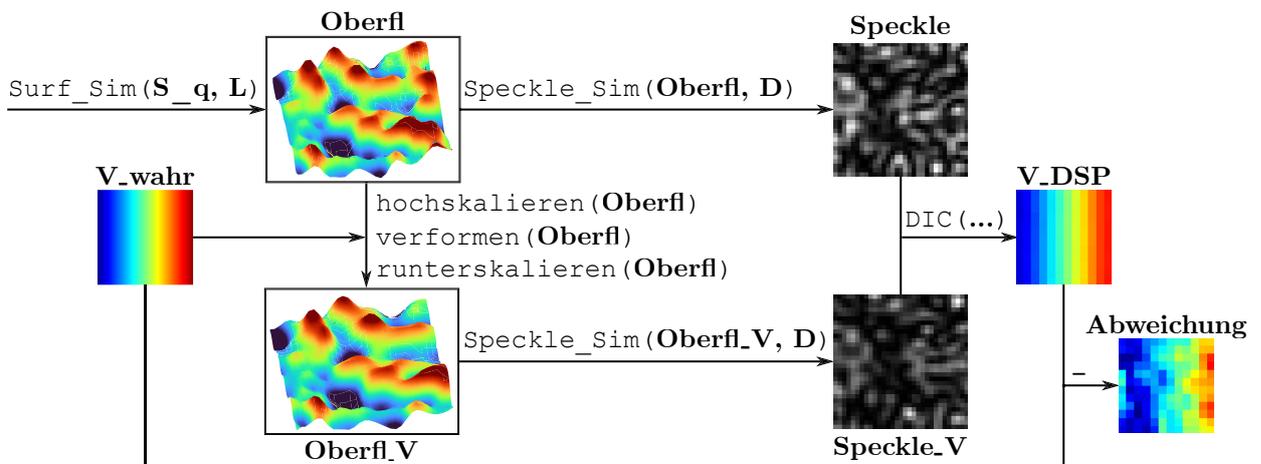


Abbildung 3.10: Simulationsansatz für DSP unter Einfluss von Verformungsgradienten.

Interpolation wurde gesondert untersucht, indem die verformten Oberflächentopographien mit und ohne Interpolation mittels DIC ausgewertet wurden. Dadurch wurde festgestellt, dass der Einfluss der Interpolation vernachlässigbar ist. Die Specklemuster für beide Oberflächentopographien werden dann, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, nach einem Verfahren von Goodman simuliert, siehe Anhang G2 aus [Goo2007]. Die Apertur  $D$  des optischen Systems ist so eingestellt, dass eine Specklegröße von 3 Pixel erreicht wird, d. h.  $10,35 \mu\text{m}$  für die Pixelgröße von  $3,45 \mu\text{m}$ . Ein Augmented-Lagrangian-Bildkorrelationsalgorithmus [Yan2019], der den Ansatz der kleinsten Quadrate aus Gleichung (2.7) verwendet, wird zur Berechnung der resultierenden Verformungsfelder eingesetzt. Dieser Algorithmus kombiniert die Geschwindigkeit der lokalen DIC und die kinematische Kompatibilität der globalen DIC. Während die lokale DIC eine schnellere Berechnung ermöglicht, können die Ergebnisse verrauscht sein und zu diskontinuierlichen Dehnungsfeldern führen. Der Augmented-Lagrangian-Bildkorrelationsalgorithmus verwendet lokale Auswertefenster mit der zusätzlichen globalen Einschränkung eines kontinuierlichen Verformungsgradienten erster Ordnung. Schließlich wird das DSP-Ergebnis ( $V_{\text{DSP}}$ ) mit dem wahren Wert ( $V_{\text{wahr}}$ ) verglichen. Die wahren Werte des Verformungsfeldes variieren nur entlang der Abszisse. Daher wird zur Berechnung der Messabweichungen der Mittelwert entlang der Ordinatenachse berechnet. Die Abweichungen des Mittelwerts vom jeweiligen wahren Wert ergeben die systematischen Messabweichungen, während die Standardabweichung des Mittelwerts entlang der Ordinate die zufälligen Messabweichungen ergeben.

### 3.2.2 Zufällige Messabweichungen

Mittels des in Abbildung 3.10 gezeigten Simulationsansatzes werden zunächst die durch Verformungsgradienten verursachten zufälligen Messabweichungen untersucht. Dafür wird ein Verformungsfeld gewählt, das die Untersuchung der Auswirkungen von Verformungsgradienten erster und zweiter Ordnung ermöglicht. Gradienten höherer Ordnungen werden nicht berücksichtigt, da sie in experimentellen Untersuchungen vernachlässigbar klein sind, siehe Abschnitt 3.2.4. Das Verformungsfeld setzt sich aus den folgenden vier Bereichen entlang der  $x$ -Achse zusammen:

- (I) Eine konstante Verschiebung um 1 Pixel
- (II) Ein konstanter positiver Verformungsgradient zweiter Ordnung
- (III) Ein konstanter negativer Gradient zweiter Ordnung, dessen absoluter Wert gleich dem des Bereichs (II) ist
- (IV) Eine konstante Verschiebung von  $V_{\text{max}}$

Die vier Bereiche und der resultierende Gradient erster Ordnung in  $x$ -Richtung sind in Abbildung 3.11 (a) dargestellt. Neben dem Parameter  $V_{\text{max}}$  wird die Länge des Intervalls  $x_{\text{int}}$  der Bereiche (II) und (III) variiert, um den Verformungsgradienten anzupassen. Für das in Abbildung 3.11 gezeigte Beispiel gilt  $V_{\text{max}} = 6$  Pixel und  $x_{\text{int}} = 100$  Pixel. Entlang der  $y$ -Achse ist der wahre Wert des Verformungsfeldes immer konstant.

Abbildung 3.11 (b) zeigt einen Ausschnitt des Verformungsfeldes, das auf der Grundlage der verformten Oberfläche und der simulierten Specklemuster mit dem DSP-Algorithmus gemessen wird (entspricht  $V_{\text{DSP}}$  in Abbildung 3.10). Die Auswertefenstergröße der Bildkorrelation beträgt  $20 \times 20$  Pixel und die Schrittweite 1 Pixel, d. h., das Auswertefenster wird in 1-Pixel-Schritten über das Specklemuster bewegt, was zu lokalen Verformungswerten  $V_x(x, y)$  und  $V_y(x, y)$  an jedem Pixel (außer am Bildrand) des ursprünglichen Specklemusters führt. Aufgrund von zufälligen Messabweichungen variiert die lokale Verformung  $V_x$  sichtbar entlang der  $y$ -Achse. Die Specklemuster und die daraus berechneten Verformungsfelder sind  $256 \times 256$  Pixel groß. Um eine

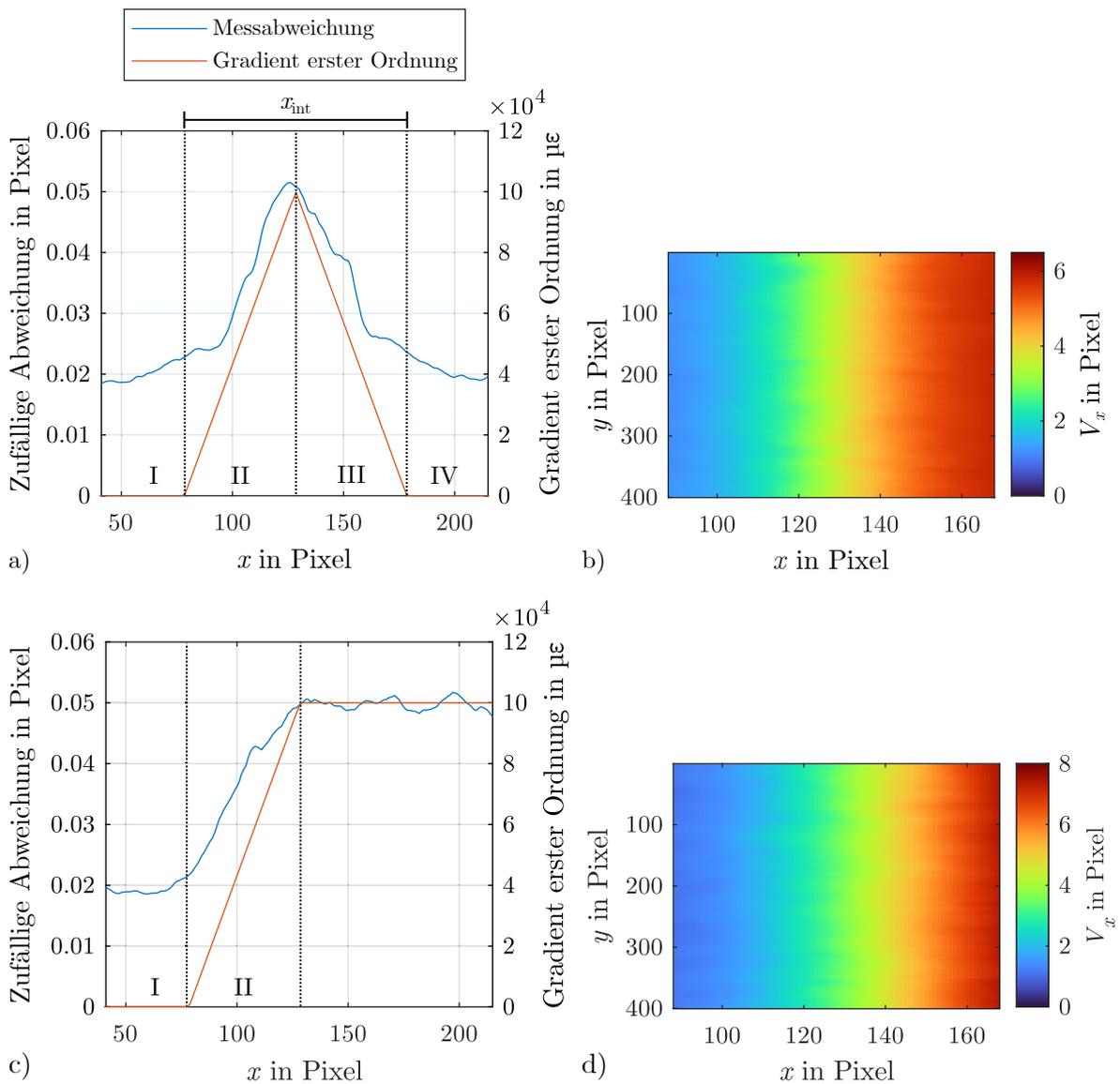


Abbildung 3.11: (a) Wahrer Wert des Verformungsgradienten erster Ordnung in  $x$ -Richtung (rot) und zufällige Messabweichung von  $V_x$  (blau), d. h. die Standardabweichung von  $V_x$  in  $y$ -Richtung. Gepunktete, vertikale Linien unterteilen die vier mit römischen Ziffern benannten Bereiche des Verformungsfeldes. Die Bereiche (I) und (IV) weisen eine konstante Verschiebung auf, während die Bereiche (II) und (III) einen konstanten Gradienten zweiter Ordnung haben. Die Auswertefenstergröße beträgt  $20 \times 20$  Pixel. (b) Ergebnis der DSP-Auswertung  $V_x$ . (c) Zufällige Messabweichung und Gradient erster Ordnung eines alternativen Verformungsfeldes, bei dem die Bereiche (I) und (II) mit (a) übereinstimmen und danach ein konstanter Gradient erster Ordnung von  $10 \times 10^4 \mu\epsilon$  folgt. (d)  $V_x$  des alternativen Verformungsfeldes.

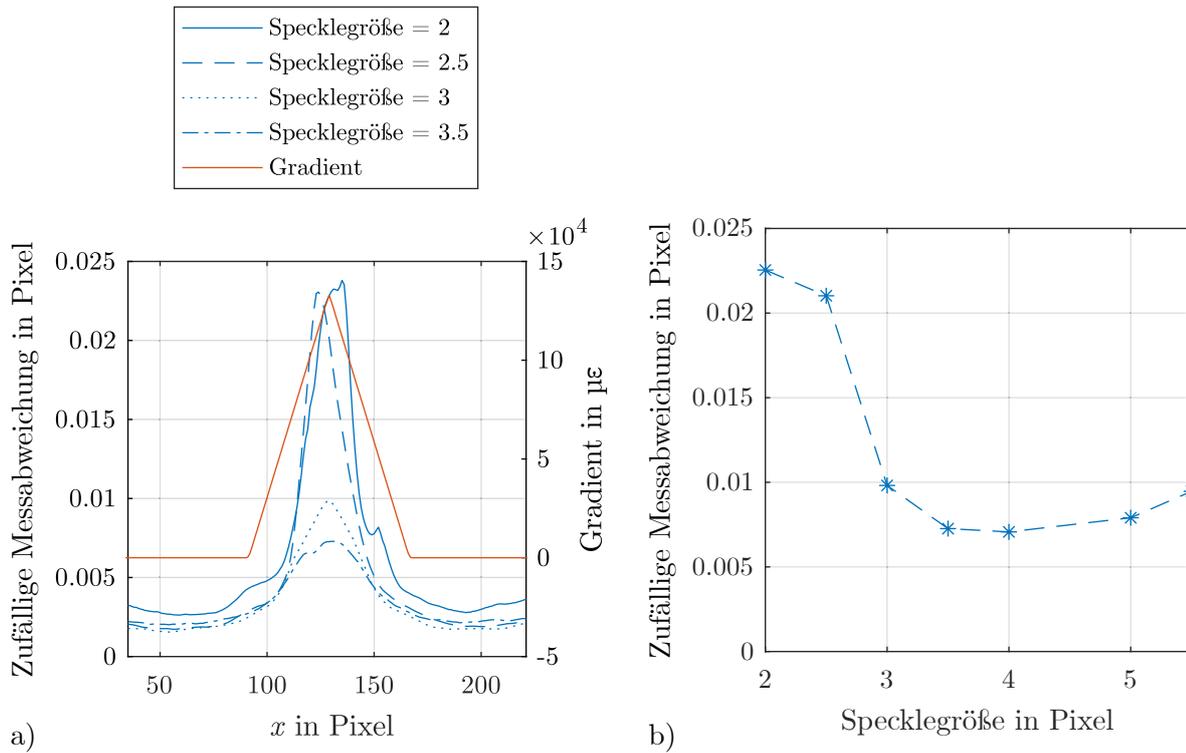


Abbildung 3.12: Zufällige Messabweichung bei unterschiedlichen Specklegrößen. (a) Zeigt die zufällige Messabweichung und den Gradienten erster Ordnung in Abhängigkeit von  $x$ . (b) Zeigt die Maximalwerte der zufälligen Messabweichung in Abhängigkeit der Specklegröße.

ausreichend große Stichprobe zu erhalten, werden für jeden Verformungsparametersatz 50 einzigartige Oberflächentopographien und Specklemuster simuliert. Die zufällige Messabweichung wird durch die Standardabweichung entlang der  $y$ -Achse über alle Stichproben hinweg berechnet. In Abbildung 3.11 (a) ist die aus dem Verformungsfeld  $V_x$  von Abbildung 3.11 (b) berechnete zufällige Messabweichung in Blau zusammen mit dem wahren Wert des Verformungsgradienten erster Ordnung in Rot dargestellt. Der Gradient ist in  $\mu\epsilon$  skaliert, d. h. in Verformungen  $V_x$  von  $10^{-6}$  Pixel bezogen auf eine Länge von 1 Pixel in  $x$ -Richtung. In den Bereichen (I) und (IV) mit konstanten Verformungswerten ist die zufällige Messabweichung in  $x$ -Richtung mit etwa 0,02 Pixel nahezu konstant. Man beachte, dass sich die zufällige Messabweichung nicht nennenswert in Abhängigkeit des absoluten Verformungswerts ändert, der in Bereich (I) 1 Pixel und in Bereich (IV) 6 Pixel beträgt. In beiden Bereichen hängt die zufällige Messabweichung hauptsächlich von der Größe der Auswertefenster ab, da größere Auswertefenster die zufällige Messabweichung reduzieren. Außerdem zeigt die Auswertung eines alternativen Verformungsfeldes in Abbildung 3.11 (c), dass ein von null verschiedener, konstanter Gradient erster Ordnung auch in konstanten zufälligen Messabweichungen resultiert. Dieses Verhalten demonstriert, dass die zufälligen Messabweichungen vornehmlich durch den Gradienten erster Ordnung und nicht durch Gradienten höherer Ordnungen ausgelöst werden. Da in der Simulation Kamerarauschen, Schrotrauschen und andere externe Faktoren nicht berücksichtigt werden, ist die beobachtete zufällige Messabweichung auf die DIC-Auswertung und die Dekorrelation der Laserspecklemuster zurückzuführen.

Die Specklegröße beträgt 3 Pixel, was im optimalen Bereich von 2–5 Pixel liegt, der allgemein für DSP [Zho2001] angegeben wird. In Abbildung 3.12 wird gezeigt, wie die zufälligen Messabweichungen von der Specklegröße abhängen. Dabei sind die Simulationsparameter: Fenstergröße  $14 \times 14$  Pixel,  $x_{\text{int}} = 75$  Pixel und  $V_{\text{max}} = 5$  Pixel. Die Simulation bestätigt, dass die zufälligen

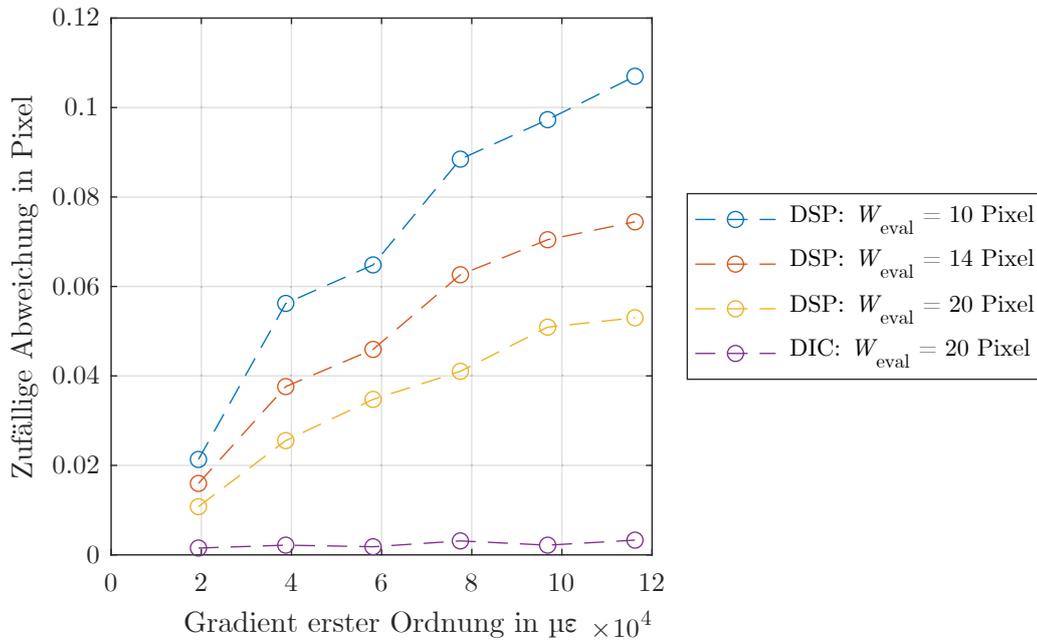


Abbildung 3.13: Zufällige Messabweichung über den Gradienten zweiter Ordnung für verschiedene Auswertefensterbreiten  $W_{eval}$ . Im Falle der DSP werden simulierte Laserspecklemuster ausgewertet und bei DIC die verformte Oberflächentopographie.

Messabweichungen für Specklegrößen von 3 bis 5,5 Pixel minimal sind.

Die Beziehung zwischen dem Verformungsgradienten und der zufälligen Messabweichung wird in Abbildung 3.13 weiter untersucht. Dafür wird die maximale zufällige Messabweichung, die in der Nähe des Punkts mit dem höchsten Verformungsgradienten auftritt, über dem Gradienten erster Ordnung aufgetragen. Die Auswertefensterbreite  $W_{eval}$  wird zwischen 10 und 20 Pixel variiert. Zusätzlich zu den DSP-Ergebnissen wird die zufällige Messabweichung einer DIC-Auswertung der Oberflächenverformung gezeigt. Für die DIC-Methode entfällt die Simulation der Specklemuster (`Speckle_Sim()` in Abbildung 3.10) und die Bildkorrelation wird direkt auf die verformte Oberflächentopographie angewendet. Die DSP-Ergebnisse zeigen eine Korrelation zwischen der zufälligen Messabweichung und dem Verformungsgradienten einerseits und der zufälligen Messabweichung und der Auswertefenstergröße andererseits. Für DIC und DSP wird derselbe Bildkorrelationsalgorithmus verwendet. Somit zeigt der Vergleich von DSP und DIC, dass die beobachteten DSP-Messabweichungen in der Tat überwiegend auf die Eigenschaften der Laserspecklemuster und nicht auf die DIC-Auswertung zurückzuführen sind. Die DIC-Ergebnisse zeigen auch einen kleinen linearen Anstieg der zufälligen Messabweichung von  $1,5 \times 10^{-3}$  Pixel auf  $3 \times 10^{-3}$  Pixel. Unter Einfluss von Verformungsgradienten sind diese Messabweichungen jedoch vernachlässigbar im Vergleich zu der zufälligen Messabweichung der DSP. Es ist zu beachten, dass die direkte Auswertung der Oberflächentopographie mit dem DIC-Algorithmus keineswegs ein realistischer Anwendungsfall ist. Dieser Vergleich wurde nur gewählt, um zu demonstrieren, dass die zufälligen Messabweichungen unter Einfluss von Verformungsgradienten nicht auf den DIC-Algorithmus, sondern auf das Laserspecklemuster zurückzuführen sind. Wie in den Abschnitten 2.1 und 2.2.2 beschrieben, verformen sich Laserspeckle nicht auf die gleiche Weise wie die zugrunde liegende Oberflächentopographie, so dass es zu einer Dekorrelation der Specklemuster vor und nach Verformung kommt. Diese Dekorrelation zwischen dem ursprünglichen und dem neuen Laserspecklemuster ist die Ursache für die zunehmende zufällige Messabweichung der DSP-Ergebnisse in Abbildung 3.13 und die Diskrepanz zwischen den DSP- und DIC-Ergebnissen.

### 3.2.3 Systematische Messabweichungen

Um die systematische Messabweichung zu berechnen, muss zunächst die zufällige Messabweichung des Verformungsfeldes durch Mittelwertbildung über eine große Stichprobe minimiert werden. Dafür werden mehrere Oberflächentopographien und Specklemuster gemäß dem Modell in Abbildung 3.10 simuliert. Abbildung 3.14 (a) zeigt das arithmetische Mittel  $\bar{V}_x(x)$  in  $y$ -Richtung im Vergleich zum wahren Wert der Verformung und einem gleitenden Mittelwert des wahren Werts über ein Intervall von 20 Pixeln in  $x$ -Richtung. Die Auswertefensterbreite  $W_{\text{eval}}$  der Bildkorrelation beträgt ebenfalls 20 Pixel. Die Differenz zwischen der mittleren Verformung  $\bar{V}_x$  und dem wahren Wert ergibt die systematische Messabweichung der DSP-Auswertung. In Abbildung 3.14 (a) ist die systematische Messabweichung qualitativ als die Abweichung der roten und blauen Punkte von der grünen Linie, die den wahren Wert darstellt, zu erkennen. Sowohl beim gleitenden Mittelwert, als auch bei der DSP-Auswertung treten systematische Abweichungen auf. Der mathematische Grund für die Abweichung des gleitenden Mittelwerts vom wahren Wert ist, dass bei einem nichtlinearen Verlauf der Verformung  $V_x(x)$  der Mittelwert eines Intervalls nicht gleich dem Wert in der Mitte des Intervalls ist. Die systematischen Messabweichungen der DSP-Auswertung sind jedoch noch höher als die des gleitenden Mittelwerts und können daher nicht allein durch die räumliche Mittelung über das Auswertefenster erklärt werden.

In Abbildung 3.14 (b) ist die systematische Messabweichung und der Gradient zweiter Ordnung über  $x$  aufgetragen. Der Gradient zweiter Ordnung ist in den Bereichen (I) und (IV) gleich null (siehe Abbildung 3.11 (a) für eine visuelle Darstellung dieser Bereiche) und hat in den Bereichen (II) und (III) den gleichen konstanten, positiven bzw. negativen Wert. In Abbildung 3.14 (b) ist der mit MATLAB numerisch berechnete Gradient dargestellt, weshalb an den Unstetigkeiten zwischen den Bereichen Abweichungen von dem theoretischen Verlauf auftreten. Der Verlauf der systematischen Messabweichung ist analog zu dem des Gradienten zweiter Ordnung. Unter Ein-

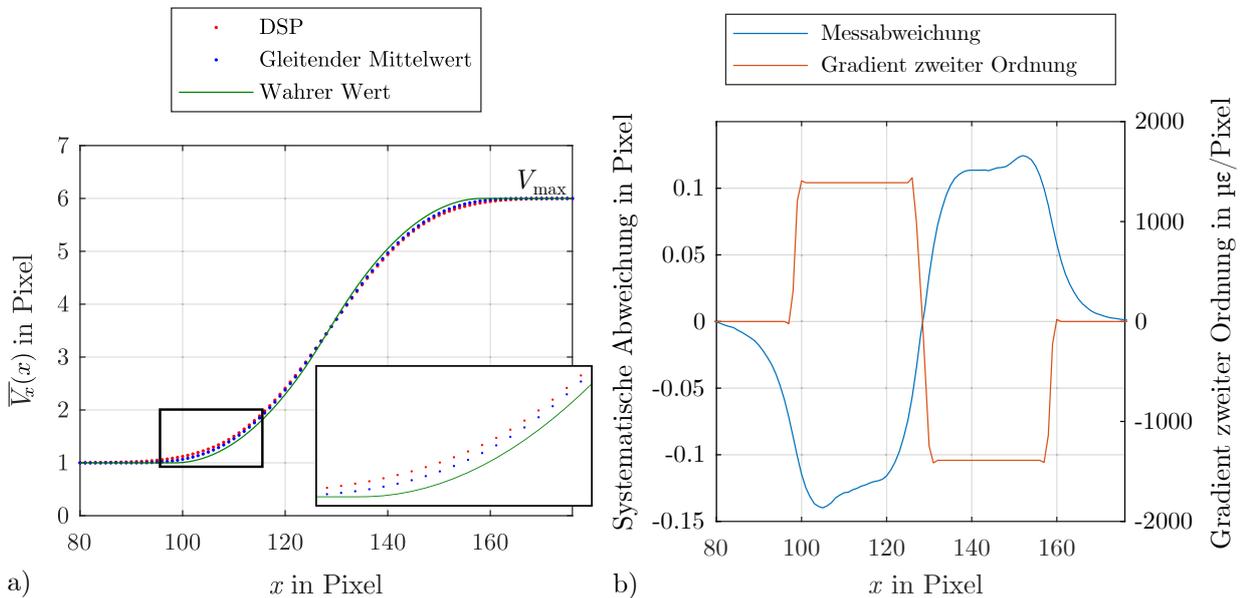


Abbildung 3.14: (a) Arithmetisches Mittel  $\bar{V}_x(x)$  in  $y$ -Richtung des Verformungsfeldes im Vergleich zum wahren Wert der Verformung und einem gleitenden Mittelwert des wahren Werts über ein Intervall von 20 Pixeln in  $x$ -Richtung. Die Auswertefensterbreite  $W_{\text{eval}}$  der Bildkorrelation beträgt 20 Pixel. (b) Systematische Messabweichung und Gradient zweiter Ordnung des Verformungsfeldes. Die systematische Messabweichung ist die Differenz des Mittelwerts  $\bar{V}_x$  von dem wahren Wert.

fluss des Gradienten steigt die systematische Messabweichung sprunghaft an und bleibt bei konstantem Gradienten verhältnismäßig konstant. Die symmetrischen Extremwerte am Anfang von Bereich (II) und am Ende von Bereich (III) deuten auf eine Empfindlichkeit der systematischen Messabweichung gegenüber der Änderung des Gradienten zweiter Ordnung, d. h. gegenüber dem Gradienten dritter Ordnung hin. Der geglättete Verlauf der systematischen Messabweichungen im Vergleich zum diskontinuierlichen Verlauf des Gradienten kann zum einen durch die räumliche Mittelung der Auswertefenster und zum anderen durch den globalen Auswerteansatz des Bildkorrelationsalgorithmus erklärt werden, der in Abschnitt 2.2.1 vorgestellt wurde. Ziel der globalen Auswertung ist es, ein kontinuierliches Verformungsfeld zu finden, das mit den für die Auswertefenster berechneten lokalen Verformungswerten möglichst gut übereinstimmt. Dieser Ansatz führt im Allgemeinen zu einem robusten Ergebnis und ermöglicht eine bessere Berechnung von Dehnungsfeldern. Die damit verbundene räumliche Tiefpassfilterung erhöht jedoch auch das Auftreten von systematischen Messabweichungen bei Vorliegen von Verformungsgradienten höherer Ordnung.

Eine Variation der Specklegröße zeigt in Abbildung 3.15, wie die systematischen Messabweichungen von der Specklegröße abhängen. Ähnlich wie die zufälligen Messabweichungen, siehe Abbildung 3.15, sind auch die systematischen Messabweichungen für Specklegrößen von 3 bis 5 Pixel am Geringsten.

Die Abhängigkeit der systematischen Messabweichung vom Gradienten zweiter Ordnung und der Auswertefensterbreite  $W_{\text{eval}}$  ist in Abbildung 3.16 dargestellt. Hier gezeigt ist ein Mittelwert der absoluten systematischen Messabweichung in den Bereichen (II) und (III), siehe Abbildung 3.11 (a). Die durchgezogenen Linien sind eine lineare Regression durch die Datenpunkte und die Fehlerbalken stellen die jeweilige zufällige Messabweichung dar. Im betrachteten Intervall ist die systematische Messabweichung linear vom Gradienten zweiter Ordnung abhängig, was mit den in Abschnitt 1.2.1 diskutierten Ergebnissen von Xu [Xu2017] bezüglich DIC mit Weißlichtspeckle übereinstimmt. Die systematische Messabweichung des DSP-Ergebnisses ist etwa 15 % größer als die des DIC-Ergebnisses. Der relativ geringe Unterschied von 15 % deutet darauf hin, dass die systematische Messabweichung unter Einfluss von Verformungsgradienten höherer Ordnung überwiegend durch den DIC-Algorithmus und nur zu einem geringeren Anteil durch die Dekorrelation der Laserspecklemuster verursacht wird. Es ist zu beachten, dass die Abhängigkeit der

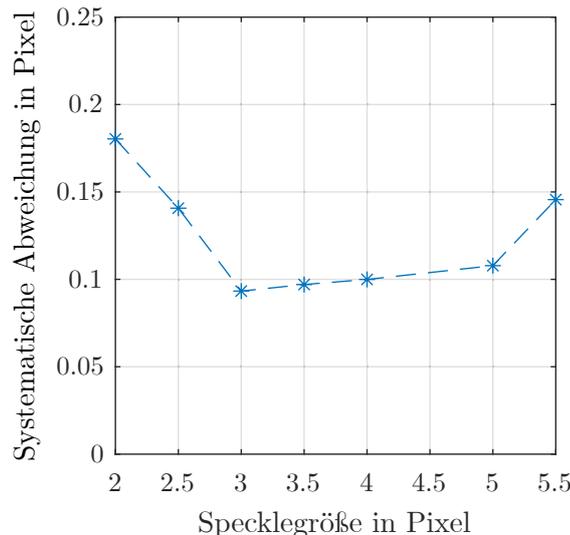


Abbildung 3.15: Systematische Messabweichung bei unterschiedlichen Specklegrößen. Gezeigt ist jeweils der maximale Absolutwert der systematischen Messabweichung.

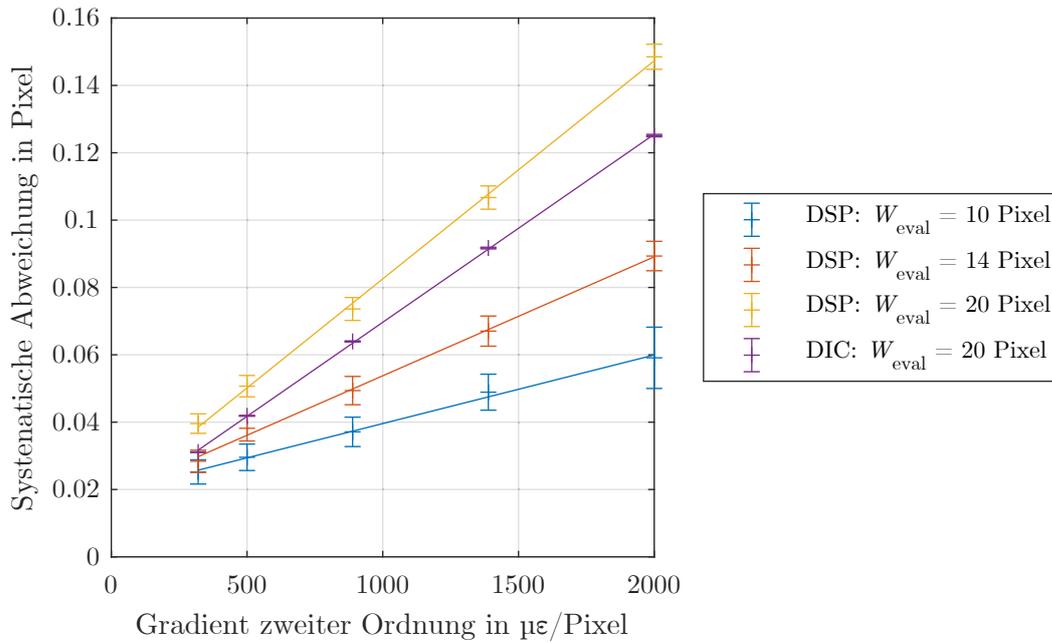


Abbildung 3.16: Systematische Messabweichung über den Gradienten zweiter Ordnung für verschiedene Auswertefensterbreiten  $W_{\text{eval}}$ . Die durchgezogenen Linien sind eine lineare Regression durch die Datenpunkte und die Fehlerbalken stellen die jeweilige zufällige Messabweichung dar. Im Falle der DSP werden simulierte Laserspecklemuster ausgewertet und bei DIC die verformte Oberflächentopographie.

systematischen Messabweichung von der Auswertefenstergröße umgekehrt ist wie die der zufälligen Messabweichung in Abbildung 3.13. Deshalb ergibt sich in Bezug auf die Auswertefenstergröße ein Optimierungsproblem, welches abhängig von den auftretenden Gradienten erster und zweiter Ordnung zu lösen ist. Außerdem unterscheidet sich die Charakteristik der DIC-Ergebnisse von der aus Abbildung 3.13. Während die zufällige Messabweichung der DIC-Auswertung vernachlässigbar ist, ist die systematische Messabweichung signifikant und folgt der gleichen Charakteristik wie die DSP-Messabweichung.

### 3.2.4 Anwendungsfälle

Nachdem die unter Einfluss von Verformungsgradienten auftretenden Messabweichungen in den vorigen Abschnitten simulativ untersucht wurden, werden in diesem Abschnitt experimentelle DSP-Messdaten ausgewertet. Prozessbegleitende Messungen aus dem Laserhärten [Tau2022], Schleifen [Tau2018a] und Einzahnfräsen [Tau2018b] werden auf Verformungsgradienten und daraus resultierende Messabweichungen untersucht. Für eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Messaufbauten wird auf die Originalpublikationen verwiesen.

Zunächst wird der Wärmebehandlungsprozess Laserhärten untersucht. Da die Zone des Wärmeintrags, d. h. der vom Laser beleuchtete Bereich, stark lokalisiert ist, treten an der Werkstückoberfläche hohe Temperaturgradienten auf. Abbildung 3.17 (a) zeigt das resultierende Verformungsfeld  $V_y$ , das mit DSP gemessen wurde, in (b) und (c) sind das Gradientenfeld erster Ordnung  $\nabla_x V_y$ , bzw. das Gradientenfeld zweiter Ordnung  $\Delta_x V_y$  dargestellt. Gezeigt sind jeweils die Gradienten in  $x$ -Richtung. Die Position des Lasers, der sich in negativer  $x$ -Richtung bewegt, ist durch die vertikale schwarze Linie gekennzeichnet. Aufgrund der Wärmeeinwirkung bildet sich dicht hinter dem Laser ein Bereich mit hohen lokalen Verformungen. Der Bereich mit

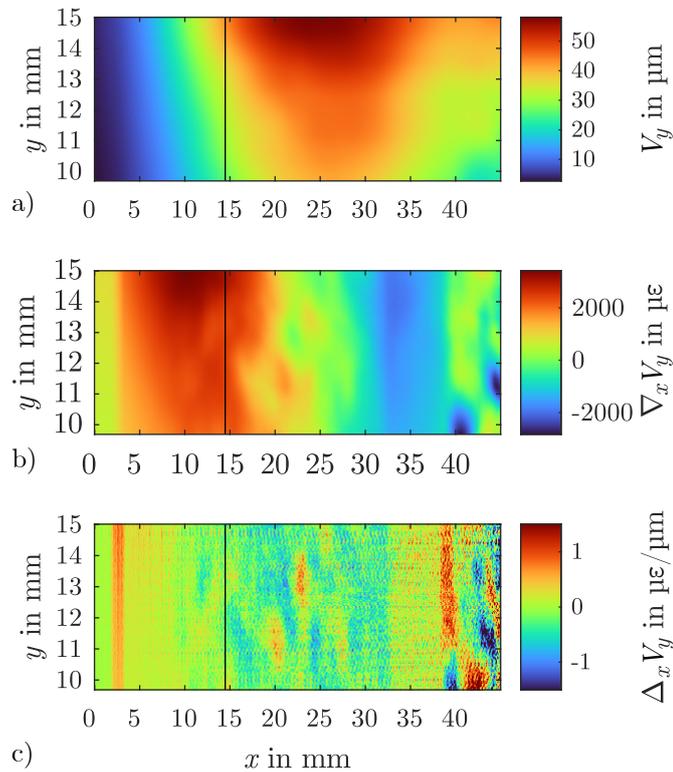


Abbildung 3.17: (a) Mit DSP gemessenes Verformungsfeld  $V_y$  während des Laserhärtungsprozesses. Die vertikale, schwarze Linie zeigt die Position des Lasers, der sich in negativer  $x$ -Richtung bewegt. (b) Gradient erster Ordnung  $\nabla_x V_y$  des Verformungsfeldes. (c) Gradient zweiter Ordnung  $\Delta_x V_y$  des Verformungsfeldes. Die Gradienten sind in  $x$ -Richtung ausgewertet.

dem höchsten Verformungsgradienten befindet sich unmittelbar vor dem Laser. Obwohl relativ hohe lokale Verformungen von fast  $60 \mu\text{m}$  auftreten, sind sie über eine große Fläche von vielen Quadratmillimetern verteilt. Daher sind die resultierenden Gradienten erster Ordnung eine Größenordnung niedriger als der Gradient in Abbildung 3.13 und die resultierenden Gradienten zweiter Ordnung zwei Größenordnungen niedriger als die untersuchten Werte in Abbildung 3.16. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Simulationsstudie legt nahe, dass zufällige und systematische Messabweichungen aufgrund von Verformungsgradienten bei der betrachteten DSP-Messung des Laserhärteprozesses vernachlässigbar sind.

Zweitens wird eine Messung aus dem Schleifprozess untersucht. Abbildung 3.18 (a) zeigt das mit DSP gemessene Verformungsfeld  $V_y$ . Der für die Untersuchung relevante Bereich liegt direkt unterhalb der Schleifscheibe während des Werkzeugeingriffs. Das gemessene Verformungsfeld reicht bis zu einem Abstand von etwa  $150 \mu\text{m}$  an die Schleifscheibe heran, da fliegende Funken und Späne die Auswertung direkt unterhalb der Schleifscheibe stören. Außerdem bildet sich am Rand der neu bearbeiteten Oberfläche ein Grat, der zu Out-of-plane-Verformungen und damit zu einer Dekorrelation der Specklemuster führt. Abbildung 3.18 (b) zeigt die lokale Verformung  $\tilde{V}_y$  und den Gradienten zweiter Ordnung in einem  $y$ -Intervall direkt unterhalb der Kontaktzone der Schleifscheibe. Das Intervall ist in Abbildung 3.18 (a) mit einer weißen, gepunkteten Linie gekennzeichnet. Die Verformung steigt zunächst abrupt auf etwa  $7 \mu\text{m}$  an und sinkt dann langsam auf etwa  $5 \mu\text{m}$ . Abgesehen von einem anfänglichen Extremwert bleibt der Gradient  $< \pm 3000 \mu\epsilon$  und der Gradient zweiter Ordnung ist im Bereich von  $\pm 25 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ . Auf Basis der in Abbildung 3.16 gezeigten Simulationsergebnisse lässt sich eine zufällige Messabweichung im Bereich

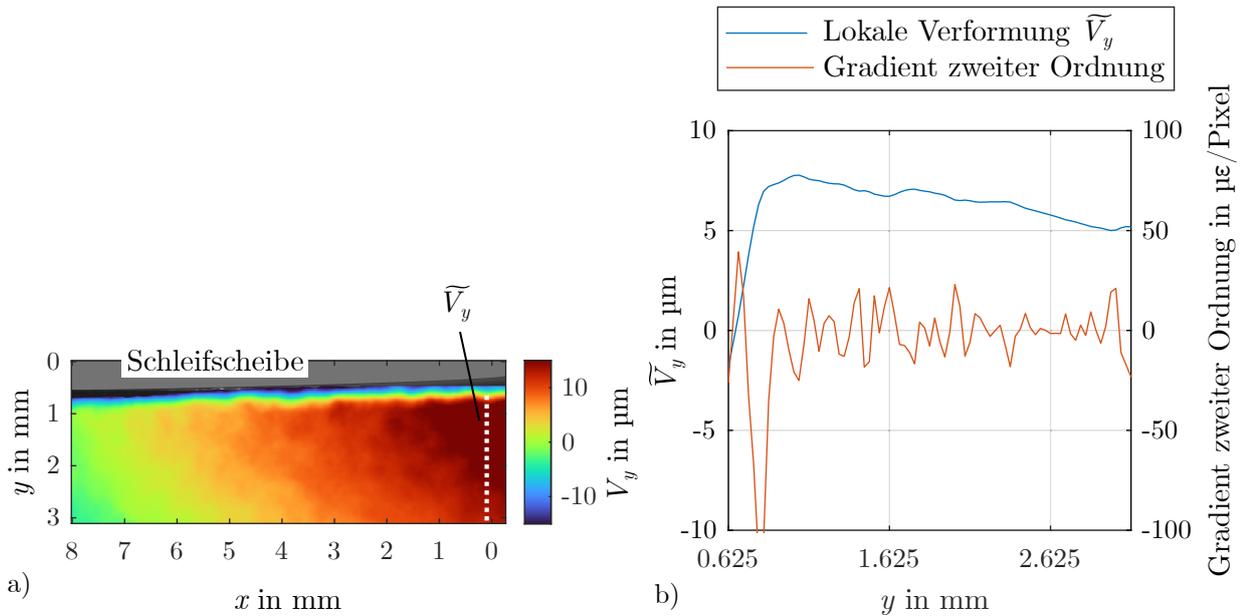


Abbildung 3.18: (a) Mit DSP während des Schleifprozesses gemessenes Verformungsfeld  $V_y$ . (b) Lokale Verformung  $\widetilde{V}_y$  und Gradient zweiter Ordnung in  $y$ -Richtung. Die Position des betrachteten  $y$ -Intervalls ist in (a) durch eine gepunktete, weiße Linie gekennzeichnet.

von  $\pm 4 \times 10^{-3}$  Pixel abschätzen, was  $\pm 120$  nm entspricht sowie eine systematische Messabweichung im Bereich von  $\pm 3 \times 10^{-3}$  Pixel, was  $\pm 90$  nm entspricht. Da der Gradient zweiter Ordnung aus Messdaten mit zufälligen Abweichungen berechnet wurde, nimmt er keinen konstanten Wert an, sondern schwankt stark. Somit sind Messabweichungen, die sich aus dem Gradient zweiter Ordnung ergeben, eher zufälliger Natur und eine Korrektur systematischer Messabweichungen ist schwierig. Von besonderem Interesse für weitere Untersuchungen ist die bislang noch nicht gemessene Kontaktzone in unmittelbarer Nähe der Schleifscheibe. In der Nähe der Schleifscheibe sind hohe Verformungsgradienten zu erwarten, die wahrscheinlich zu erheblichen zufälligen und systematischen Messabweichungen führen.

Zuletzt wird der Prozess Einzahnfräsen untersucht. Hier treten während des Werkzeugeingriffs stark konzentrierte Lasten auf. Abbildung 3.19 (a) zeigt das mit DSP gemessene Verformungsfeld kurz nach dem Eingriff des Werkzeugs. Zu Beachten ist die Skalierung der Achsen in Mikrometern. Während bei den Laserhärten- und Fräsmessungen ein Bereich von vielen Millimetern beobachtet wurde, beträgt das Sichtfeld hier nur etwa  $0,3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ . Die lokale Verformung  $\widetilde{V}_y$  in einem  $y$ -Intervall unmittelbar unterhalb der bearbeiteten Oberfläche ist in Abbildung 3.19 (b) dargestellt. Das  $y$ -Intervall ist in Abbildung 3.19 (a) mit einer gepunkteten, weißen Linie gekennzeichnet. Die Charakteristik von  $V_y$  mit einem schnellen Abfall von einem höheren zu einem niedrigeren Niveau ist ähnlich dem simulierten Verlauf in Abbildung 3.14 (a). Die höchsten Verformungsgradienten erster Ordnung von etwa  $7 \times 10^4 \mu\epsilon$  treten von  $y = 760 \mu\text{m}$  bis  $790 \mu\text{m}$  auf. Die Größe der Auswertefenster beträgt  $10 \times 10$  Pixel, so dass aus Abbildung 3.13 eine maximale zufällige Messabweichung von  $0,075$  Pixel abgeschätzt werden kann, was  $75$  nm entspricht. Die lokalen zufälligen Messabweichungen sind mit blauen Fehlerbalken angegeben. Darüber hinaus wird eine Korrektur der systematischen Messabweichungen durchgeführt. Der Gradient zweiter Ordnung von  $V_y$  nimmt Maximalwerte von etwa  $700 \mu\epsilon/\mu\text{m}$  an, für die gemäß den Simulationsergebnissen eine systematische Messabweichung von  $0,033 \text{ Pixel} \hat{=} 33 \text{ nm}$  zu erwarten ist, was eine Größenordnung größer ist als die maximale systematische Messabweichung, die für das Schleif-

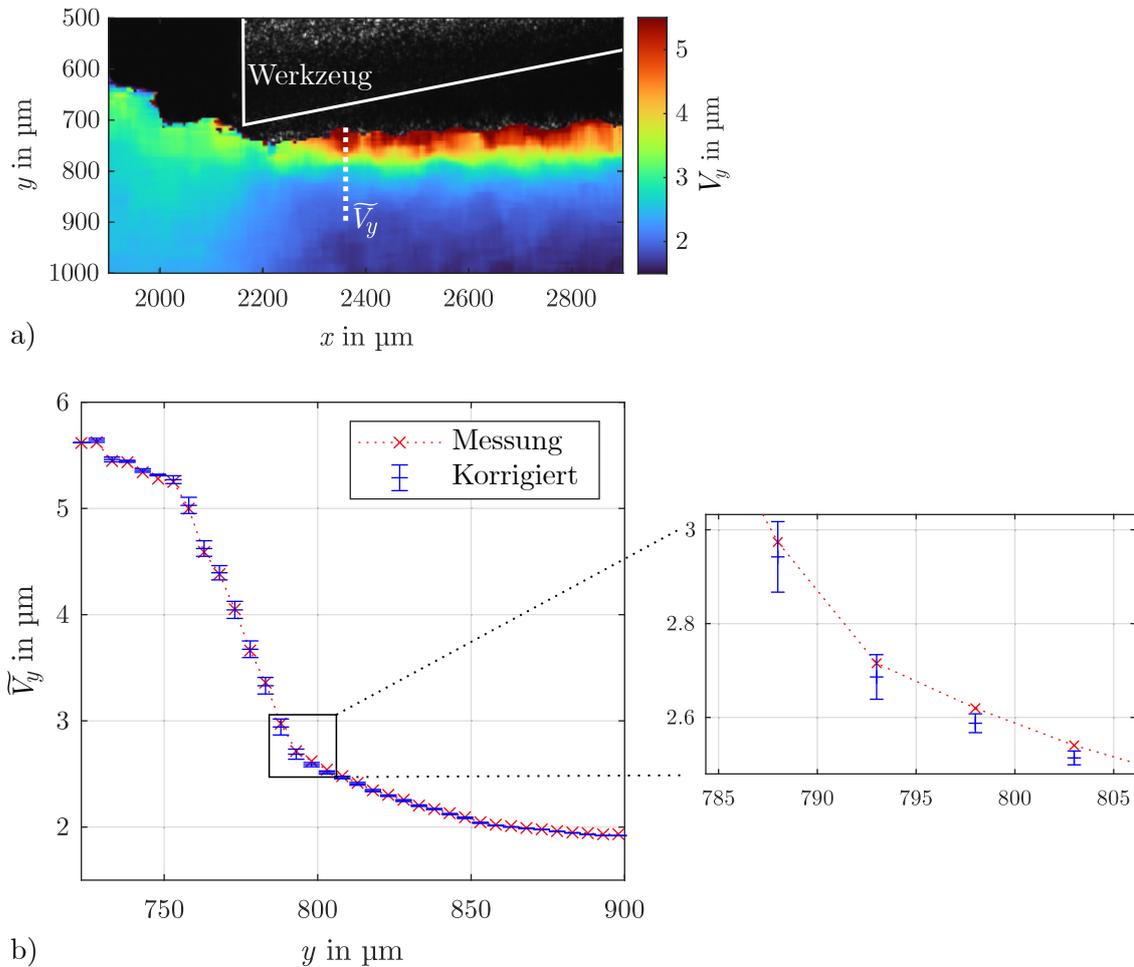


Abbildung 3.19: (a) Mit DSP beim Einzahnfräsen gemessenes Verformungsfeld  $V_y$ . (b) Gemessene lokale Verformung  $\tilde{V}_y$  in  $y$ -Richtung und Korrektur der systematischen Messabweichung. Die Fehlerbalken zeigen die zufällige Messabweichung, die durch den Gradienten erster Ordnung verursacht wird. Die Position des beobachteten  $y$ -Intervalls ist in (a) durch eine gepunktete, weiße Linie gekennzeichnet.

experiment abgeschätzt wurde. Auf Basis der Simulationsergebnisse aus Abbildung 3.16 wird die lokale systematische Messabweichung von  $V_y$  abgeschätzt und korrigiert. Es ist zu beachten, dass die maximalen zufälligen und systematischen Messabweichungen an unterschiedlichen Positionen auftreten. In dem  $y$ -Intervall von  $785\ \mu\text{m}$  bis  $805\ \mu\text{m}$ , das in Abbildung 3.19 (b) vergrößert dargestellt ist, dominieren zunächst die zufälligen und dann die systematische Messabweichung.

Die zusätzlichen zufälligen Messabweichungen aufgrund der Graustufenaufösung der Kamera, des Signal-Rausch-Verhältnisses und der Lichtintensitätsverteilung des Specklemusters werden für dieses Experiment unter Verwendung von Gleichung (6) aus [Tau2018b] auf  $27,5\ \text{nm}$  abgeschätzt. Somit tragen die zufälligen und systematischen Messabweichungen, die durch Verformungsgradienten ausgelöst werden, erheblich zum Gesamtbudget der Messunsicherheit von DSP beim Fräsen bei. Allerdings bleibt die relative Messabweichung selbst bei hohen Verformungsgradienten während des Fräsesprozesses unter  $2,5\ \%$  des Verformungswerts. Somit werden alle drei untersuchten In-Prozess-Anwendungen nicht in nennenswertem Umfang durch Messabweichungen aufgrund von Verformungsgradienten beeinträchtigt.

### 3.3 Fazit

Um mittels DSP eine hochaufgelöste Messung der Oberflächenverformung zu ermöglichen, wurden Methoden zur Reduktion zufälliger Messabweichungen sowie zur Korrektur systematischer Messabweichungen vorgestellt. Durch Ensemblemittelung über eine Vielzahl unkorrelierter Specklemuster konnte die Messunsicherheit der Verformungsmessung um eine Größenordnung verringert werden, ohne die Ortsauflösung zu verschlechtern. Diese Verringerung der Messunsicherheit wird über einen weiten Bereich der Ortsauflösung von  $10\ \mu\text{m}$  bis  $100\ \mu\text{m}$  erreicht. Da durch die Ensemblemittelung neben anderen zufälligen Unsicherheitsbeiträgen auch das Specklerauschen reduziert wird, wird dadurch die Verwendung von kleinen Auswertefenstern mit einer geringen Anzahl an Speckles ( $< 10$ ) ermöglicht. Um die Zeitauflösung trotz der für die Mittelung notwendigen Mehrfachmessung zu maximieren, wird eine schnelle adaptive Optik zur Modulation der Specklemuster eingesetzt. Mit dem Mikrospiegelaktor (DMD) lassen sich Specklemuster mit einer Rate von  $17,9\ \text{kHz}$  erzeugen. Die zur bestmöglichen Reduktion der zufälligen Messabweichungen notwendigen 100 Specklemuster werden somit mittels DMD innerhalb von  $5,6\ \text{ms}$  generiert.

Die Reduktion der zufälligen Messabweichung mittels adaptiver Optik und Ensemblemittelung vergrößert die relative Bedeutung von systematischen Messabweichungen bei der DSP. Deshalb wurde durch eine simulative Studie untersucht, welche zufälligen und systematischen Messabweichungen bei DSP unter dem Einfluss von Verformungsgradienten auftreten. Die zufällige Messabweichung ist ungefähr proportional zum Gradienten erster Ordnung und umgekehrt proportional zur Größe der Auswertefenster. Da sich die zufälligen Messabweichungen nicht auf den Bildkorrelationsalgorithmus zurückführen lassen, ist anzunehmen, dass sie durch die Dekorrelation der Specklemuster verursacht werden. Die systematische Messabweichung hängt linear vom Verformungsgradienten zweiter Ordnung und von der Auswertefenstergröße ab. Im Gegensatz zu den zufälligen Messabweichungen werden die systematischen Messabweichungen zu etwa  $85\ \%$  durch den Bildkorrelationsalgorithmus hervorgerufen und sind deshalb bei DSP mit Laserspeckle nur geringfügig größer als bei DIC mit inkohärenter Beleuchtung. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurden Verformungsfelder ausgewertet, welche mit DSP prozessnah beim Laserhärten, Schleifen und Einzahnfräsen gemessen wurden, um die durch Verformungsgradienten ausgelösten Messabweichungen zu bestimmen. Die systematische Messabweichung konnte dadurch korrigiert werden und die relative zufällige Messabweichung liegt bei allen drei prozessbegleitenden Messungen unter  $2,5\ \%$ . Somit kann bestätigt werden, dass die DSP beim Laserhärten, Schleifen und Einzahnfräsen nicht wesentlich durch Verformungsgradienten beeinträchtigt wird und daher für diese prozessbegleitenden Anwendungen geeignet ist.



## 4 Multiparametrische Charakterisierung anisotroper Oberflächen

In diesem Kapitel werden die in Abschnitt 2.3 eingeführten Ansätze für die multiparametrische Charakterisierung anisotroper Oberflächen experimentell validiert. Dafür wird in Abschnitt 4.1 ein phasenbasierter räumlicher Lichtmodulator (engl. „Spatial Light Modulator“ – SLM) in den Messaufbau integriert, um modellbasierte Referenztopographien mit vordefinierten Oberflächenparametern zu emulieren. Die Emulation einer Vielzahl von Oberflächentopographien an jedem Arbeitspunkt mittels einer adaptiven Optik erlaubt neben der Untersuchung der Messbereichsgrenzen auch eine empirische Analyse der zufälligen Messabweichungen. In Abschnitt 4.2 werden darüber hinaus die systematischen Messabweichungen aufgrund einer Neigung oder Krümmung der Oberfläche untersucht. Ein Fazit des Kapitels erfolgt abschließend in Abschnitt 4.3.

### 4.1 Multiparametrische Analyse der Oberflächenbeschaffenheit

Zunächst werden in Abschnitt 4.1.1 der durch einen SLM erweiterte Messaufbau und der Ablauf der Bildauswerterroutine beschrieben. Mittels des SLM werden in Abschnitt 4.1.2 Kalibrierkurven für den Oberflächenparameter  $S_{al,y}$  und in Abschnitt 4.1.3 für die Parameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  bestimmt. Zudem werden durch die Emulation einer großen Stichprobe von Oberflächentopographien an jedem Arbeitspunkt der Kalibrierkurven die zufälligen Messabweichungen bestimmt und durch eine Unsicherheitsfortpflanzung der Messunsicherheitsbeitrag des Specklerauschens quantifiziert. Eine Validierung des Messansatzes einschließlich der Oberflächenemulation erfolgt abschließend anhand von referenzierten Oberflächennormalen in Abschnitt 4.1.4.

#### 4.1.1 Experimenteller Aufbau

##### Messobjekt

Um das in Abschnitt 2.3.1 eingeführte Prinzip zur Lösung des inversen Problems der Oberflächencharakterisierung anzuwenden, müssen simulierte Oberflächentopographien im Versuchsaufbau emuliert werden. Für die Oberflächenemulation wird der SLM *PLUTO-2.1-VIS-016* der Firma HOLOEYE Photonics AG eingesetzt. Der SLM und der davon reflektierte Laserstrahl sind in Abbildung 4.1 (a) zu sehen. Mit dem SLM kann die Phase einer Laserwellenfront räumlich aufgelöst moduliert werden. Damit lassen sich die bei der Reflexion an einer Oberflächentopographie entstehenden Gangunterschiede durch eine räumlich angepasste Phasenverzögerung emulieren. Der SLM wird im  $4\pi$ -Phasenverzögerungsmodus betrieben. Bei einer Laserwellenlänge von 638 nm entspricht die maximale Phasenverzögerung von  $4\pi$  einem Gangunterschied von etwa  $1,3\ \mu\text{m}$ . Somit können Oberflächen mit einer Rauheit von bis zu  $S_q = 0,3\ \mu\text{m}$  näherungsweise korrekt emuliert werden, da bei einer Normalverteilung  $\approx 95\%$  der Höhenwerte dargestellt werden können. Die Auflösung des SLM beträgt  $1920 \times 1080$  Pixel mit einem Pixelabstand von  $8\ \mu\text{m}$ , was eine aktive Fläche von  $15,4\text{mm} \times 8,6\text{mm}$  ergibt. Die pixeldiskrete Darstellung mit der räumlichen Auflösung von  $8\ \mu\text{m}$  glättet das Höhenprofil im Vergleich zu einer realen kontinuierlichen Oberfläche. Dies begrenzt die minimale laterale Autokorrelationslänge einer Oberfläche, die der SLM korrekt emulieren kann, siehe Abschnitt 4.1.2. Zur Validierung sowohl des Oberflächenmodells als auch

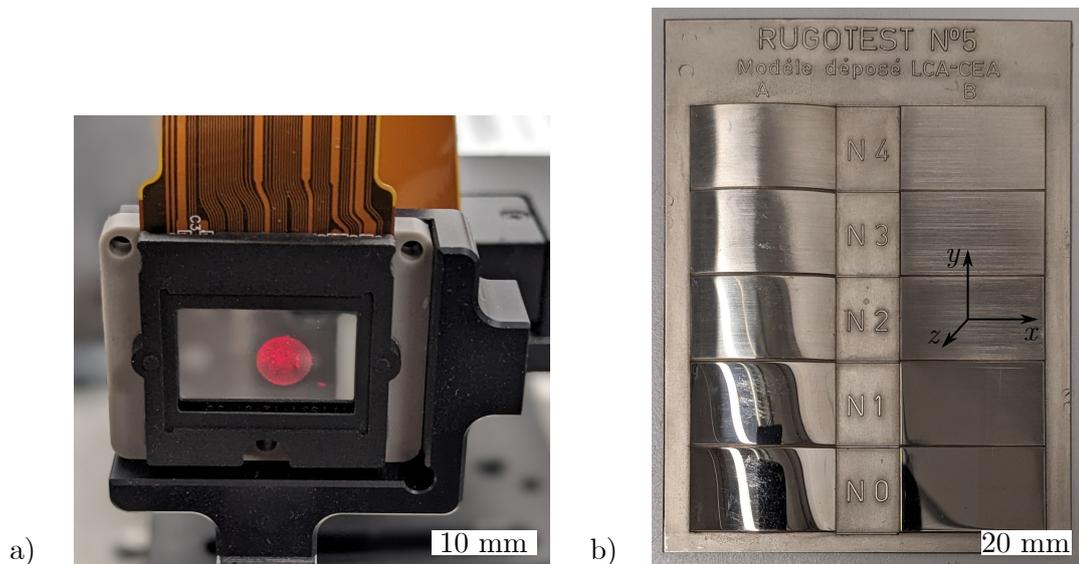


Abbildung 4.1: (a) Räumlicher Phasenmodulator (SLM) mit reflektiertem Laserstrahl. (b) *Rugotest Nr. 5*-Oberflächennormal.

seiner Emulation mit dem SLM werden *Rugotest Nr. 5*-Oberflächennormale als physische Referenzproben verwendet, siehe Abschnitt 4.1.3. Die unidirektional handpolierten Referenzproben sind in Abbildung 4.1 (b) gezeigt. Das  $(x, y, z)$ -Koordinatensystem der Oberflächentopographie ist beispielhaft für die N2-Probe eingezeichnet. Dabei zeigt die  $x$ -Achse in Bearbeitungsrichtung, parallel zu den Bearbeitungsriefen. Für eine Referenzmessung der Oberflächentopographie und der Parameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  wird ein WLI des Herstellers GBS mbH mit einer lateralen Auflösung von  $0,94 \mu\text{m}$  eingesetzt.

### Optisches Messsystem

Abbildung 4.2 zeigt eine schematische Darstellung und ein Foto des Messaufbaus. Der Dauerstrich-Diodenlaser *LDM638* von Omicron-Laserage mit der Wellenlänge  $638 \text{ nm}$  wird auf einen Strahldurchmesser von  $d_L = 5 \text{ mm}$  aufgeweitet, kollimiert und polarisiert. Der Einfallswinkel auf die SLM- oder Referenzprobenoberfläche beträgt  $< 5^\circ$ , um die höchste Beugungseffizienz mit dem SLM zu erreichen. Anstelle einer senkrechten Oberflächenbeleuchtung mit einem Strahlteiler wurde ein Einfallswinkel ungleich null gewählt, um unerwünschte Interferenzeffekte zu vermeiden. Das resultierende Specklemuster wird durch ein  $4-f$ -System mit zwei Linsen der Brennweite  $f = 150 \text{ mm}$  und einer Lochblende mit einer Apertur von  $d_A = 3 \text{ mm}$  abgebildet und mit der 5 Megapixel CMOS-Kamera *DMK 37BUX264* von The Imaging Source aufgenommen. Die  $4-f$ -Konfiguration dient zur Anpassung der Brennweite sowie der Apertur und ermöglicht eine theoretische Beschreibung analog zu Goodman [Goo2007, Dai1975], siehe Abschnitt 2.1.2.

### Bildverarbeitung

Um aus den Rohbildern der Specklemuster die Messgrößen  $\beta$ ,  $S_{al}$ ,  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  zu bestimmen, wird eine Bildverarbeitungs- und Auswerterroutine durchgeführt, deren Ablauf in Abbildung 4.3 dargestellt ist. Die monochromatischen Kamerabilder werden zunächst auf eine Größe von  $1024 \times 1024$  Pixel zugeschnitten. Im ersten Arbeitsschritt werden die Specklemuster mit der MATLAB-Funktion `fft2()` fouriertransformiert. Die niederfrequenten Bildanteile im Ursprung des Amplitudenspektrums werden für die weitere Auswertung gleich null gesetzt, d. h., es wird ein Hochpassfilter angewendet. Nun wird die Schwerpunktfrequenz  $f_c$  des Spektrums bestimmt.

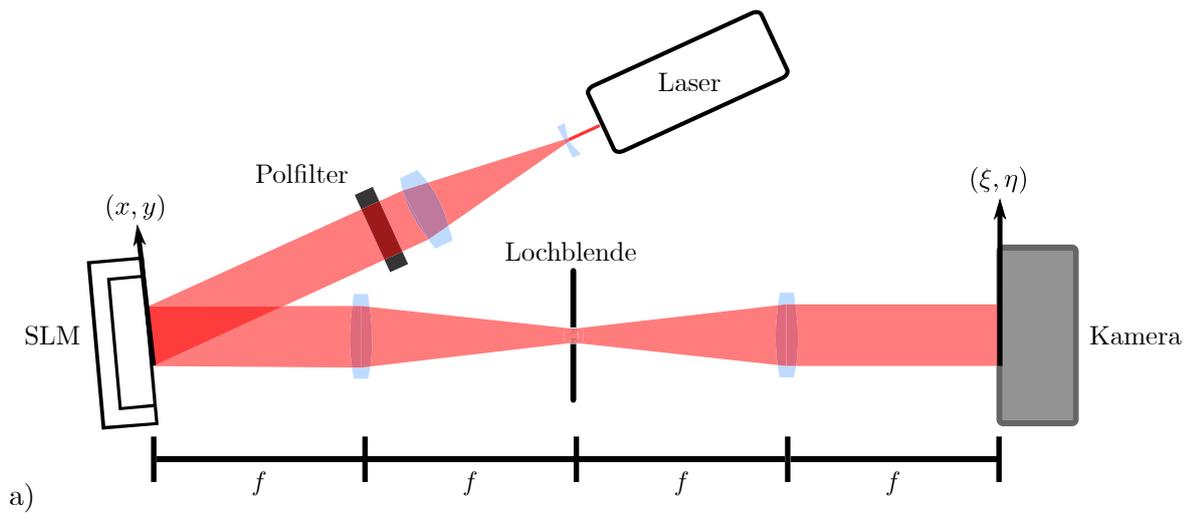


Abbildung 4.2: Messaufbau: (a) Schema, (b) Foto.

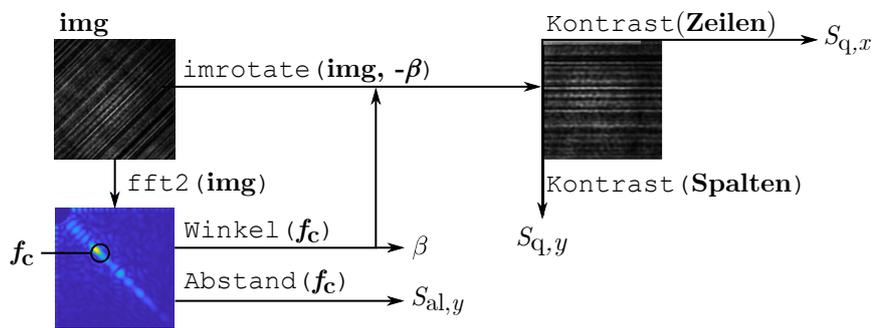


Abbildung 4.3: Ablauf der Bildverarbeitungs- und Auswerterroutine.

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, lässt sich aus dem Abstand von  $f_c$  zum Ursprung im Frequenzbereich die laterale Autokorrelationslänge  $S_{al}$  und aus dem Winkel  $\beta_{sp}$  dieses Abstands zur Ordinate die Bearbeitungsrichtung  $\beta$  der Oberfläche bestimmen. Dieser Winkel wird dann verwendet, um das Specklemuster so zu drehen, dass die Bearbeitungsrichtung parallel zur  $x$ -Achse des Bildes ausgerichtet ist. Anschließend wird der Specklekontrast in und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung nach Gleichung (2.27) in einem Auswertefenster von  $500 \times 500$  Pixel bestimmt. Dieses Auswertefenster ist kleiner als das ursprüngliche Bild gewählt, um nach der Rotation um  $\beta$  wieder eine quadratische Bildmatrix zu erhalten. Das Auswertefenster ist homogen ausgeleuchtet, so dass Randeffekte vernachlässigt werden können. Mit Kenntnis der jeweiligen Kalibrierkurven lassen sich aus den Komponenten  $C_x$  und  $C_y$  des Specklekontrasts die Rauheitsparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  bestimmen.

#### 4.1.2 Messung der Bearbeitungsrichtung und der Autokorrelationslänge

In Abschnitt 2.3.3 wurde anhand simulierter Specklemuster demonstriert, wie sich die Bearbeitungsrichtung  $\beta$ , d. h. der Winkel zwischen dem Oberflächenkoordinatensystem  $(x, y)$  mit  $x$  in Bearbeitungsrichtung und dem Kamerakoordinatensystem  $(\xi, \eta)$ , und der räumliche Parameter  $S_{al,y}$ , d. h. die Autokorrelationslänge senkrecht zur Bearbeitungsrichtung, mittels einer zweidimensionalen schnellen Fouriertransformation bestimmen lassen. In diesem Abschnitt erfolgt die experimentelle Validierung dieses Auswerteansatzes.

Abbildung 4.4 (a) zeigt ein gemessenes Specklemuster einer mittels SLM emulierten Oberflächentopographie mit den Modellparametern  $M_{i,R} = 0,07 \mu\text{m}$ ,  $M_{i,L} = 10 \mu\text{m}$ ,  $M_{a,R} = 0,3 \mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 35 \mu\text{m}$ . Um die Winkelabhängigkeit des zweidimensionalen Amplitudenspektrums von der Bearbeitungsrichtung zu demonstrieren, wird die Oberflächentopographie um den Winkel  $\beta = 45^\circ$  rotiert. Das aus dem Specklemuster berechnete zweidimensionale Amplitudenspektrum ist in Abbildung 4.4 (b) dargestellt. Wie bei der Auswertung des simulierten Specklemusters in Abbildung 2.14 wird die Bearbeitungsrichtung aus dem zweidimensionalen Spektrum als der Winkel  $\beta_{sp}$  zwischen dem Frequenzmaximum und der  $\eta$ -Achse bestimmt.

Das eindimensionale Amplitudenspektrum in  $y$ -Richtung ist in Abbildung 4.4 (c) dargestellt und zeigt ein dominantes Frequenzmaximum bei  $f_y = 73$ . Allerdings sind auch weitere lokale Extremwerte zu erkennen. Die Analyse mehrerer Specklemuster von unterschiedlichen Oberflächentopographien zeigt, dass im allgemeinen Fall nicht nur eine dominante Ortsfrequenz in  $y$ -Richtung vorliegt. Deshalb erweist sich statt der Position des globalen Frequenzmaximums die Schwerpunktfrequenz  $f_c$  als robusterer Parameter zur Bestimmung der lateralen Korrelationslänge.

Abbildung 4.4 (d) zeigt  $f_c$  aufgetragen über dem Oberflächenmodellparameter  $S_{al,y}$ , welcher durch die Anpassung des Modellparameters  $M_{a,L}$  von  $16 \mu\text{m}$  bis  $58 \mu\text{m}$  variiert wird. Für jeden Datenpunkt werden 100 Specklemuster ausgewertet und die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwerts. Die blaue Kurve zeigt im betrachteten Bereich eine nahezu lineare Korrelation von  $f_c$  und  $S_{al,y}$ . Oberflächentopographien mit kleineren Korrelationslängen können vom SLM nicht korrekt dargestellt werden, da seine räumliche Auflösung durch die Pixelgröße von  $8 \mu\text{m}$  begrenzt ist. In der Oberflächensimulation und auf dem SLM können noch größere Korrelationslängen emuliert werden als hier gezeigt, allerdings entsprechen die simulierten Topographien ab einem bestimmten Punkt nicht mehr real gefertigten Oberflächen. Aus den Ergebnissen in Abbildung 4.4 (d) folgt somit, dass eine Messung von  $S_{al,y}$  durch Auswertung von  $f_c$  in dem gezeigten Messbereich möglich ist, sofern die entsprechende Kalibrierkurve bekannt ist.

Darüber hinaus wird der Einfluss des Specklerausens, d. h. die Unsicherheitskomponente, die durch das statistisch verteilte Specklemuster verursacht wird, auf die Messung der Korrelationslänge mittels einer Messunsicherheitsanalyse quantifiziert. Dazu wird die empirische Messunsicherheit der Schwerpunktfrequenz  $f_c$  nach der Typ-A-Auswertung aus dem *Guide to the*

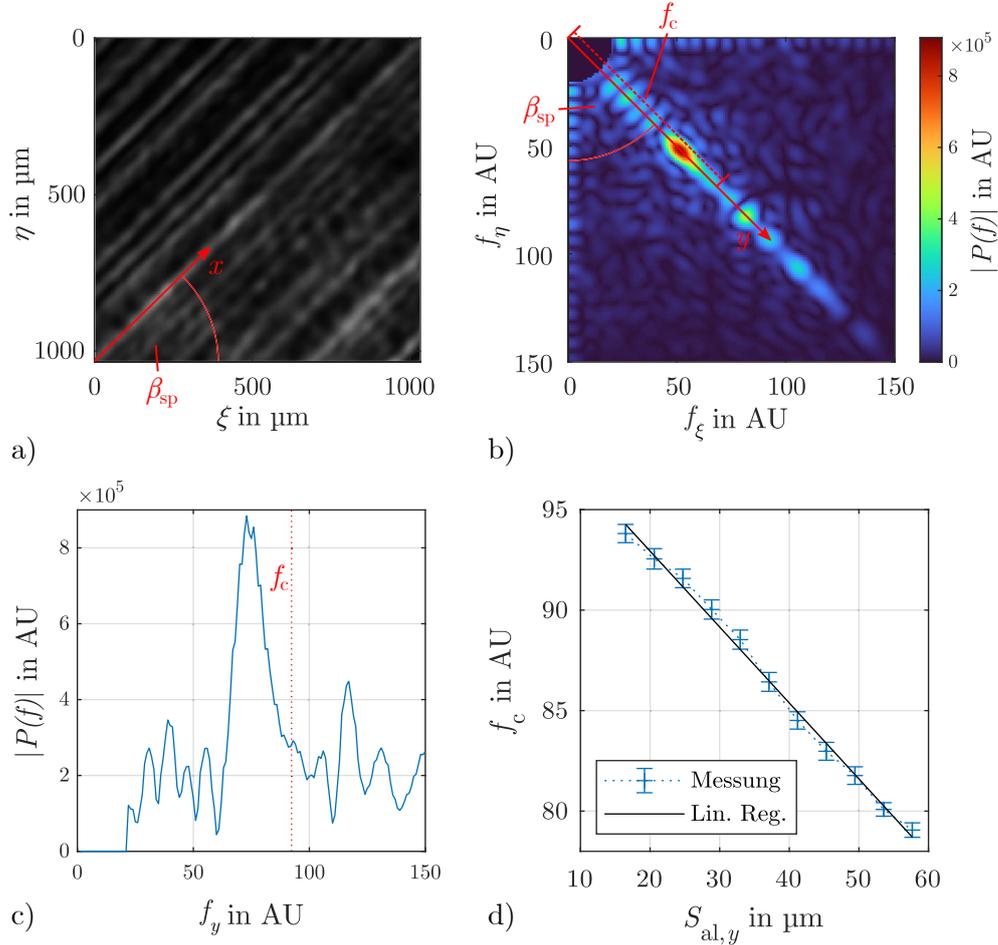


Abbildung 4.4: (a) Gemessenes Specklemuster mit empirisch bestimmter Bearbeitungsrichtung  $\beta_{sp}$ , (b) zweidimensionales Amplitudenspektrum mit der Schwerpunktfrequenz  $f_c$  in rot, (c) eindimensionales Amplitudenspektrum in  $y$ -Richtung, d. h. senkrecht zur Bearbeitungsrichtung mit  $f_c$  als gepunkteter roter Linie eingezeichnet und (d)  $f_c$  in Abhängigkeit des Oberflächenmodellparameters  $S_{al,y}$ . Fehlerbalken zeigen die zweifache empirische Standardabweichung des Mittelwerts von 100 emulierten Oberflächentopographien. Die lineare Regression der Messwerte liegt innerhalb der Konfidenzintervalle.

*expression of uncertainty in measurement* (GUM) [JCG2008] berechnet. Die Unsicherheit der Korrelationslänge  $S_{al,y}$  wird dann mittels einer Unsicherheitsfortpflanzung unter Verwendung der gemessenen Kalibrierkurve, die in Abbildung 4.4 (d) dargestellt ist, berechnet. Zunächst werden 100 Specklemuster von derselben Oberflächentopographie aufgenommen, so dass die zufälligen Messabweichungen alleine auf Photonenschrotrauschen und Kamerarauschen beruhen. Anschließend werden 100 Specklemuster von 100 zufällig erzeugten Oberflächen mit denselben Modellparametern aufgenommen, so dass zusätzlich noch der Einfluss des Specklerauschen wirkt. Bei der Messung ohne Specklerauschen ist die Unsicherheit von  $S_{al,y}$  vernachlässigbar klein. Bei der Messung mit Specklerauschen bleibt die Standardunsicherheit von  $S_{al,y} \leq 0,77 \mu\text{m}$  im gesamten Messbereich. Damit ist das Specklerauschen die dominierende Komponente des Unsicherheitsbudgets. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Auswertung der Korrelationslänge im Specklemuster Strukturen erkannt werden müssen, die bei unterschiedlichen Oberflächen stochastisch in Form und Größe variieren. Wird dasselbe Specklemuster mehrfach gemessen, ist die Messunsicherheit nahezu null, da die Auswertung des Schwerpunkts bereits das zufällige Rauschen im Messspektrum herausfiltert. Aber auch mit Specklerauschen ist eine relative Messunsicherheit von  $S_{al,y}$  deutlich unter 10 % erreichbar.

### 4.1.3 Bidirektionale Rauheitsmessung

In diesem Abschnitt erfolgt die experimentelle Validierung des in Abschnitt 2.3.4 vorgeschlagenen Ansatzes zur Bestimmung der Oberflächenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$ . Dafür wird der Specklekontrast bidirektional in  $x$ - und  $y$ -Richtung ausgewertet. Abbildung 4.5 zeigt den gemessenen bidirektionalen Specklekontrast über die Oberflächenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  der mittels SLM emulierten Oberflächentopographien. Hierbei werden über die in Abbildung 2.16 gezeigte isotrope Kontrastauswertung hinaus die beiden Kontrastwerte  $C_x$  und  $C_y$  in und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung gemessen. Für jeden Datenpunkt im Diagramm werden 100 Oberflächentopographien mit denselben statistischen Modellparametern gemäß Gleichung (2.21) zufällig generiert und gemessen. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwerts. In Abbildung 4.5 (a) wird der Oberflächenmodellparameter  $M_{i,R}$  linear von  $0,05 \mu\text{m}$  bis  $0,2 \mu\text{m}$  variiert, um den Oberflächenparameter  $S_{q,x}$  anzupassen. Dieser lineare Anstieg spiegelt sich im Specklekontrast  $C_x$  in  $x$ -Richtung wider. Die anderen Modellparameter bleiben konstant bei  $M_{i,L} = 10 \mu\text{m}$ ,  $M_{a,R} = 0,3 \mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 20 \mu\text{m}$ . Ein Anstieg des isotropen Modellparameters  $M_{i,R}$  bewirkt allerdings auch einen gewissen Anstieg von  $S_{q,y}$ , weshalb auch der Specklekontrast in  $y$ -Richtung  $C_y$  leicht zunimmt.

In Abbildung 4.5 (b) wird der Parameter  $M_{a,R}$  des Oberflächenmodells von  $0,1 \mu\text{m}$  bis  $0,5 \mu\text{m}$  variiert, was sich in einen linearen Anstieg des Oberflächenparameters  $S_{q,y}$  auswirkt. Die anderen Modellparameter bleiben konstant bei  $M_{i,R} = 0,07 \mu\text{m}$ ,  $M_{i,L} = 10 \mu\text{m}$  und  $M_{a,L} = 20 \mu\text{m}$ . Der senkrecht zur Bearbeitungsrichtung ausgewertete Specklekontrast  $C_y$  verhält sich ähnlich zur Theorie von [Goo2007, Dai1975] für den isotropen Specklekontrast im Übergang von einem teilweise entwickelten zu einem voll entwickelten Specklemuster. Der Specklekontrast steigt zunächst näherungsweise linear an und erreicht dann eine Sättigung bei einem voll entwickelten Specklemuster. In der Theorie und bei der Messung an realen Oberflächen beträgt dieser Maximalwert eins, bei der Emulation von Oberflächentopographien durch den SLM bleibt der maximale Specklekontrast allerdings knapp unter 0,8. Bei einem voll entwickelten Specklemuster sollte das diffus gestreute Licht über die spiegelnd reflektierte Komponente dominieren. Bei der Lichtstreuung an dem SLM verschwindet die gespiegelte Komponente jedoch selbst bei einer großen emulierten Rauheit im Bereich der Laserwellenlänge nicht. Die spiegelnde Reflexion erhöht die durchschnittliche Intensität  $\langle I \rangle$  des Specklemusters, was den Specklekontrast  $C = \sigma(I)/\langle I \rangle$  verringert. Außerdem zeigen die Ergebnisse eine leichte Querempfindlichkeit des Kontrasts  $C_x$  in  $x$ -Richtung gegenüber dem anisotropen Höhenparameter  $S_{q,y}$  in  $y$ -Richtung. Eine mögliche Ursache für diese Queremp-

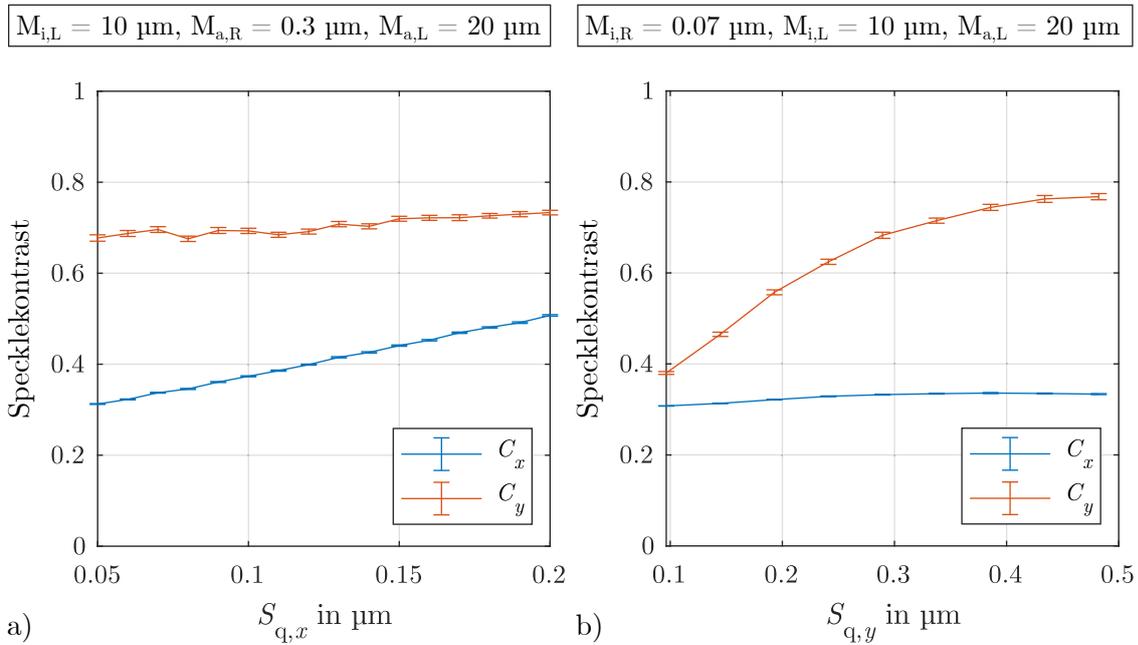


Abbildung 4.5: Specklekontrast  $C_x$  in  $x$ - und  $C_y$  in  $y$ -Richtung gemessen von einer mittels SLM emulierten Oberflächentopographie. (a) Variation des isotropen Modellparameters  $M_{i,R}$  zwischen  $0,05 \mu\text{m}$  und  $0,2 \mu\text{m}$ . (b) Variation des anisotropen Modellparameters  $M_{a,R}$  zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $0,5 \mu\text{m}$ . Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwerts des Specklekontrasts von 100 zufällig generierten Oberflächen mit jeweils gleichen statistischen Modellparametern.

findlichkeit ist eine leicht fehlerhafte Ausrichtung zwischen dem SLM und der Kamera, d. h. ein Winkel zwischen dem  $(\xi, \eta)$ - und dem  $(x, y)$ -Koordinatensystem. Die hier beobachtete Querempfindlichkeit ist jedoch gering im Vergleich zur Empfindlichkeit der Kontrastwerte  $C_x$  und  $C_y$ , so dass im gesamten betrachteten Messbereich eine bidirektionale Rauheitsmessung auf Basis des Specklekontrasts möglich ist.

Mit dem gleichen Vorgehen wie im vorigen Abschnitt 4.1.2 wird auch für die Auswertung des Specklekontrasts der Einfluss des Specklerausens untersucht. Erneut werden jeweils 100 Specklemuster von derselben simulierten Oberflächentopographie und von 100 zufällig erzeugten Oberflächen mit denselben Modellparametern ausgewertet. Die Messunsicherheiten von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  werden mittels einer Unsicherheitsfortpflanzung aus den empirisch bestimmten Messunsicherheiten  $C_x$  und  $C_y$  sowie den in Abbildung 4.5 gezeigten Kalibrierkurven berechnet. Bei der Messung ohne Specklerausens betragen die Messunsicherheiten von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  jeweils  $1 \text{ nm}$  bei einer Rauheit von  $0,1 \mu\text{m}$ . Bei der Messung mit Specklerausens ist die Unsicherheit von  $S_{q,x}$   $1 \text{ nm}$  und für  $S_{q,y}$  ist sie  $1,7 \text{ nm}$ . Dies zeigt, dass eine Messunsicherheit im Nanometerbereich für die bidirektionale Rauheitsmessung möglich ist. Außerdem scheint nur die Auswertung senkrecht zur Bearbeitungsrichtung signifikant durch Specklerausens beeinflusst zu werden.

#### 4.1.4 Validierung

In den vorherigen Abschnitten wurde demonstriert, wie sich mittels eines räumlichen Phasenmodulators anisotrope Oberflächentopographien emulieren lassen und wie sich aus dem gemessenen Specklemuster die Bearbeitungsrichtung, die Korrelationslänge  $S_{al,y}$  sowie die bidirektionalen Rauheitsparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  ermitteln lassen. Das der Emulation zugrundeliegende Oberflächenmodell basiert auf Oberflächennormalen, welche in Abbildung 4.1 dargestellt sind. Diese

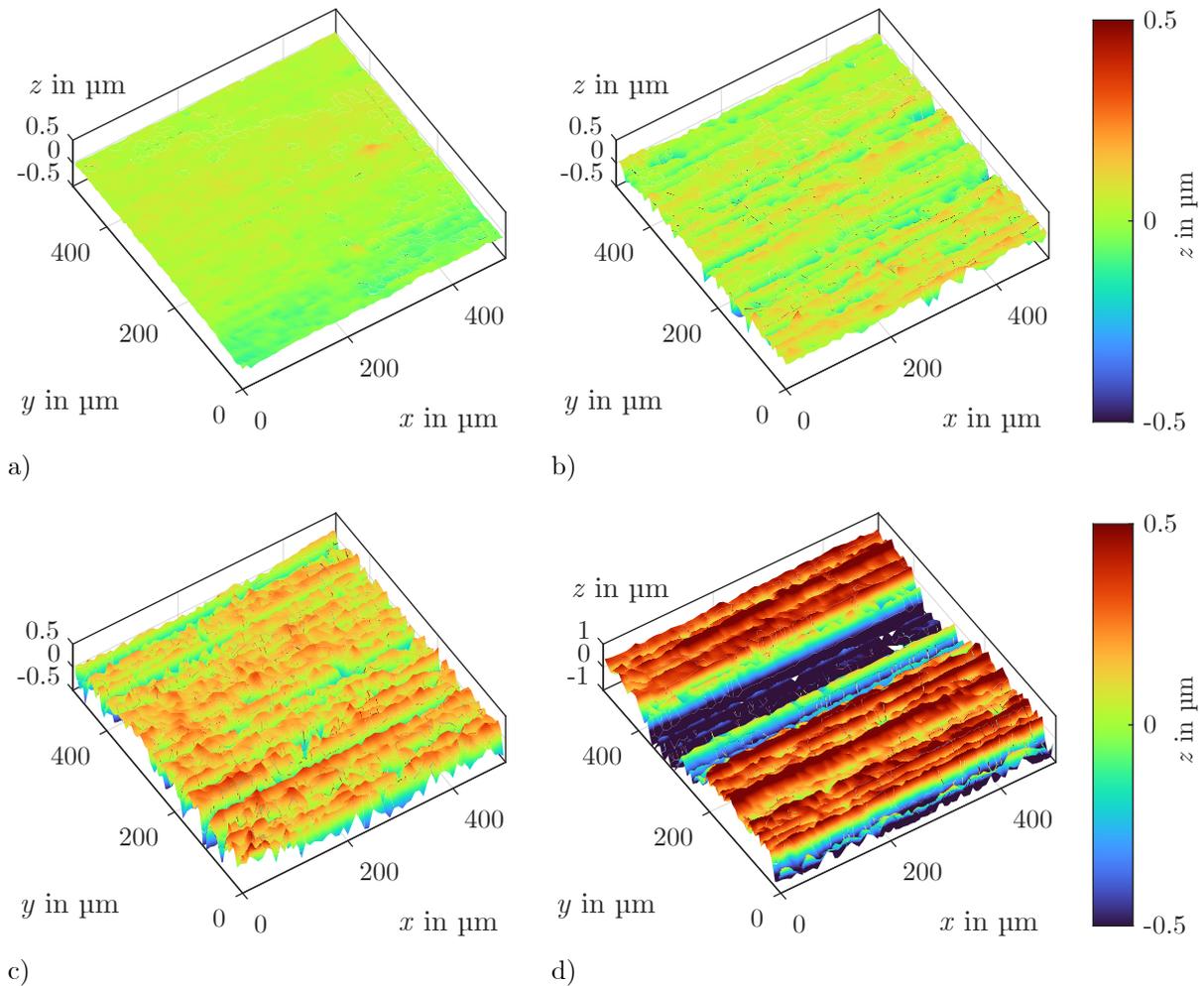


Abbildung 4.6: Mit dem WLI gemessene Oberflächentopographien der *Rugotest Nr. 5* Oberflächennormale (a) N1, (b) N2, (c) N3 und (d) N4.

Oberflächennormale werden nun zur Validierung der Emulation und multiparametrischen Charakterisierung anisotroper Oberflächen im Specklemessaufbau ausgewertet. Zudem werden mit einem WLI Referenzmessungen durchgeführt. Abbildung 4.6 zeigt die mit dem WLI gemessenen Oberflächentopographien. In der Abbildung sind für eine bessere Sichtbarkeit der Höhenvariationen  $0,5\text{mm} \times 0,5\text{mm}$  große Ausschnitte dargestellt, für die Referenzmessung wurde aber mittels Stitching von mehreren WLI-Auswertebereichen eine Fläche von jeweils  $6\text{mm} \times 6\text{mm}$  gemessen. Zwischen den Proben N1–N4 ist in den Oberflächentopographien eine Vergrößerung der Höhenvariationen bzw. der Rauheit erkennbar. Die Farbskala ist bei allen Proben gleich, zu beachten ist aber der größere  $z$ -Bereich in Abbildung 4.6 (d). Anders als die Rauheit nimmt der Abstand der Bearbeitungsriefen in  $y$ -Richtung nicht erkennbar zu.

Abbildung 4.7 zeigt Ausschnitte aus den gemessenen Speckle-Streulichtmustern der *Rugotest Nr. 5* Oberflächennormale. Bei den Proben N1–N3 ist eine Zunahme des Kontrasts zu erkennen. Die Intensität des spekulär reflektierter Lichts nimmt bei zunehmender Oberflächenrauheit ab. Zwischen N3 und N4 ist dann keine deutliche Veränderung mehr erkennbar, was darauf hindeutet, dass die Speckle in Abbildung 4.7 (c) bereits nahezu vollständig entwickelt sind und damit die Obergrenze des Messbereichs erreicht ist.

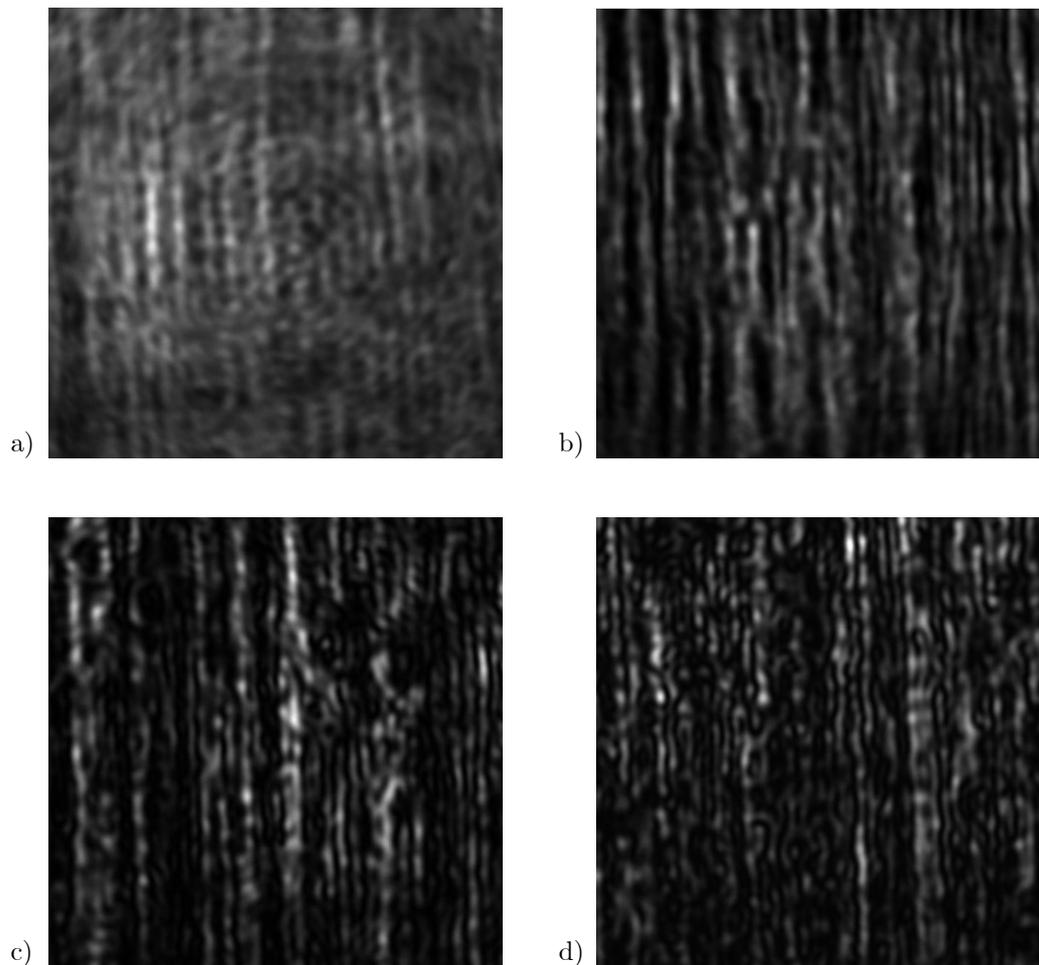


Abbildung 4.7: Gemessene Speckle-Streulichtmuster der *Rugotest Nr. 5* Oberflächennormale (a) N1, (b) N2, (c) N3 und (d) N4.

### Autokorrelationslänge

Abbildung 4.8 zeigt die gemessenen Schwerpunktfrequenzen  $f_c$  der *Rugotest Nr. 5*-Referenzproben N1–N4 in Abhängigkeit der aus der mit dem WLI bestimmten Topographie berechneten Korrelationslänge  $S_{al,y}$ . Zusätzlich sind als Vergleich die Ergebnisse der mit dem SLM emulierten Oberflächentopographien aus Abbildung 4.4 (d) in blau dargestellt. Die Ergebnisse der Proben N1 und N4 (rot) zeigen einen ähnlichen Trend wie die SLM-Ergebnisse. Trotzdem verbleibt eine signifikante Abweichung der Emulation von den physischen Proben. Die Ergebnisse der Proben N2 und N3 (grau) stimmen nicht mit der Hypothese aus Gleichung (2.22) überein, wonach eine Proportionalität zwischen  $f_c$  und  $S_{al,y}$  besteht. Bei kleinen Korrelationslängen versagt der Auswerteansatz, da die räumlichen Frequenzen der Bearbeitungsriefen nicht mehr von den zufälligen Variationen der Oberflächentopographie, bzw. des Specklemusters, zu trennen sind. Infolgedessen liegen die Proben N2 und N3 außerhalb des Messbereichs. Angesichts dieser Einschränkung sind die Referenzmessungen nur ein Indiz für die Validität des in Abschnitt 2.3.3 aufgestellten Ansatzes zur merkmalsbasierten Messung räumlicher Oberflächenparameter. Aufgrund der geringen Anzahl von Proben ist jedoch keine definitive Aussage über den Messbereich und den genauen Verlauf der Kalibrierkurve bei physischen Oberflächen möglich. Die Bearbeitungsrichtung der Referenzproben lässt sich wie auch bei der SLM-Emulation aus dem zweidimensionalen Amplitudenspektrum des Specklemusters korrekt bestimmen.

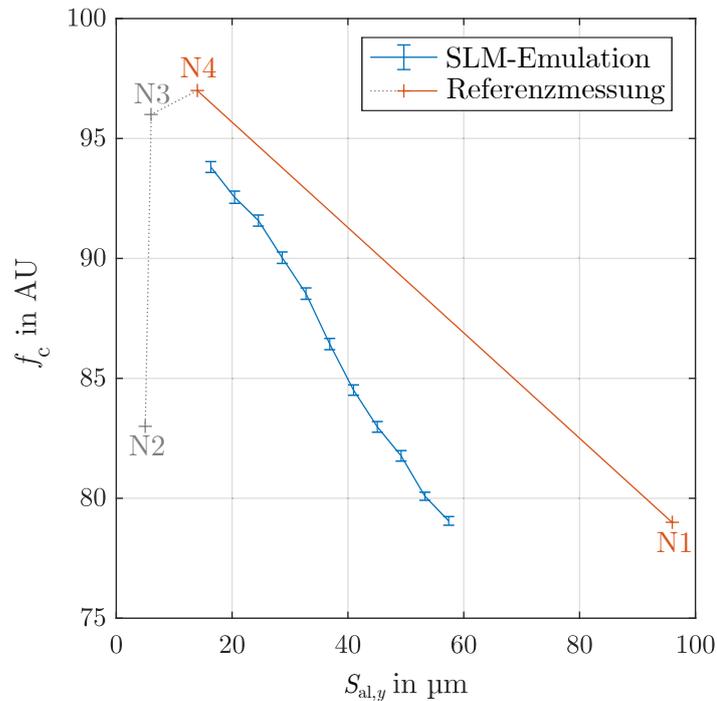


Abbildung 4.8: Schwerpunktfrequenz  $f_c$  in Abhängigkeit der Korrelationslänge  $S_{al,y}$ , welche im Specklemessaufbau von *Rugotest Nr. 5* Oberflächennormalen (grau/rot) gemessen wurde. Zudem sind zum Vergleich die Ergebnisse der mit dem SLM emulierten Oberflächentopographien dargestellt (blau).

## Rauheit

Die bidirektionale Messung der Rauheit basiert auf der Auswertung der Zeilen und Spalten der Bildmatrix des aufgenommenen Specklemusters. Ein korrekter Wert kann nur bestimmt werden, wenn die Bearbeitungsrichtung der Oberfläche parallel zu den Pixelzeilen des Kamerasensors ausgerichtet ist, d. h., wenn die  $y$ - und die  $\eta$ -Achse in die gleiche Richtung zeigen. Die Messabweichungen durch eine fehlerhafte Ausrichtung werden in Abbildung 4.9 verdeutlicht. Für Abbildung 4.9 (a) wurde das Specklemuster der *Rugotest Nr. 5* N3 Probe in der  $(x, y)$ -Ebene schrittweise um  $180^\circ$  rotiert und dabei der Specklekontrast in  $\xi$ - und  $\eta$ -Richtung ausgewertet. Für Abbildung 4.9 (b) wurde die mit dem WLI aufgenommene Oberflächentopographie der N3-Probe ebenfalls schrittweise rotiert und die Rauheitsparameter  $S_{q,a}$  und  $S_{q,b}$  bestimmt ( $(a, b)$  ist das Koordinatensystem des WLI). Die Rotation wurde nicht experimentell, sondern numerisch in Matlab realisiert. Dafür wurden das Specklemuster bzw. die Oberflächentopographie durch bikubische Interpolation um den Faktor 5 hochskaliert (mit der `imresize()`-Funktion) und anschließend in  $0,1^\circ$  Schritten rotiert (mit der `imrotate()`-Funktion, welche eine bikubische Interpolation verwendet). Danach werden das Specklemuster bzw. die Oberflächentopographie wieder um den Faktor 5 herunterskaliert. Der Rotationswinkel  $\beta_{sp}$  ist der Winkel zwischen der  $x$ - und der  $\xi$ -Achse und  $\beta_{WLI}$  ist der Winkel zwischen der  $x$ - und der  $a$ -Achse. Die Auswertung zeigt, dass die Probe bei beiden Messungen nicht perfekt ausgerichtet war. Bei perfekter Ausrichtung sollte das Minimum der blauen Kurven bei  $\beta_{sp} = \beta_{WLI} = 0^\circ$  liegen, da die Bearbeitungsrichtung in  $x$ -Richtung definiert ist und in Bearbeitungsrichtung ein geringerer Specklekontrast bzw. eine geringere Rauheit als senkrecht zur Bearbeitungsrichtung erwartet werden. Das Minimum des Specklekontrasts  $C_\xi$  in Abbildung 4.9 (a) liegt bei  $\beta_{sp} = 88,6^\circ$ . Somit sind der Winkel der Bearbeitungsrichtung  $\beta = 88,6^\circ$  und  $C_\xi(\beta) = C_x$  sowie  $C_\eta(\beta) = C_y$ . Das Minimum der Rauheit  $S_{q,a}$  in Abbildung 4.9 (b) liegt bei  $\beta_{WLI} = 179,2^\circ$ . Dementsprechend sind der Winkel der Bearbei-

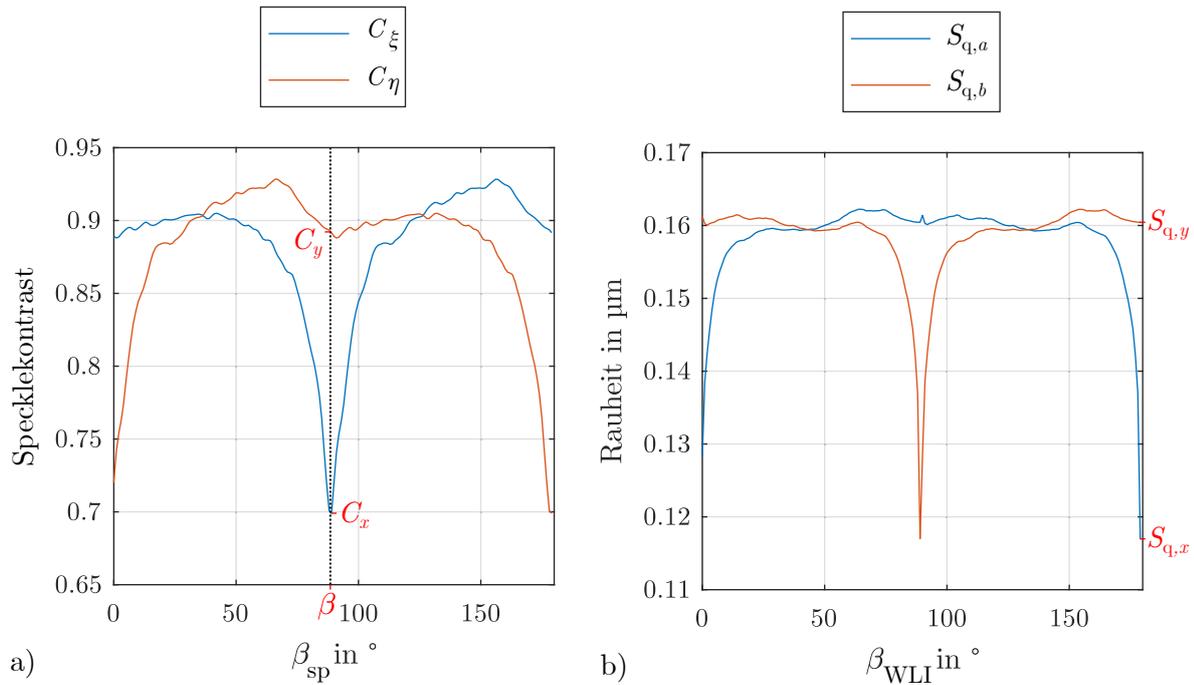


Abbildung 4.9: Bidirektionale Auswertung des Specklekontrasts (a) und der Rauheit mittels WLI-Referenzmessung (b) während einer schrittweisen Rotation des Specklemusters bzw. der Oberflächentopographie um  $180^\circ$ . Dabei sind der Rotationswinkel  $\beta_{sp}$  der Winkel zwischen der  $x$ - und der  $\xi$ -Achse und  $\beta_{WLI}$  der Winkel zwischen der  $x$ - und der  $a$ -Achse. Das Koordinatensystem der Oberflächentopographie ist  $(x, y)$ , wobei die Bearbeitungsrichtung in  $x$ -Richtung definiert ist.  $(\xi, \eta)$  ist das Koordinatensystem des Kamerasensors im Specklemessaufbau und  $(a, b)$  ist das Koordinatensystem des Kamerasensors des WLI bei der Referenzmessung.

tungsrichtung  $\beta = -0,8^\circ$  und  $S_{q,a}(\beta) = S_{q,x}$  sowie  $S_{q,b}(\beta) = S_{q,y}$ . Abbildung 4.9 zeigt, dass eine bidirektionale Kontrastauswertung ohne korrekte Ausrichtung ( $\beta = 0$ ) zu erheblichen Messabweichungen führt. Dies ist der Grund für die zweistufige Auswerterroutine, siehe Abbildung 4.3, bei der zuerst Bearbeitungsrichtung und Korrelationslänge bestimmt werden und erst anschließend die bidirektionale Kontrastauswertung erfolgt.

Abbildung 4.10 zeigt die bidirektionale Specklekontrastauswertung der vier *Rugotest Nr. 5*-Referenzproben N1–N4. In Abbildung 4.10 (a) sind die Auswertergebnisse nach manueller Ausrichtung der Oberflächennormale im Specklemessaufbau bzw. im WLI-Referenzmesssystem dargestellt. Da bei einer manuellen Ausrichtung immer kleine Winkelabweichungen auftreten, ist  $\beta \neq 0$ . Deshalb wurden die gemessenen Specklemuster bzw. Oberflächentopographien für die in Abbildung 4.10 (b) gezeigte Auswertung numerisch ausgerichtet. Dafür wurden die Rohdaten, wie in Abbildung 4.9 gezeigt, im Intervall von  $\beta_{sp} = \beta_{WLI} = [88^\circ, 92^\circ]$  in  $0,1^\circ$  Schritten rotiert und ausgewertet. Die Minima des Kontrasts  $C_x$  bzw. der Rauheit  $S_{q,x}$  ergeben die Werte bei idealer Ausrichtung, aus welchen sich die Kalibrierkurve Abbildung 4.10 (b) zusammensetzt.

Der Übergang von teilweise entwickelten Speckle (N2) zu voll entwickelten Speckle (N3) ist im gemessenen Specklekontrast  $C_y$  sichtbar. Von Probe N1 bis N2 nimmt der Kontrast stark zu und nähert sich dann bei den Proben N3 und N4 der oberen Sättigungsgrenze. Die Ergebnisse der Kontrastwerte  $C_x$  zeigen den Vorteil der bidirektionalen Auswertung. Während die Rauheit  $S_{q,y}$  von Probe N3 zu N4 stark zunimmt, bleibt die Rauheit  $S_{q,x}$  in Bearbeitungsrichtung nahezu gleich. Dieses Verhalten wird im Kontrast  $C_x$  korrekt dargestellt, wäre aber bei der standardmäßigen flächenhaften Specklekontrastauswertung nicht zu erkennen.

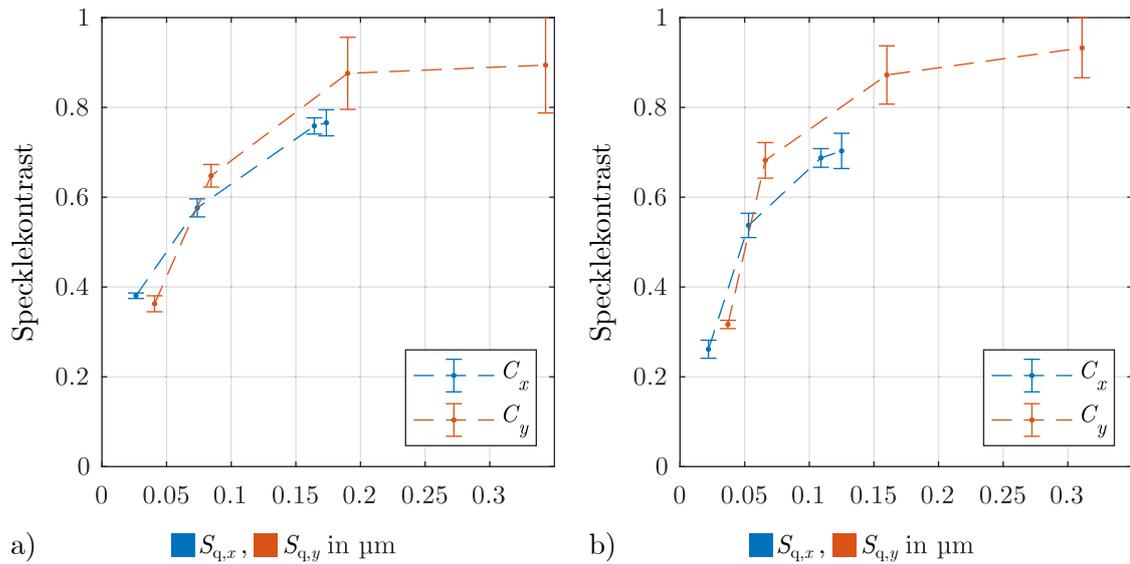


Abbildung 4.10: Bidirektionaler Specklekontrast  $C_x$  und  $C_y$  gemessen an *Rugotest* Nr. 5 Oberflächennormalen N1–N4. Die Rauheitswerte für  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  auf der Abszisse wurden mit einem WLI gemessen. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwerts über 5 Messungen an verschiedenen Positionen auf der Probe. (a) Zeigt die Ergebnisse bei manueller Ausrichtung, d. h.  $\beta \neq 0$ , der Oberflächennormale im Specklemessaufbau und der Referenzmessung. (b) Zeigt die Ergebnisse nach der numerischen Ausrichtung der Specklemuster, bzw. der mit dem WLI gemessenen Oberflächentopographien, gemäß Abbildung 4.9.

Die *Rugotest*-Ergebnisse stimmen qualitativ mit den SLM-Messungen überein, jedoch treten Abweichungen bei den absoluten Specklekontrastwerten auf. Dies ist auf die Unterschiede der auf dem SLM dargestellten Oberflächen im Vergleich zu den physikalischen Oberflächentopographien zurückzuführen. Die laterale räumliche Auflösung des SLM von  $8 \mu\text{m}$  führt im Vergleich zu den physikalischen Proben zu einer anderen Höhenverteilung, die auch die resultierenden Specklemuster verändert und andere Kalibrierkurven impliziert. Obwohl der SLM-Aufbau nicht direkt zur Kalibrierung des Messsystems verwendet werden kann, liefert er qualitativ valide Ergebnisse und ist prädestiniert für Parameterstudien und Messunsicherheitsanalysen, da eine viel größere Anzahl von Oberflächen mit definierten Parametern gemessen werden kann, als dies mit physikalischen Referenzproben möglich wäre.

## 4.2 Rauheitsmessung an komplexen Oberflächenformen

Die specklebasierte Oberflächencharakterisierung ist ein integrierendes Messverfahren, welches die Oberflächentopographie  $z(x, y)$  nicht direkt misst, sondern durch statistische Parameter beschreibt. Somit haben eine Veränderung der Oberflächenhöhenverteilung, z. B. durch ein anderes Fertigungsverfahren sowie eine Neigung, Krümmung oder Rotation der Oberfläche einen Einfluss auf den Messwert, werden aber durch die Messung nicht direkt erfasst. Deshalb werden in diesem Abschnitt die Querempfindlichkeiten der specklebasierten Rauheitsmessung anisotroper Oberflächen bezüglich Neigung, Krümmung und Orientierung der Bearbeitungsrichtung untersucht. Diese Untersuchung der Querempfindlichkeiten bildet die Grundlage für die Kompensation systematischer Messabweichungen, die bei einer Rauheitsmessung an komplexen Oberflächenformen auftreten.

Dafür wird zunächst in Abschnitt 4.2.1 der Messaufbau des specklebasierten Rauheitssensors beschrieben. Die Kalibrierkurven der bidirektionalen Rauheitsmessung des Sensors werden mit referenzierten Oberflächennormalen bestimmt. Dabei ermöglicht ein 6-Achs-Industrieroboter eine flexible Orientierung der Oberflächenproben. Mit diesem Messaufbau werden zunächst die zufälligen Messabweichungen und anschließend die systematischen Messabweichungen aufgrund einer Rotation um die optische Achse sowie in Abschnitt 4.2.2 aufgrund einer Neigung senkrecht zur optischen Achse bzw. in Abschnitt 4.2.2 aufgrund einer Krümmung der Oberfläche quantifiziert.

### 4.2.1 Experimenteller Aufbau

#### Messaufbau

Die Untersuchung der Querempfindlichkeiten der Charakterisierung anisotroper Oberflächen wird mit einem Specklesensor durchgeführt, welcher autokorrelationsbasiert arbeitet. Bei diesem Messprinzip wird die zweidimensionale Autokorrelationsfunktion des Specklemusters ausgewertet, siehe Abschnitt 2.3.4. Laser, optische Komponenten und Kamera des Sensors sind in einem Gehäuse verbaut. Dieser Demonstratoraufbau stammt aus einem bereits abgeschlossenen Forschungsprojekt des BIMAQ mit Industriebeteiligung und wurde dankenswerterweise von der Tata Steel Plating – Hille & Müller GmbH für die Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation zur Verfügung gestellt. An dieser Stelle sei verwiesen auf Veröffentlichungen bezüglich der Entwicklung [Pat2016], In-Prozess-Charakterisierung [Pat2017] und Messunsicherheitsanalyse [Pat2019] des Specklesensors.

Abbildung 4.11 zeigt ein Foto und ein Schema des Specklesensors. Aufbau und Programmierung des Sensors waren nicht Teil der vorliegenden Arbeit, sondern sind in Vorarbeiten [Pat2019] am BIMAQ erfolgt. Die Beleuchtungsquelle ist ein gepulster Diodenlaser mit der Wellenlänge 532 nm. Um eine homogene Intensitätsverteilung zu erreichen, wird eine polarisationserhaltende Singlemode-Faser als Raumfilter eingesetzt. Die Faser bietet gegenüber einer Lochblende den Vorteil, dass keine unerwünschten Beugungseffekte durch eine Beleuchtung des Blendenrands mit dem leicht elliptischen Strahlprofil der Laserdiode auftreten [Pat2017]. Nach der Tiefpassfilterung in der Raumfrequenzebene wird der Laserstrahl aufgeweitet, kollimiert und mittels einer Strahlteiler-Keilplatte senkrecht auf die Oberfläche des Messobjekts gelenkt. Das resultierende Streulicht wird mit der 2 Megapixel CMOS-Kamera *STC-CMB2MCL* von Sentech aufgezeichnet. Um in-Prozess bewegte Messobjekte mit Bildraten  $> 300$  Bilder pro Sekunde erfassen und in Echtzeit auswerten zu können, ist eine Bildverarbeitung mittels FPGA in das Sensorgehäuse integriert. In dem integrierten Schaltkreis werden die Autokorrelationsfunktion des Specklemusters nach der in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Methode berechnet und daraus die Parameter  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  ausgewertet, welche anschließend über eine Ethernet-Verbindung ausgelesen werden können.

Um die Oberflächenproben flexibel zu positionieren und automatisierte Messreihen durchführen

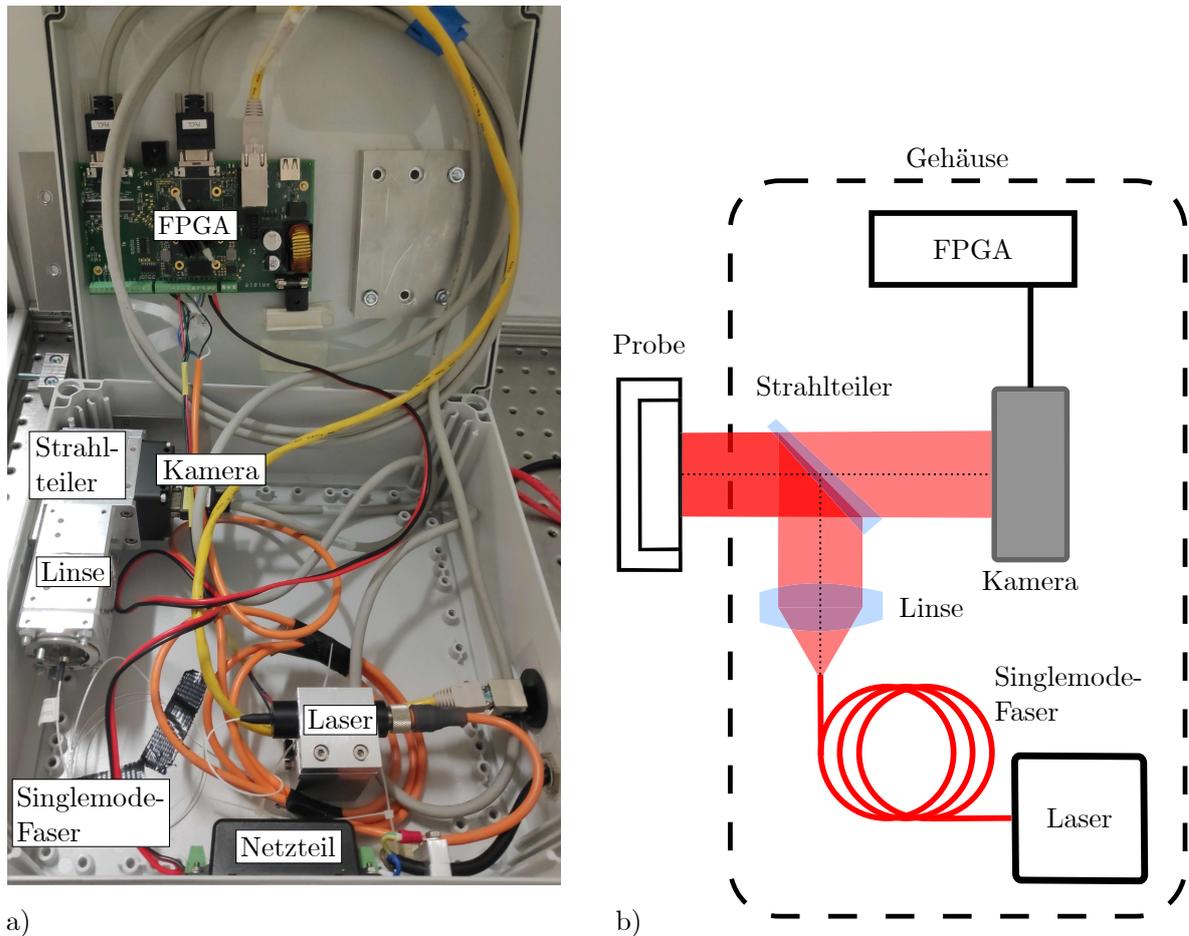


Abbildung 4.11: (a) Foto und (b) schematische Darstellung des Specklesensors.

zu können, wird der 6-Achs-Industrieroboter *HORST600* von fruitcore robotics eingesetzt. Die Motivation der Untersuchungen ist eine In-situ-Positionierung des Specklesensors mit dem Roboter in der Fertigungstechnik. Die Masse des Specklesensors einschließlich Gehäuse und Netzteil übersteigt allerdings aktuell noch die maximale Traglast des Roboters, weshalb für die folgenden Untersuchungen zunächst die Proben am Roboter montiert wurden, während der Sensor auf der Grundplatte fest verschraubt ist. Abbildung 4.12 zeigt den Roboter mit Probenadapter und dem geschlossenen Sensorgehäuse. Der Roboter hat ein Arbeitsbereich von knapp  $1\text{ m}^3$  und eine maximale Traglast von  $3\text{ kg}$ . Die Wiederholgenauigkeit beträgt laut Datenblatt  $\pm 0,05\text{ mm}$ . Daraus resultiert für die Position der Proben in den folgenden Untersuchungen eine größere Unsicherheit, als sich beispielsweise mit dem Piezo-Präzisionspositionierer oder dem Rotationssteller, welche in Abschnitt 3.1 verwendet wurden, erreichen ließen. Ziel der folgenden Untersuchungen ist allerdings nicht, eine möglichst geringe Messunsicherheit im Laborversuch zu demonstrieren, sondern die Messabweichungen für einen Messaufbau zu charakterisieren, welcher die Flexibilität für verschiedene fertigungstechnische Anwendungen bietet. Mittels dem 6-Achs-Roboter kann der Sensor, bzw. die Probe, frei bewegt werden. So lassen sich zwischen den Prozessschritten automatisiert eine oder mehrere Messpositionen anfahren, welche im Prozess nicht zugänglich sind oder den Sensor schädigen würden. Zusätzlich zur Translation erlaubt der Roboter eine Rotation um eine beliebige Achse des Sensors bzw. der Probe. Dafür kann in die Steuerungssoftware des Roboters ein 3D-Modell des am Roboter befestigten Objekts geladen werden und auf diesem die Rotationsachse spezifiziert werden.

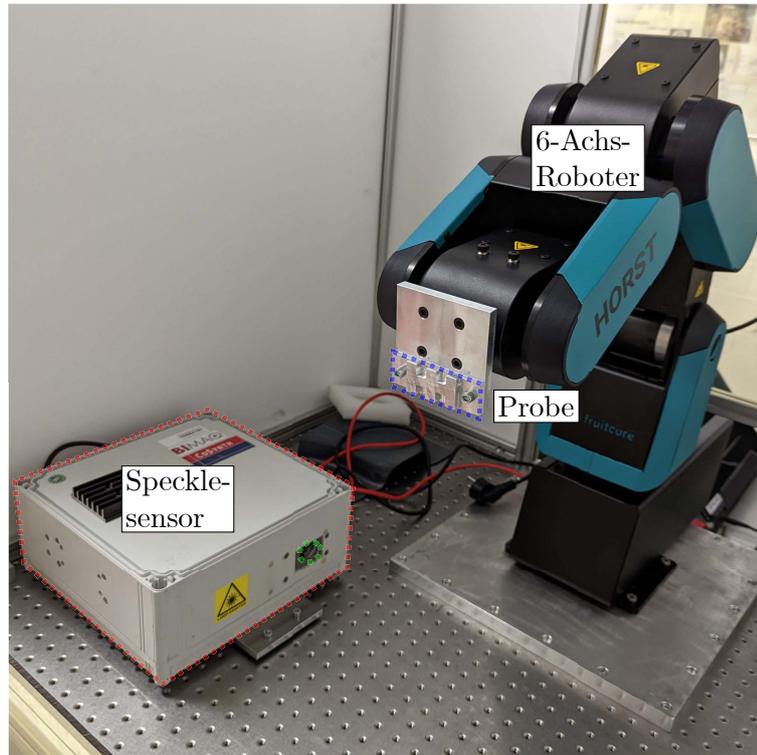


Abbildung 4.12: Messaufbau, bestehend aus eingehaustem Specklesensor und dem 6-Achs-Industrieroboter *HORST600* mit montierter Probe. Das Sichtfenster des Specklesensors ist grün markiert. Für die Messung wird die Probe durch den Roboter vor dem Sichtfenster und senkrecht zum Laserstrahl ausgerichtet.

## Kalibrierung

Zur Kalibrierung des Specklesensors wurden erneut die in Abbildung 4.1 gezeigten *Rugotest Nr. 5*-Oberflächennormale der Rauheitsklassen N0–N4 verwendet. Wie in Abschnitt 4.1.4 beschrieben, wurde für die Referenzmessung der Oberflächenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  ein WLI eingesetzt. Dafür wurden die mittels WLI gemessenen Oberflächentopographien numerisch so ausgerichtet, dass die Bearbeitungsrichtung  $x$  der Probe mit der  $\xi$ -Achse des Kamerasensors zusammenfällt, d. h.  $\beta = 0$ . Abbildung 4.13 zeigt die gemessenen Datenpunkte und eine nach Akima [Aki1970] modifizierte kubische Hermiteinterpolation. Die Interpolation wurde durchgeführt, um eine Lookup-Tabelle zu generieren, mit der sich in den folgenden Untersuchungen die Parameter  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  in SI-Einheiten umrechnen lassen. Der Kurvenverlauf von  $R_{\text{opt},y}$  entspricht der in [Pat2019] gemessenen Kalibrierfunktion. Zunächst steigt  $R_{\text{opt},y}$  schnell an (N0–N2), und danach flacht die Kalibrierkurve ab (N3–N4). Die genaue Position des Übergangs zwischen den beiden Bereichen lässt sich aufgrund der geringen Probenanzahl nicht exakt bestimmen. Die Absolutwerte für  $R_{\text{opt},y}(S_{\text{opt},y})$  entsprechen nicht genau den in [Pat2019] gezeigten, was sich auf eine unterschiedliche Oberflächenhöhenverteilung bzw. laterale Korrelationslänge zurückführen lässt. Auch in [Pat2019] wurde eine anisotrope Oberflächentopographie gemessen, allerdings wird dort nur eine Kalibrierkurve gezeigt, welche mutmaßlich  $R_{\text{opt},y}(S_{q,y})$  entspricht. In Abbildung 4.13 ist zudem die Kalibrierkurve für  $R_{\text{opt},x}(S_{q,x})$  in blau gezeigt. Hier ist die Sensitivität im Vergleich zu der roten Kurve geringer, die grundlegende Charakteristik ist allerdings vergleichbar. Im Vergleich mit der in Abbildung 4.10 (b) gezeigten auf dem Specklekontrast basierten Auswertung ist außerdem ein größerer Messbereich zu beobachten. Während der Kontrast in  $y$ -Richtung für die N3-Probe schon nahezu gesättigt ist ( $C_y(\text{N3}) = 0,94 \cdot C_y(\text{N4})$ ), wird die Sättigung bei der

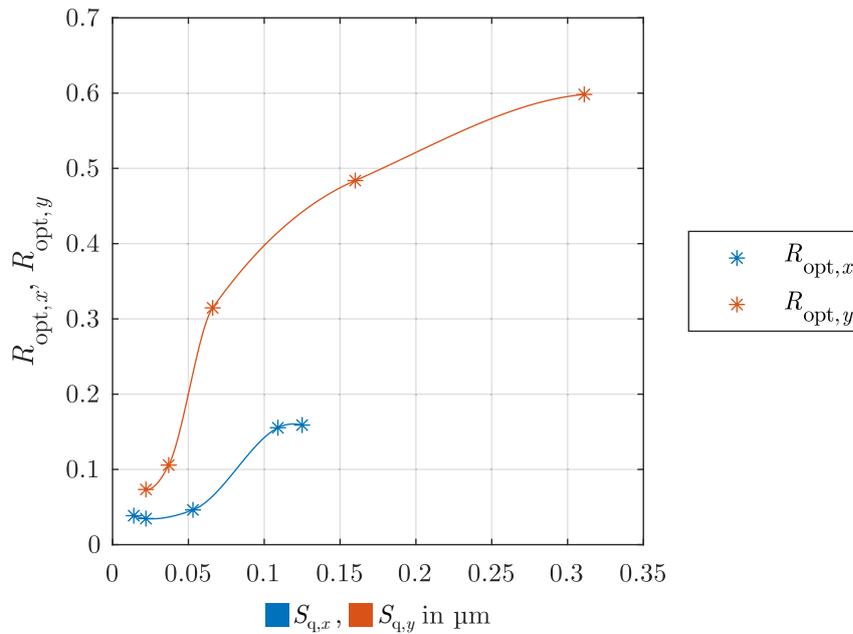


Abbildung 4.13: Interpolierte Kalibrierkurve der autokorrelationsbasierten Auswerteparameter  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  gemessen an den *Rugotest Nr. 5*-Oberflächennormalen der Rauheitsklassen N0–N4. Die Referenzmessung der Oberflächenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  ist mit einem WLI erfolgt.

autokorrelationsbasierten Auswertung erst später erreicht ( $R_{\text{opt},y}(\text{N3}) = 0,75 \cdot R_{\text{opt},y}(\text{N4})$ ).

Die zufälligen Messabweichungen des Specklesensors wurden durch Wiederholmessungen an der gleichen Probenposition quantifiziert. Die Standardunsicherheiten der Einzelmessungen liegen zwischen 1 nm und 2 nm bzw. 0,3% bis 1,2% des Messwerts. Die Konfidenzintervalle für die Standardabweichungen der Mittelwerte wurden nicht ins Diagramm eingezeichnet, da sie aufgrund der geringen Werte nicht lesbar wären.

Um darüber hinaus die richtungsabhängige Rauheitsmessung auf Basis der Autokorrelationsfunktion des Specklemusters zu demonstrieren, wurde die *Rugotest Nr. 5* N2-Probe während einer Messung schrittweise um  $360^\circ$  um die optische Achse senkrecht zur Probenoberfläche rotiert. Abbildung 4.14 zeigt die Auswertung von  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  während der Messung. Aufgrund der Spiegelsymmetrie der Autokorrelationsfunktion, siehe Abbildung 2.18 (a), ist der Verlauf von  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  über den Rotationswinkel  $\beta$  periodisch. Wie zu erwarten sind  $R_{\text{opt},y}(\beta = 0^\circ) \approx R_{\text{opt},y}(\beta = 90^\circ)$  und  $R_{\text{opt},x}(\beta = 0^\circ) \approx R_{\text{opt},x}(\beta = 90^\circ)$ . Im Gegensatz zu der in Abbildung 4.9 gezeigten kontrastbasierten Auswertung ist bei der autokorrelationsbasierten Auswertung ein stetiger Verlauf von  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  über  $\beta$  zu beobachten, bei dem  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  in einem  $90^\circ$ -Intervall nahezu proportional zu  $\beta$  sind. Somit demonstriert Abbildung 4.14 die Richtungsabhängigkeit der Auswerteparameter  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$ . Zudem können die systematischen Messabweichungen auch durch eine fehlerhafte Ausrichtung hervorgerufen werden. Eine Abweichung von  $\Delta\beta = 9^\circ$  an den Extremwerten von  $R_{\text{opt},x}$  oder  $R_{\text{opt},y}$  ergibt im Mittel ein  $\Delta R_{\text{opt},y} \approx 0,01$ , was nach der Kalibrierkurve aus Abbildung 4.13 einer Abweichung  $\Delta S_{q,y} \approx 3,5$  nm entspricht. Anders als bei der auf dem Specklekontrast basierten Auswertung, siehe Abbildung 4.9, sind kleine Winkelabweichungen eher unbedenklich. Die Winkelabweichungen  $\beta_{\text{sp}}$  können zwar numerisch korrigiert werden, dadurch wird aber die prozessbegleitende Messung und Auswertung deutlich verlangsamt.

Zuletzt werden Messabweichungen aufgrund der Wiederholgenauigkeit des Roboters untersucht. In Abbildung 4.15 sind die absoluten und relativen Messabweichungen bezüglich des Mit-

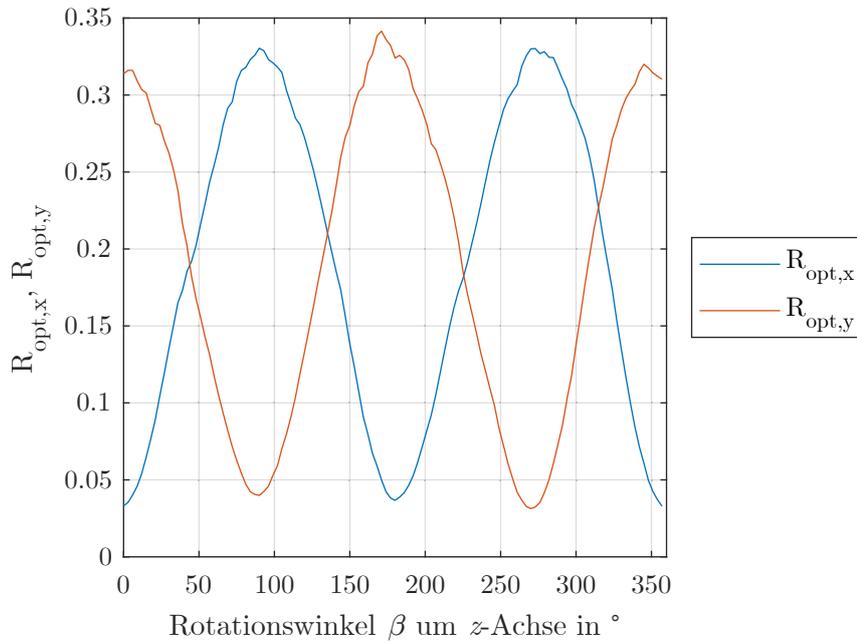


Abbildung 4.14: Auswertung von  $R_{opt,x}$  und  $R_{opt,y}$  bei der *Rugotest Nr. 5* N2-Probe. Die Probe wird dabei um die  $z$ -Achse, welche der optischen Achse entspricht, rotiert.

telwerts von 10 Wiederholmessungen aufgetragen. Dabei wurde die *Rugotest Nr. 5* N2-Probe mit dem Roboter zwischen den Einzelmessungen in eine andere Position gefahren, wobei an allen 6 Achsen des Roboters eine Bewegung ausgeführt werden musste. Die zufälligen Messabweichungen von  $R_{opt,x}$  und  $R_{opt,y}$  wurden mittels der Kalibrierkurve aus Abbildung 4.13 in Abweichungen von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  umgerechnet. Die Standardunsicherheit von  $S_{q,x}$  ergibt sich zu 0,2 nm bzw. 0,3 %

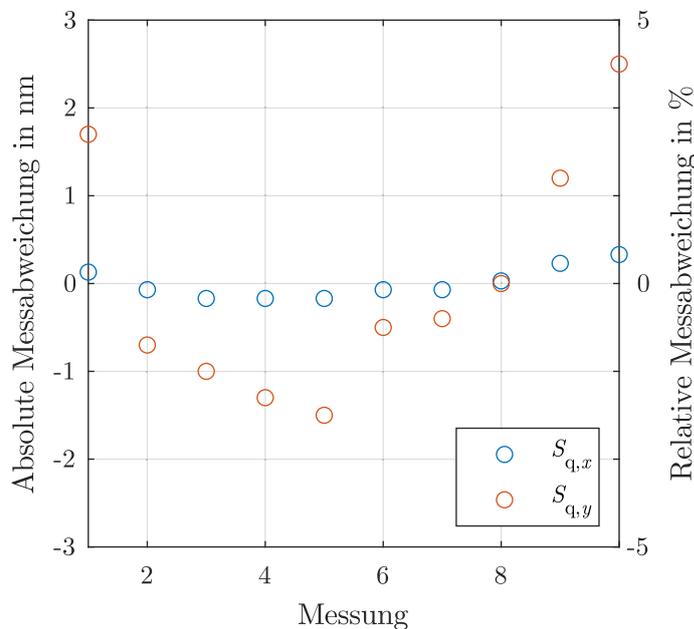


Abbildung 4.15: Wiederholmessung an der *Rugotest Nr. 5* N2-Probe. Zwischen den Messungen wird der Roboter in eine andere Position gefahren, um die Messabweichungen aufgrund der Wiederholgenauigkeit des Roboters zu quantifizieren.

und die Standardunsicherheit von  $S_{q,y}$  ergibt sich zu 1,4 nm bzw. 2,6 %. Aus dieser Untersuchung lässt sich allerdings noch nicht bestimmen, zu welchem Anteil die Messabweichungen durch translatorische Positionsabweichungen oder durch eine fehlerhafte Neigung der Probe entstanden sind. Insgesamt sind die roboterbedingten relativen Messabweichungen im kleinen einstelligen Prozentbereich aber gering genug, dass sich der Ansatz für die Untersuchung der systematischer Effekte von Neigung und Krümmung der Probenoberfläche eignet.

#### 4.2.2 Querempfindlichkeit bezüglich Oberflächenform

##### Neigung

Um die Querempfindlichkeit bezüglich einer Neigung der Oberfläche zu quantifizieren, wird die *Rugotest Nr. 5 N2*-Probe mit dem Roboter in  $0,1^\circ$  Schritten um die  $x$ -Achse geneigt. Die dabei gemessene Werte von  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$  werden mittels der Kalibrierung in  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  umgerechnet. Eine Neigung gegenüber der senkrechten Einstrahlung bewirkt eine positive systematische Messabweichung bei  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$ . Die systematischen Messabweichungen in Abhängigkeit des Neigungswinkels  $\alpha_x$  um die  $x$ -Achse sind für  $S_{q,x}$  in Abbildung 4.16 (a) und für  $S_{q,y}$  in Abbildung 4.16 (b) aufgetragen. Auf einer zweiten  $y$ -Achse sind jeweils die Messabweichungen relativ zum Messwert in % angegeben. Die Messabweichungen von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  sind in der aktuellen Ausrichtung für  $\alpha_x \approx -0,4^\circ$  minimal und steigen unabhängig von der Richtung der Neigung nahezu symmetrisch linear an. Die Verschiebung der Nulllage und die leichte Asymmetrie sind Auswirkungen einer nicht ideal senkrechten Ausrichtung der Probe mit dem Roboter. Bei der Ausrichtung gibt es drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade. In der Messposition sollte der Ursprung des  $(x, y, z)$ -Koordinatensystems der Probenoberfläche im optischen Pfad, d. h. der Mitte des Sichtfelds, liegen. Zudem sollte die Probe um keine der drei Achsen geneigt sein. Die auftretenden Messabweichungen durch Rotation um die  $z$ -Achse wurde bereits in Abbildung 4.14 gezeigt. Dabei sind  $\alpha_x \neq 0 \vee \alpha_y \neq 0$ , d. h. eine Rotation um die  $x$ -, oder  $y$ -Achse, Quereinflüsse. Bei Bestimmung der Messabweichungen bezüglich  $\alpha_x$  sind  $\alpha_y \neq 0 \vee \alpha_z \neq 0$  unerwünschte Quereinflüsse. Durch eine iterative Justierung der drei Achsen wird versucht, in Abbildung 4.16 eine symmetrische Kurve mit Ursprung bei  $\alpha_x = 0$  zu erhalten. Gewisse Ab-

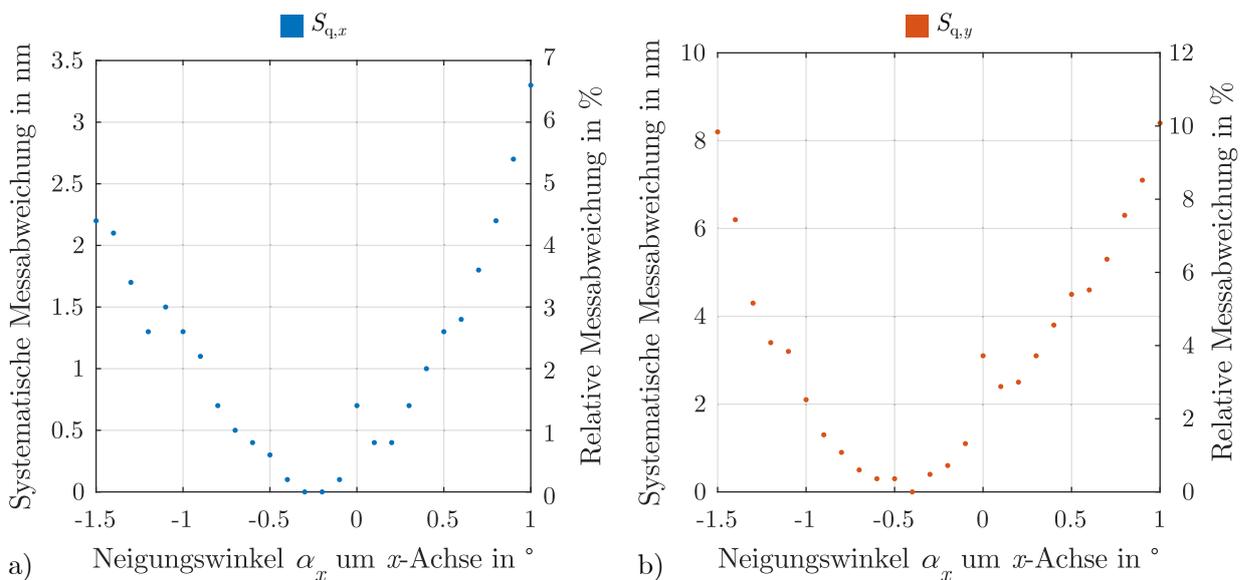


Abbildung 4.16: Systematische Messabweichung von (a)  $S_{q,x}$  und (b)  $S_{q,y}$ . Dabei wurde die *Rugotest Nr. 5 N2*-Probe mit dem Roboter in  $0,1^\circ$  Schritten um die  $x$ -Achse geneigt.

Tabelle 4.1: Höhen der Scheitellinien und Krümmungsradien  $r_k$  der gekrümmten Proben. Nummerierung siehe Abbildung 4.17.

Probe Nr.	Höhe	$r_k$
1	0 mm	$\infty$ mm
2	0,5 mm	624,5 mm
3	1 mm	313,0 mm
4	3 mm	105,0 mm
5	5 mm	65,0 mm
6	7 mm	48,0 mm
7	9 mm	39,1 mm
8	11 mm	33,3 mm
9	13 mm	30,2 mm

weichungen von der Ideallage bleiben aber, vor allem bei Messungen im fertigungstechnischen Umfeld, immer bestehen. Wenn die Möglichkeit einer Referenzmessung der Probenlage besteht, kann diese jedoch für eine Korrektur der systematischen Messabweichungen verwendet werden.

Symmetrische, positive Messabweichungen in Abhängigkeit des Neigungswinkels sind bei der specklebasierten Auswertung isotroper Oberflächentopographien bekannt. In [Fis2023b] wurden mittels einer Simulation die relativen Messabweichungen von  $S_q$  bei Auswertung des Specklekontrasts für eine Neigung im Intervall  $[-0,4^\circ, 0,4^\circ]$  untersucht. Die relative Messabweichung in Abhängigkeit des Neigungswinkels beträgt nach dieser Studie ungefähr  $0,6\%/^\circ$ . Im Vergleich zu den Ergebnissen dieser simulativen Untersuchung liegen die hier experimentell bestimmten relativen Messabweichungen etwa eine Größenordnung höher. Zudem unterscheiden sich sowohl die systematischen, als auch die relativen Messabweichungen von  $S_{q,x}$  mit  $2,2\text{ nm}/^\circ$  bzw.  $4,4\%/^\circ$  und von  $S_{q,y}$  mit  $6,6\text{ nm}/^\circ$  bzw.  $7,9\%/^\circ$ . Für die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der beiden Studien gibt es verschiedene Gründe: Zum einen die Limitationen der Simulation, in welcher sich die Neigung der Oberflächentopographie einzig durch eine Anpassung des Höhenwerts in Abhängigkeit von Position und Neigungswinkel ergibt. Die Neigung gegenüber dem optischen Pfad und die daraus resultierende schräge Beleuchtung der einzelnen Oberflächenelemente wird für kleine Neigungswinkel vernachlässigt. Ein weiterer Unterschied ergibt sich aus dem Messaufbau. Während in der Simulation das subjektive Specklemuster mittels einer 4- $f$ -Konfiguration auf den Kamerasensor abgebildet wird, wird im experimentellen Aufbau das objektive Specklemuster ohne abbildende Optik erfasst, siehe Abbildung 4.11 (b). Den wahrscheinlich größten Einfluss hat allerdings das betrachtete Winkelintervall, welches etwa um einen Faktor drei größer ist. Die detaillierte Untersuchung des Kleinwinkelverhaltens wird allerdings durch die Wiederholgenauigkeit des Roboters limitiert. Somit ist eine quantitative Aussage zunächst nur bei Mittelung über das etwas größere Winkelintervall  $[-1,25^\circ, 1,25^\circ]$  möglich.

### Krümmung

Die experimentelle Untersuchung der Querempfindlichkeit bezüglich einer Krümmung erfordert die Fertigung von dedizierten Proben. Bei diesen Proben sollte die Feinstruktur, d. h. die Oberflächenhöhenverteilung abzüglich der Krümmung, ähnlich bleiben, während der Krümmungsradius variiert wird. Abbildung 4.17 zeigt die neun gefrästen Aluminiumproben, welche für die Versuchsreihe gefertigt wurden. In Tabelle 4.1 sind die Krümmungsradien  $r_k$  der gekrümmten Proben aufgetragen. Probe Nr. 1 ist plan, und mit aufsteigender Proben-Nr. nimmt die Höhe der Scheitellinie zu bzw. der Krümmungsradius ab.

Um für die gekrümmten Proben Referenzwerte von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  zu erhalten, wurde die Ober-

flächentopographie der Proben mit dem WLI gemessen. Abbildung 4.18 (a) zeigt exemplarisch einen Ausschnitt der Oberflächentopographie von Probe Nr. 9. Die Scheitellinie verläuft in  $y$ -Richtung, und senkrecht dazu sind Bearbeitungsriefen sichtbar. Die Feinstruktur der Probe lässt sich aber erst nach Subtraktion der Krümmung charakterisieren. Dafür wurde in  $x$ - und  $y$ -Richtung ein Polynomfit dritter Ordnung durchgeführt und das Ergebnis von der gemessenen Oberflächentopographie subtrahiert. So werden sowohl die Krümmung als auch eine potenzielle Neigung der Oberfläche korrigiert. Anschließend wurden Ausreißer mit einem *generalized extreme Studentized deviate test* (`findmethod 'gesd'` in MATLAB) detektiert und durch den Median ersetzt. Abbildung 4.18 (b) zeigt die Oberflächentopographie von Probe Nr. 9 nach Entfernung der Krümmung und der Ausreißer. Um schließlich die Referenzwerte von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  zu berechnen, wurde die Bearbeitungsrichtung der Oberflächentopographie, analog zur Kalibrierung, numerisch in  $x$ -Richtung ausgerichtet. Diese Referenzmessung wurde für jede Probe an drei Positionen entlang der Scheitellinie durchgeführt. Die Mittelwerte und die Standardabweichung der

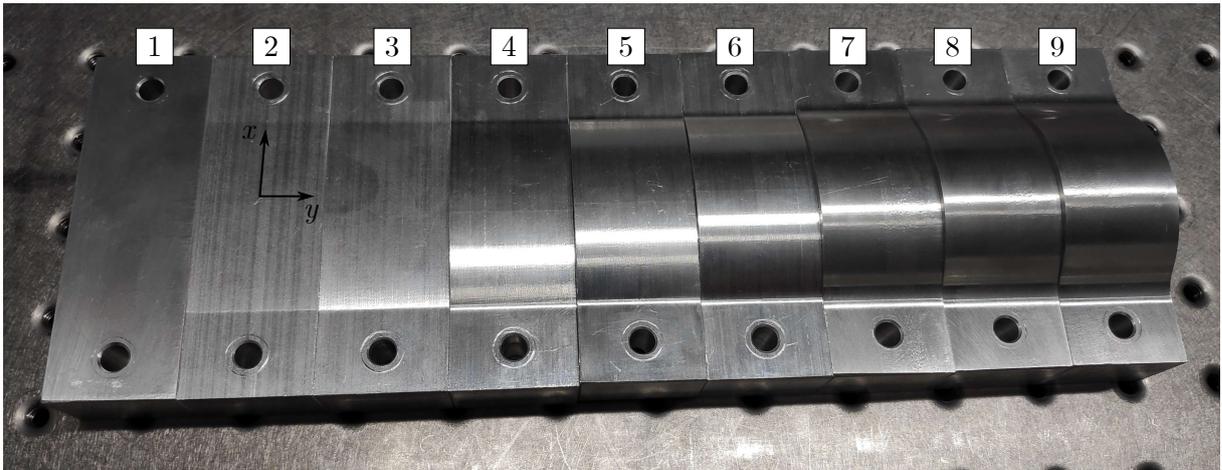


Abbildung 4.17: Geprägte Aluminiumproben zur Untersuchung des Quereinflusses der Krümmung. Krümmungsradien der einzelnen Proben siehe Tabelle 4.1. Die  $y$ -Achse des Probenkoordinatensystems verläuft entlang der Scheitellinie.

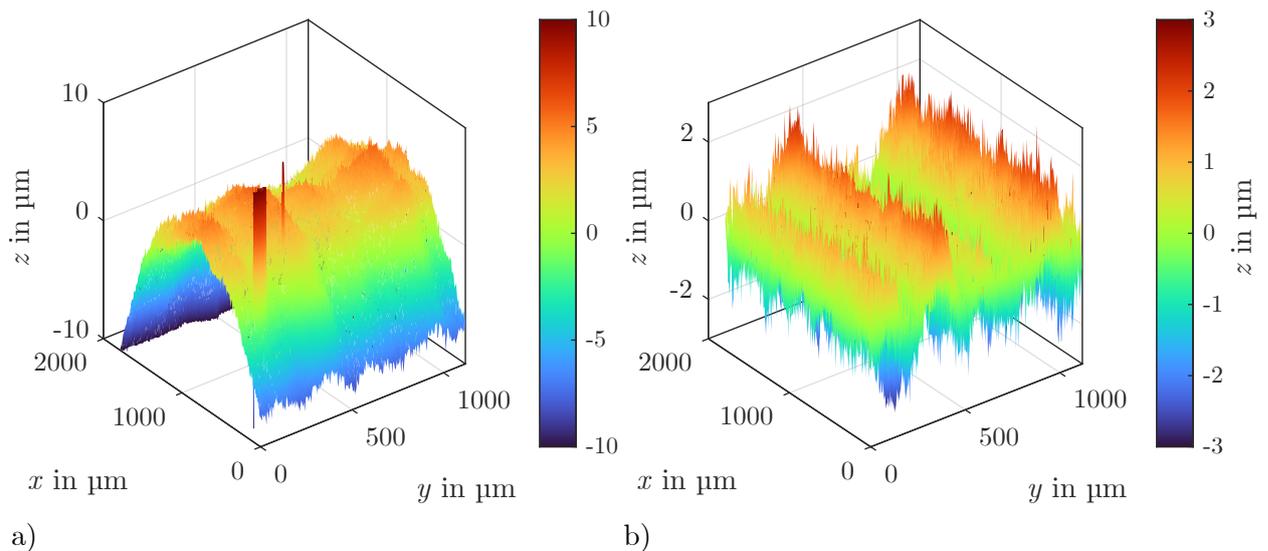


Abbildung 4.18: (a) Mit dem WLI gemessene Oberflächentopographie der Probe Nr. 9. (b) Oberflächentopographie nach Entfernen von Krümmung und Ausreißern.

Mittelwerte der Referenzmessungen sind in Abbildung 4.19 (a) über das Verhältnis aus dem Radius  $r_m$  des Messflecks des Specklesensors und dem Krümmungsradius  $r_k$  der Proben aufgetragen. Dieses Verhältnis ist eine dimensionslose Kenngröße, welche die Krümmung im Auswertebereich beschreibt. Sowohl  $r_m$  als auch  $r_k$  haben einen Einfluss auf die systematischen Messabweichungen des Specklesensors. In der gezeigten Versuchsreihe bleibt  $r_m$  konstant, während  $r_k$  gemäß Tabelle 4.1 reduziert wird. Bis auf einen Ausreißer der Probe Nr. 7 bleiben die korrigierten Werte von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  bei zunehmender Krümmung nahezu konstant. Bei  $S_{q,y}$  ist die Streuung allerdings deutlich größer als bei  $S_{q,x}$ .  $S_{q,y}$  wird maßgeblich durch die Ausprägung der Bearbeitungsriefen bestimmt, welche deutlich breiter sind als die laterale Länge der Höhenvariationen in  $x$ -Richtung. Somit ist die Stichprobe der Höhenvariationen in  $y$ -Richtung geringer und die Streuung dementsprechend größer.

Die Messergebnisse des Specklesensors sind in Abbildung 4.19 (b) gezeigt. Während der Parameter  $R_{opt,x}$  mit dem größer werdenden Verhältnis  $r_m/r_k$  deutlich abnimmt, bleibt  $R_{opt,y}$  nahezu konstant. Dieses Verhalten zeigt sich auch nach Umrechnung von  $R_{opt,x}$  und  $R_{opt,y}$  in SI-Einheiten. Abbildung 4.19 (c) zeigt die mittels der Kalibrierung berechneten Werte von  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$ . Dafür wurde die Kalibrierkurve von  $R_{opt,y}$  bis zu einem Wert von 0,75 extrapoliert. Bei der Interpretation der kalibrierten Ergebnisse ist allerdings zu beachten, dass die auf den handpolierten Oberflächennormalen basierende Kalibrierung für die gefrästen und gekrümmten Proben nur eine eingeschränkte Gültigkeit besitzt. Zudem liegt die Rauheit  $S_{q,y} \approx 0,7 \mu\text{m}$  außerhalb des Messbereichs des Specklesensors, d. h., für diese Rauheit hat  $R_{opt,y}$  bereits seinen Maximalwert erreicht. Deshalb liegen die Werte von  $R_{opt,x}$  und  $R_{opt,y}$  der Probe Nr. 1 beide bei  $\approx 0,7$ , dem Sättigungswert. Die Sättigung von  $R_{opt,y}$  bewirkt für  $S_{q,y}$  bei allen Proben (mit Ausnahme des Ausreißers Nr. 7) eine systematische Messabweichung von  $0,3 \mu\text{m}$  bzw. eine relative Messabweichung von  $\approx 40\%$ . In Abbildung 4.19 (d) sind die systematischen Messabweichungen dargestellt, welche aus der Differenz der Referenzmessung, siehe Abbildung 4.19 (a), und der specklebasierten Messung, siehe Abbildung 4.19 (c), berechnet wurden. Der Ausreißer (Probe Nr. 7) ist bei Betrachtung der systematischen Messabweichung besonders prominent, da mit dem WLI gemessene lokale Rauheitsspitzen durch die integrative specklebasierte Messung geglättet werden.

Die Simulation aus [Fis2023b] ergibt für  $r_m/r_k = 0,017$  eine relative Messabweichung von  $\approx 0,1\%$ . Im Vergleich dazu ergibt die experimentelle Untersuchung bei Probe Nr. 2 mit  $r_m/r_k = 0,016$  eine relative Messabweichung von  $\approx 13\%$ . Somit besteht, wie auch bei der im vorigen Abschnitt 4.2.2 diskutierten Neigung, eine Diskrepanz zwischen den auf isotrope Proben bezogenen Simulationsergebnissen und dem Experiment an anisotropen Proben. Obwohl die Absolutwerte der systematischen Messabweichung aufgrund der extrapolierten Kalibrierung unsicherheitsbehaftet sind, zeigen die Ergebnisse aus Abbildung 4.19 doch die Validität der specklebasierten anisotropen Rauheitsmessung. Denn die gemessene Rauheit  $S_{q,y}$  senkrecht zu der Krümmung bleibt durch einen kleineren Krümmungsradius weitestgehend unbeeinflusst, während die parallel zur Krümmung gemessene Rauheit  $S_{q,x}$  nahezu linear mit dem Verhältnis  $r_m/r_k$  korreliert.

### 4.3 Fazit

In diesem Kapitel wurde die multiparametrische Charakterisierung unidirektional gefertigter Oberflächen experimentell untersucht. Mittels der in Abschnitt 2.3 vorgeschlagenen Messansätze konnten die vier Messgrößen Bearbeitungsrichtung  $\beta$ , laterale Autokorrelationslänge  $S_{al,y}$  sowie die mittleren quadratischen Höhen  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  aus einem einzigen Specklemuster bestimmt werden. Um die Messbereichsgrenzen und Messunsicherheit dieser Ansätze empirisch zu quantifizieren, wurde ein phasenbasierter SLM als Referenztopographie eingesetzt. Dies erlaubt die Emulation einer Vielzahl von Oberflächentopographien mit vordefinierten Parametern. Ein Vergleich der Messergebnisse aus der SLM-Emulation mit Messergebnissen von physischen Referenzoberflä-

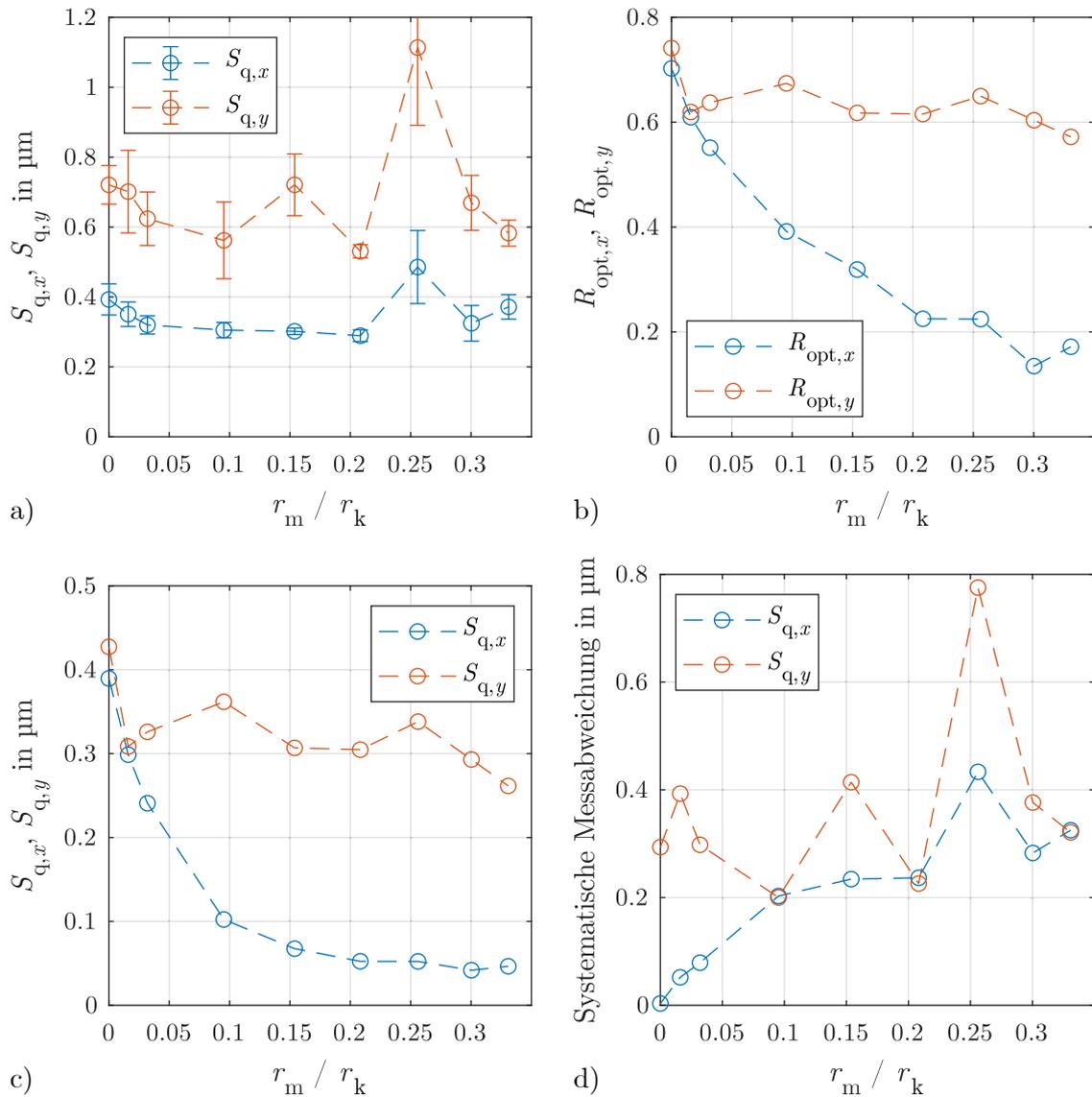


Abbildung 4.19: (a) Referenzmessung der Oberflächenrauheiten mittels WLI. An jeder Probe wurden drei Messungen entlang der Scheitellinie durchgeführt. Von den gemessenen Oberflächentopographien wurden die Krümmungen subtrahiert, Ausreißer entfernt und die Scheitellinien parallel zur  $y$ -Achse ausgerichtet. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwerts.  $r_m$  ist der Radius des Messflecks des Specklesensors auf der Probe und  $r_k$  ist der Krümmungsradius der Probe. (b) Mit dem Specklesensor gemessene Parameter  $R_{\text{opt},x}$  und  $R_{\text{opt},y}$ . (c) Anwendung der Kalibrierung auf Messdaten des Specklesensors. (d) Berechnung der systematischen Messabweichung durch Subtraktion der Werte aus (c) von (a).

chen zeigt bei den Kalibrierkurven von  $S_{al,y}$ ,  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  einen qualitativ ähnlichen Verlauf mit signifikanten systematischen Abweichungen. Hauptursachen für die Abweichungen der Emulation von der Realität sind ein geringerer dynamischer Bereich des Specklekontrasts und die laterale räumliche Auflösung des SLM von  $8\ \mu\text{m}$ . Somit lassen sich die Kalibrierkurven aus der SLM-Emulation noch nicht direkt in die Anwendung übertragen, erlauben aber qualitative Aussagen über die Messeffekte und die Bestimmung von relativen Messabweichungen.

Die Auswertung des zweidimensionalen Amplitudenspektrums des Specklemusters erlaubt die Bestimmung von  $\beta$  und  $S_{al,y}$ . Der Messbereich der lateralen Korrelationslänge  $S_{al,y}$  beträgt etwa  $20\ \mu\text{m}$  bis  $70\ \mu\text{m}$  mit einer relativen Messunsicherheit  $< 1,5\%$ . Mehrfachmessungen mit 100 gleichen sowie 100 zufällig generierten Referenztopographien gleicher Oberflächenparameter haben gezeigt, dass die zufälligen Messabweichungen nahezu ausschließlich auf dem Specklerauschen beruhen. Kamerarauschen und Photonenschrotrauschen haben keinen signifikanten Einfluss.

Die Höhenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  wurden in Abschnitt 4.1 durch eine bidirektionale Auswertung des Specklekontrasts bestimmt und in Abschnitt 4.2 durch Auswertung der zweidimensionalen Autokorrelationsfunktion des Specklemusters. Mit beiden Verfahren ist eine getrennte Auswertung der Höhenparameter in  $x$ - und  $y$ -Richtung möglich. Die zufälligen relativen Messabweichungen betragen für beide Verfahren  $\approx 1\%$ . Ein Unterschied zeigt sich allerdings bei den systematischen Messabweichungen aufgrund einer Rotation um die  $z$ -Achse (optische Achse, senkrecht zur Oberfläche): Während bei der bidirektionalen Kontrastauswertung eine Auslenkung von  $\beta = \pm 1^\circ$  bereits eine relative systematische Messabweichung von  $2,3\%$  auslöst, sind es bei der autokorrelationsbasierten Messung nur  $0,6\%$ . Die autokorrelationsbasierte Messung der Höhenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  weist also eine weitaus geringere Querempfindlichkeit bezüglich der Ausrichtung der Oberfläche auf und eignet sich somit besser für die Charakterisierung unidirektional gefertigter Oberflächen.

Mit dem Ziel, weitere systematische Messabweichungen zu quantifizieren, wurden für die autokorrelationsbasierte Messung der Höhenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  zudem die Querempfindlichkeiten bezüglich einer Krümmung sowie einer Neigung um die  $x$ -Achse der Oberfläche untersucht. Die systematischen Messabweichungen von  $S_{q,x}$  steigen näherungsweise proportional zum Kehrwert des Krümmungsradius der Oberfläche an, wenn die Scheitellinie der Krümmung parallel zur  $y$ -Achse ausgerichtet ist. Der Parameter  $S_{q,y}$  parallel zur Scheitellinie wird nicht systematisch vom Krümmungsradius beeinflusst. Bei einem Verhältnis der Radien des Messflecks und der Krümmung  $r_m/r_k = 0,1$  beträgt die negative systematische Messabweichung des Parameters  $S_{q,x}$   $50\%$ . Eine Neigung der Oberfläche um die  $x$ -Achse resultiert in positiven systematischen Messabweichungen sowohl bei  $S_{q,x}$  als auch bei  $S_{q,y}$ . Die relativen systematischen Messabweichungen sind für Auslenkungen  $< \pm 1,5^\circ$  nahezu linear vom Neigungswinkel abhängig und betragen für  $S_{q,x}$   $4,4\%/^\circ$  und für  $S_{q,y}$   $7,9\%/^\circ$ . Die Quantifizierung der Querempfindlichkeiten bezüglich einer Rotation, Neigung und Krümmung der Oberflächentopographie erlaubt innerhalb der untersuchten Intervalle eine Korrektur systematischer Messabweichungen. Dies bietet die Möglichkeit, den Anwendungsbereich der Messmethode auch auf Bauteile mit komplexen Oberflächengeometrien zu erweitern.



## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden specklebasierte Ansätze für die Oberflächenmesstechnik vorgestellt. Dabei wurden adaptive Optiken eingesetzt, um die Grenzen der Messbarkeit zu erweitern und neue Messgrößen zu erschließen. Die beiden untersuchten übergeordneten Messgrößen sind die Verformung und die Beschaffenheit von technischen Oberflächen. Bei der Messung von hochaufgelösten Oberflächenverformungsfeldern in der Materialprüfung von Mikroproben oder der Lastmessung während Fertigungsprozessen wie dem Schleifen, Festwalzen oder Fräsen besteht die Herausforderung darin, gleichzeitig eine hohe Orts-, Zeit- und Messauflösung zu realisieren. Da zudem kontaktlos und ohne vorherige Präparation der zu untersuchenden Oberfläche gemessen werden soll, werden mittels DSP Laserspeckle als Oberflächenmarkierungen für die digitale Bildkorrelation eingesetzt. Ein Ziel dieser Arbeit war, die derzeitige Grenze der Messbarkeit via DSP durch eine Modulation der Laserspecklemuster mittels einer adaptiven Optik zu überwinden. Außerdem sollten die bisher unbekanntes zufälligen und systematischen Messabweichungen quantifiziert werden, welche durch Verformungsgradienten ausgelöst werden.

Die prozessbegleitende Qualitätssicherung während des Walzens von Stahlblechen oder des unidirektionalen Feinschleifens, Läppens oder Polierens erfordert eine schnelle und großflächige Charakterisierung der Beschaffenheit von anisotropen Oberflächen. Für diese Anforderungen sind flächenhaft integrierende Messansätze wie Specklemethoden prädestiniert, da sie eine kontaktlose Single-Shot-Messung einzelner statistischer Oberflächenparameter erlauben. Zur Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit sind allerdings sowohl Höhenparameter wie  $S_q$  notwendig, welche die Variation der Höhenwerte senkrecht zur Oberfläche beschreiben, als auch räumliche Parameter wie  $S_{al}$ , welche die Variation der Höhenwerte in der Oberflächenebene beschreiben. Bei unidirektional gefertigten anisotropen Oberflächen sind diese Parameter zudem richtungsabhängig und müssen in und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung gemessen werden. Ziel dieser Arbeit war es, das inverse Problem dieser multiparametrischen Charakterisierung für eine Klasse unidirektional gefertigter anisotroper Oberflächen mit einem specklebasierten Messansatz zu lösen. Darüber hinaus sollten die systematischen Messabweichungen untersucht werden, welche durch eine Neigung oder Krümmung der Oberfläche verursacht werden.

### 5.1 Ausgangslage der Arbeit

Ogleich specklebasierte Messmethoden schon seit den 1970er Jahren erforscht werden, bestehen bedingt durch neue optische Bauteile wie den räumlichen Lichtmodulator (SLM) sowie die fortlaufende Weiterentwicklung von digitalen Kamerasensoren, Rechenleistung und Bildauswertelgorithmen auch aktuell noch unausgeschöpftes Potenzial und Forschungsbedarf.

Seit dem Aufkommen von phasenbasierten SLM mit ausreichender räumlicher Auflösung wurde demonstriert, dass sich damit die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Intensitätsverteilung des Specklemusters verändern und somit der Specklekontrast und die laterale Korrelationslänge anpassen lassen. Der Einsatz von adaptiven Optiken für die Modulation des Specklemusters in der DSP wurde allerdings noch nicht untersucht. Um zufällige Messabweichungen zu reduzieren, wurde in der DSP bislang räumlich gemittelt, d. h., über einer Vergrößerung des Auswertefensters bei der Bildkorrelation eine größere Anzahl Speckle betrachtet. Die räumliche Mittelung stellt jedoch immer einen Kompromiss zwischen Orts- und Messauflösung dar. Eine Ensemblemittelung über mehrere unkorrelierte Specklemuster wurde vorgeschlagen, aber in Ermangelung einer

technischen Umsetzung für die schnelle und reproduzierbare Generierung mehrerer unkorrelierter Specklemuster noch nicht experimentell untersucht.

Ein weiterer blinder Fleck für die DSP waren Messabweichungen aufgrund von Verformungsgradienten. In nahezu jeder technischen Anwendung treten in gewissem Maße Gradienten im Verformungsfeld auf. Es ist auch schon lange bekannt, dass diese Gradienten die Messunsicherheit von DSP und DIC verschlechtern. Für DIC wurde in den letzten Jahren der Einfluss von Gradienten auf die zufälligen und systematischen Messabweichungen genauer untersucht, da die Verformungsmessung an Rissen von großem materialwissenschaftlichem Interesse ist und bei der Rissbildung hohe lokale Verformungsgradienten auftreten. Diese Ergebnisse lassen sich allerdings nicht direkt auf die DSP übertragen. Während die Oberflächenmarkierungen in der DIC fest mit der Oberfläche verbunden sind und sich deshalb mit der Oberfläche verformen, gilt Gleiches nicht für die Laserspeckle in der DSP. Somit war zu Beginn dieser Arbeit unklar, in welchem Maße in der DSP zufällige und systematische Messabweichungen durch Verformungsgradienten ausgelöst werden.

Die Messung des Rauheitsparameters  $S_q$  isotroper Oberflächen durch Auswertung des Specklekontrasts oder der Autokorrelationsfunktion des Specklemusters wird schon seit den 1970er Jahren erforscht. Für isotrope Oberflächen existieren zudem Ansätze zur Bestimmung der lateralen Korrelationslänge  $S_{al}$  aus dem Specklemuster, wofür allerdings meist eine zeitaufwändige Mehrfachmessung bei Variation der Apertur durchgeführt werden muss. Die Charakterisierung anisotroper Oberflächen erfordert die Messung richtungsabhängiger Parameter. Für die Klasse der unidirektional durch Feinschleifen oder Polieren bearbeiteten Oberflächen ist insbesondere die Rauheit in und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung von Interesse. Es wurde bereits gezeigt, dass sich diese Rauheitsparameter aus der zweidimensionalen Autokorrelationsfunktion des Specklemusters auswerten lassen. Jedoch ist noch unklar, in welchem Messbereich und mit welcher Messunsicherheit sich aus einer schnellen Single-Shot-Messung des Specklemusters sowohl die Bearbeitungsrichtung  $\beta$  und laterale Autokorrelationslänge  $S_{al,y}$  als auch die richtungsabhängigen Rauheitsparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  bestimmen lassen. Außerdem ist zu untersuchen, welche Messabweichungen durch eine Neigung um eine der drei Achsen oder durch eine Krümmung der anisotropen Oberflächentopographie entstehen.

## 5.2 Wissenschaftlicher Fortschritt

### Verformungsmessung

Um die bisherigen Grenzen der Messbarkeit der DSP zu überwinden und damit neue Anwendungen wie Messungen an Mikroproben zu erschließen, wurden in dieser Arbeit Mehrfachmessungen bei Modulation der Specklemuster experimentell erprobt. Die Modulation der Specklemuster erlaubt eine Mittelung über ein Ensemble unkorrelierter Specklemuster. Mit der Ensemblemittelung können sowohl die Mess- als auch die Ortsauflösung gesteigert werden.

Es wurden zwei Messaufbauten untersucht, welche die Erzeugung und spätere Reproduktion von unkorrelierten Specklemustern ermöglichen. In der ersten Messaufbau-Variante werden verschiedene Specklemuster durch die Rotation eines Glasdiffusors im Beleuchtungspfad erzeugt. Mit dieser Messaufbau-Variante soll das grundsätzliche Potenzial der Ensemblemittelung für die DSP untersucht werden. In der zweiten Variante wird ein Mikrospiegelarray (DMD) eingesetzt, der den Laser an verschiedene Positionen auf dem Diffusor richtet.

- *Anzahl unkorrelierter Specklemuster:* Mit beiden Messaufbauten wurde eine maximale Anzahl von unkorrelierten Specklemustern von etwa 30 realisiert. Bis zu dieser Grenze ist die Unsicherheit des Ensemblemittels proportional zum Kehrwert der Quadratwurzel aus der Anzahl der Specklemuster.

- *Messunsicherheit:* Durch die Ensemblemittelung lässt sich die Messunsicherheit um etwa eine Größenordnung reduzieren. Diese Verringerung der Messunsicherheit wird über einen weiten Bereich der räumlichen Auflösung von  $10\ \mu\text{m}$  bis  $100\ \mu\text{m}$  erreicht.
- *Räumliche Auflösung:* Die räumliche Auflösung bleibt bei der Ensemblemittelung unverändert. In dem verwendeten Aufbau mit einer optischen Vergrößerung von 1,4 und einer Pixelgröße von  $3,45\ \mu\text{m}$  ergibt sich bei einem Auswertefenster von  $6 \times 6$  Pixeln eine räumliche Auflösung von  $14,4\ \mu\text{m}$  und eine Messunsicherheit von  $0,087\ \mu\text{m}$ . Somit ermöglicht der Ensemblemittelwert DSP-Verformungsmessungen an Mikroproben, die nur einige  $100\ \mu\text{m}$  breit sind.
- *Zeitliche Auflösung:* Die schnelle adaptive Optik des DMD ermöglicht die Generierung von Specklemustern mit einer Rate von  $17,9\ \text{kHz}$  und somit für die Gesamtmessung eine zeitliche Auflösung  $< 10\ \text{ms}$ .

Die Erweiterung der DSP mit einer adaptiven Optik und die Mehrfachmessung mit Ensemblemittelung ermöglichen eine Reduktion der zufälligen Messabweichungen. Um die theoretische Untergrenze der Messunsicherheit zu erreichen, müssen zudem die systematischen Messabweichungen identifiziert und kompensiert werden. Deshalb wurde in dieser Arbeit mit einer Simulation der Einfluss von Verformungsgradienten auf die DSP untersucht.

- Die *zufälligen Messabweichungen* sind proportional zum Gradienten erster Ordnung und umgekehrt proportional zur Größe der Auswertefenster. Für Gradienten erster Ordnung, die kleiner als 3 % sind, und für Auswertefenster ab einer Größe von  $10 \times 10$  Pixeln liegt die zufällige Messabweichung unter  $0,04$  Pixel und ist damit kleiner als andere hardwarebedingte zufällige Messunsicherheitsbeiträge, die üblicherweise  $> 0,05$  Pixel sind. Die zufälligen Messabweichungen, die unter Einfluss von Verformungsgradienten auftreten, werden nahezu ausschließlich durch die Dekorrelation der Laserspecklemuster und nicht durch den DIC-Algorithmus verursacht.
- Die *systematischen Messabweichungen* hängen linear vom Verformungsgradienten zweiter Ordnung und der Auswertefenstergröße ab. Somit weist die systematische Messabweichung für DSP unter Einfluss von Verformungsgradienten die gleichen Merkmale auf wie DIC mit Weißlichtspeckle. Im Gegensatz zu den zufälligen Messabweichungen werden etwa 85 % der systematischen Messabweichungen der DSP durch den DIC-Algorithmus verursacht und nur der kleine verbleibende Anteil ist auf eine Dekorrelation des Laserspecklemusters zurückzuführen. Die systematische Messabweichung liegt in der gleichen Größenordnung wie die zufällige Messabweichung, z. B.  $0,05$  Pixel bei einer Auswertefenstergröße von  $20 \times 20$  Pixeln und einem Gradienten zweiter Ordnung von  $500\ \mu\epsilon/\mu\text{m}$ . Somit bietet eine Korrektur der systematischen Messabweichungen das Potenzial, den durch Verformungsgradienten ausgelösten Anteil des Messunsicherheitsbudgets der DSP etwa zu halbieren.
- *Anwendung:* Um die in der Simulation gewonnenen Erkenntnisse für fertigungstechnische Anwendungen zu nutzen, wurden mittels DSP In-Prozess-Messungen beim Laserhärten, Schleifen und Einzahnfräsen auf Verformungsgradienten untersucht. Beim Fräsen wurden die höchsten Gradienten erster Ordnung von  $7 \times 10^4\ \mu\epsilon$  gemessen, was nach der Simulation eine zufällige Messabweichung von  $0,075$  Pixeln ergibt sowie Verformungsgradienten zweiter Ordnung von etwa  $700\ \mu\epsilon/\mu\text{m}$ , dies ergibt eine systematische Messabweichung von  $0,033\ \text{Pixeln} \hat{=} 33\ \text{nm}$ . Somit liegen die durch Verformungsgradienten verursachten Messabweichungen lokal in der gleichen Größenordnung wie die kumulativen zufälligen Messabweichungen aufgrund der Graustufenauflösung der Kamera, des Signal-Rausch-Verhältnisses und der Lichtintensitätsverteilung der Specklemuster, welche zu  $28\ \text{nm}$  berechnet wurden.

## Oberflächencharakterisierung

Mit dem Ziel, die Klasse der durch Feinschleifen oder Polieren unidirektional bearbeiteten anisotropen Oberflächen in einer Single-Shot-Messung zu charakterisieren, wurden vier Oberflächenparameter identifiziert: Die Bearbeitungsrichtung  $\beta$ , die Autokorrelationslänge senkrecht zur Bearbeitungsrichtung  $S_{al,y}$  sowie die mittlere quadratische Höhe  $S_{q,x}$  in und  $S_{q,y}$  senkrecht zur Bearbeitungsrichtung. Die Topographie dieser Oberflächenklasse zeichnet sich durch unidirektionale Bearbeitungsriefen aus, welche in Bearbeitungsrichtung deutlich länger und senkrecht dazu deutlich schmaler als die Auflösungsgrenze sind. Diese Bearbeitungsriefen zeigen sich im Speckle-Streulichtmuster als helle und dunkle Streifen, welche den Speckle überlagert sind.

- *Oberflächenemulation mittels SLM:* Um das inverse Problem der multiparametrischen Charakterisierung dieser anisotropen Oberflächenklasse zu lösen, wird ein phasenbasierter räumlicher Lichtmodulator (phase-only SLM) eingesetzt, welcher im Specklemessaufbau die Oberflächentopographie emuliert. Damit lassen sich einzelne Oberflächenparameter gezielt variieren und an jedem Arbeitspunkt Messunsicherheitsanalysen mit großer Stichprobe durchführen. Dieser Ansatz bildet somit das Bindeglied zwischen der reinen Simulation und dem Validierungsexperiment an einzelnen real gefertigten Proben. Die mit dem SLM emulierten Oberflächentopographien werden mit einem parametrisierten Oberflächenmodell generiert, das als Summe einer isotropen und einer anisotropen gaußschen Oberfläche definiert ist. Mit jeweils zwei Modellparametern für Rauheit (Höhenparameter) und laterale Korrelationslänge (räumlicher Parameter) lassen sich unidirektional gefertigte anisotrope Oberflächen realitätsnah simulieren.
- Die *Bearbeitungsrichtung*  $\beta$  und die *Autokorrelationslänge*  $S_{al,y}$  werden aus dem zweidimensionalen Amplitudenspektrum des Specklemusters ausgewertet. Der Messbereich von  $S_{al,y}$  ist etwa 20  $\mu\text{m}$  bis 70  $\mu\text{m}$  und die Messunsicherheit beträgt unter 1  $\mu\text{m}$ , wobei das Messunsicherheitsbudget durch Specklerauschen dominiert wird.
- Die *mittleren quadratischen Höhen*  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  werden aus den Specklekontrastkomponenten  $C_x$  und  $C_y$  bidirektional in und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung bestimmt. Der Messbereich liegt in der SLM-Emulation zwischen 0,05  $\mu\text{m}$  und 0,4  $\mu\text{m}$  und die Messunsicherheit beträgt etwa 1 nm.

Die Oberflächenemulation mittels SLM erlaubt eine umfangreiche Analyse der zufälligen Messabweichungen aufgrund von Schrot-, Kamera- und Specklerauschen. Um außerdem die systematischen Messabweichungen bedingt durch die Quereinflüsse von Neigung und Krümmung der anisotropen Oberflächentopographie zu untersuchen, wurden Messungen mit einem weiteren specklebasierten Messaufbau durchgeführt. Die bidirektionale Rauheitsmessung erfolgt hier durch Auswertung der Autokorrelationsfunktion des objektiven Specklemusters. Die Oberflächenproben sind an einem 6-Achs-Industrieroboter montiert, wodurch eine flexible Translation und Rotation der Proben ermöglicht wird. Dies soll eine Messung im Fertigungsumfeld abbilden, bei der entweder die Proben oder der Sensor automatisiert von einem Roboter bewegt werden.

- Eine *Rotation um die z-Achse*, die dem optischen Pfad entspricht und senkrecht zur Oberfläche steht, zeigt die Richtungsabhängigkeit der bidirektionalen Rauheitsparameter. Im Gegensatz zu der bidirektionalen Kontrastmessung ergibt die Auswertung der zweidimensionalen Autokorrelationsfunktion des Specklemusters Rauheitsparameter mit einem kontinuierlichen und periodischen Verlauf über den Rotationswinkel  $\beta$  um die  $z$ -Achse. Winkelauslenkungen im kleinen einstelligen Bereich ergeben noch keine signifikante Messabweichung. Eine Rotation von  $\beta = 9^\circ$  führt bei  $S_{q,y}$  zu einer Messabweichung von 3,5 nm, was einer relativen

Messabweichung von etwa 5 % entspricht. Die relativen Messabweichungen aufgrund einer fehlerhaften Positionierung des Roboters wurden dagegen auf 2,6 % quantifiziert.

- Bei einer *Neigung um die x-Achse* ist die Messabweichung für Winkelauslenkungen  $< \pm 1,5^\circ$  ungefähr linear abhängig vom Neigungswinkel, sofern durch die Neigung der Akzeptanzwinkel des optischen Systems nicht überschritten wird. Unter dieser Einschränkung bleibt der spekulare reflektierte Strahlungsanteil auf dem Kamerasensor. Um die systematischen Messabweichungen experimentell zu untersuchen, wurde ein Oberflächennormal mit dem Roboter in  $0,1^\circ$ -Schritten um die  $x$ -Achse geneigt. Dabei treten sowohl bei  $S_{q,x}$  als auch bei  $S_{q,y}$  positive systematische Messabweichungen auf, welche symmetrisch abhängig von dem Betrag des Neigungswinkels sind. Im Winkelintervall  $[-1,25^\circ, 1,25^\circ]$  betragen die relativen Abweichungen für  $S_{q,x}$   $4,4\%/^\circ$  und für  $S_{q,y}$   $7,9\%/^\circ$ .
- Um den Einfluss einer *Krümmung der Oberflächentopographie* auf die bidirektionale Rauheitsmessung zu bestimmen, wurden dedizierte Proben mit unterschiedlichen Krümmungsradien gefertigt. Dabei verläuft die Scheitellinie der Krümmung entlang der  $y$ -Achse. Mittels eines WLI wurden die Oberflächentopographien dieser Proben bestimmt und nach Abzug der Krümmung wurden daraus die Referenzwerte für  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$  berechnet. Die so korrigierten Oberflächenparameter liegen für alle Proben bei  $S_{q,x} \approx 0,35\ \mu\text{m}$  und  $S_{q,y} \approx 0,65\ \mu\text{m}$ , wobei die Varianz von  $S_{q,y}$  deutlich größer ist. Bei den Messungen mit dem Specklesensor zeigt sich eine systematische negative Messabweichung des Parameters  $S_{q,x}$ , welche in Abhängigkeit des dimensionslosen Verhältnisses aus dem Radius  $r_m$  des Auswertebereichs und dem Krümmungsradius  $r_k$  der Proben bis  $r_m/r_k = 0,1$  näherungsweise linear auf  $-0,2\ \mu\text{m} \hat{=} -50\%$  anwächst. Der Höhenparameter  $S_{q,y}$  bleibt jedoch bis  $r_m/r_k = 0,3$  nahezu konstant. Dieses Ergebnis bestätigt erneut die Plausibilität der specklebasierten bidirektionalen Rauheitsmessung, da durch eine Krümmung entlang der  $x$ -Achse auch nur Messabweichungen des Höhenparameters  $S_{q,x}$  in  $x$ -Richtung entstehen.

### 5.3 Ausblick auf weiterführenden Forschungsbedarf

Die Ensemblemittelung über eine Vielzahl unkorrelierter Specklemuster bietet das Potenzial, die Messunsicherheit der Verformungsfeldmessung mit DSP bei gleichbleibender räumlicher Auflösung um eine Größenordnung zu verbessern. Mit dem DMD wurde eine adaptive Optik in den Versuchsaufbau integriert, die eine Modulationsrate der Specklemuster im Kilohertzbereich erlaubt. Bislang sind allerdings noch keine Messungen im anwendungsnahen Umfeld erfolgt. In zukünftigen Arbeiten soll daher die In-situ-Messung an Mikroproben erfolgen, um zu untersuchen, welche Messrate und Messunsicherheit sich durch den Einsatz eines DMDs und einer Hochgeschwindigkeitskamera erreichen lassen.

Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf bei der Messung von 3-D-Verformungen, d. h. in-plane und out-of-plane, mittels DSP. Es existieren bereits Vorarbeiten zur Bestimmung der Out-of-plane-Verformung aus der Dekorrelation des Specklemusters, aber noch ist unklar, wie sich dieser Messeffekt von anderen Quereinflüssen trennen lässt, welche ebenfalls Dekorrelation erzeugen. Ebenso wurde noch nicht untersucht, welche systematischen Messabweichungen durch einen Out-of-plane-Verformungsgradienten sowie durch eine Neigung oder Krümmung der Oberfläche entstehen. Eine potenzielle Anwendung für die specklebasierte Messung von 3-D-Verformungen ist die Schwingungskompensation bei der lateral scannenden Weißlichtinterferometrie (LSWLI). Es gibt bereits Vorarbeiten, in welchen LSWLI mit der Messung von In-plane-Verschiebung mittels DSP kombiniert wurde. Die zusätzliche Erfassung der Out-of-plane-Verformung würde erlauben, auch Schwingungen in dieser Richtung zu kompensieren.

Die meisten bisherigen Anwendungen von DSP konzentrieren sich auf metallische Oberflächen,

welche sich durch ihre hohe Reflektivität besonders für Streulichtmessverfahren eignen. Die Verformungsmessung an Faserverbundwerkstoffen ist daher ein neues Forschungsfeld für die DSP. Bei der spanenden Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen kann das Auftreten von Delamination der oberen Gewebeschichten zur irreversiblen Schädigung von Bauteilen führen. Daher ist in dieser Anwendung eine schnelle In-Prozess-Messung der Oberflächenverformung von großem Interesse, um das Einsetzen von Delamination im frühen Stadium zu detektieren und die Schädigung des Faserverbunds zu verhindern.

Auch bei der Integration der multiparametrischen Charakterisierung anisotroper Oberflächen in fertigungstechnische Anwendungen besteht noch weiterführender Forschungsbedarf. In der vorliegenden Arbeit wurde demonstriert, dass sich aus einer Single-Shot-Messung des Speckle-Streulichtmusters sowohl die bidirektionalen Höhenparameter  $S_{q,x}$  und  $S_{q,y}$ , als auch die räumlichen Parameter  $S_{al}$  und Bearbeitungsrichtung  $\beta$  bestimmen lassen. Die Lösung des inversen Problems dieser multiparametrischen Oberflächencharakterisierung ist auf Basis von heuristischen Hypothesen erfolgt, welche anschließend durch den Einsatz einer adaptiven Optik experimentell validiert wurden. Ein weiterer vielversprechenden Ansatz zur Lösung des inversen Problems der specklebasierten Charakterisierung anisotroper Oberflächen stellen Machine-Learning-Modelle dar. In dem ersten Schritt eines datengetriebenen Ansatzes könnten Speckle-Streulichtbilder mit Merkmalsextraktionsmethoden wie der Principal Component Analysis (PCA) analysiert werden. In einem zweiten Schritt würden die aus den Rohdaten identifizierten Bildmerkmale mittels einer Regressionsanalyse mit verschiedenen Oberflächenparametern verknüpft. Es ist eine offene Forschungsfrage, ob sich mit diesem datengetriebenen Vorgehen die Messunsicherheit und der Messbereich im Vergleich zum aktuellen Stand der Forschung verbessern lassen und ob sich so weitere Oberflächenparameter aus dem Speckle-Streulichtmuster bestimmen lassen.

## Literaturverzeichnis

- [Adr2005] Adrian, R. J.: Twenty years of particle image velocimetry. In: *Experiments in Fluids* 39 (2005), Nr. 2, S. 159–169. – ISSN 0723-4864
- [Ajo2011] Ajovalasit, A.: Advances in Strain Gauge Measurement on Composite Materials. In: *Strain* 47 (2011), Nr. 4, S. 313–325. – ISSN 00392103
- [Aki1970] Akima, H.: A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. In: *Journal of the ACM* 17 (1970), Nr. 4, S. 589–602. – ISSN 0004-5411
- [Alb2006] Albers, A.; Burkardt, N.; Ohmer, M.: Contact and Channel Model for Pairs of Working Surfaces. In: Maraghy, H. A. E.; ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Advances in design*. London and Heidelberg : Springer, 2006 (Springer Series in Advanced Manufacturing), S. 511–520. – ISBN 1-84628-004-4
- [Ale2020] Alexe, G.; Tausendfreund, A.; Stöbener, D.; Langstädtler, L.; Herrmann, M.; Schenck, C.; Fischer, A.: Uncertainty and Resolution of Speckle Photography on Micro Samples. In: *Nanomanufacturing and Metrology* 3 (2020), Nr. 2, S. 91–104
- [Ben2018] Bender, N.; Yilmaz, H.; Bromberg, Y.; Cao, H.: Customizing speckle intensity statistics. In: *Optica* 5 (2018), Nr. 5, S. 595
- [Ben2019] Bender, N.; Yilmaz, H.; Bromberg, Y.; Cao, H.: Introducing non-local correlations into laser speckles. In: *Optics express* 27 (2019), Nr. 5, S. 6057–6067
- [Ber2006] Berfield, T. A.; Patel, J. K.; Shimmin, R. G.; Braun, P. V.; Lambros, J.; Sottos, N. R.: Fluorescent image correlation for nanoscale deformation measurements. In: *Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)* 2 (2006), Nr. 5, S. 631–635
- [Bla2015] Blaber, J.; Adair, B.; Antoniou, A.: Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. In: *Experimental Mechanics* 55 (2015), Nr. 6, S. 1105–1122. – ISSN 0014-4851
- [Bla2019] Black, J. T.; Kohser, R. A.: *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*. Thirteenth edition. Hoboken : Wiley-Blackwell, 2019. – ISBN 9781119492931
- [Bri2002] Brillaud, J.; Lagattu, F.: Limits and possibilities of laser speckle and white-light image-correlation methods: theory and experiments. In: *Applied optics* 41 (2002), Nr. 31, S. 6603–6613
- [Bri2011] Brinksmeier, E.; Gläbe, R.; Klocke, F.; Lucca, D. A.: Process Signatures – an Alternative Approach to Predicting Functional Workpiece Properties. In: *Procedia Engineering* 19 (2011), S. 44–52. – ISSN 18777058
- [Bri2014] Brinksmeier, E.; Klocke, F.; Lucca, D. A.; Sölter, J.; Meyer, D.: Process Signatures – A New Approach to Solve the Inverse Surface Integrity Problem in Machining Processes. In: *Procedia CIRP* 13 (2014), S. 429–434. – ISSN 22128271

- 
- [Bro1985] Brodmann, R.; Gerstorfer, O.; Thurn, G.: Optical Roughness Measuring Instrument For Fine-Machined Surfaces. In: *Optical Engineering* 24 (1985), Nr. 3. – ISSN 0091-3286
- [Bro2014] Bromberg, Y.; Cao, H.: Generating Non-Rayleigh Speckles with Tailored Intensity Statistics. In: *Physical Review Letters* 112 (2014), Nr. 21. – ISSN 0031-9007
- [Che2002] Cheng, C.; Liu, C.; Zhang, N.; Jia, T.; Li, R.; Xu, Z.: Absolute measurement of roughness and lateral-correlation length of random surfaces by use of the simplified model of image-speckle contrast. In: *Applied optics* 41 (2002), Nr. 20, S. 4148–4156
- [Che2011] Chen, J.; Liu, B.; Zhang, H.: Review of fiber Bragg grating sensor technology. In: *Frontiers of Optoelectronics in China* 4 (2011), Nr. 2, S. 204–212. – ISSN 1674-4128
- [Dai1975] Dainty, J. C. (Hrsg.): *Topics in Applied Physics*. Bd. 9: *Laser Speckle and Related Phenomena*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1975. – ISBN 9783662432051
- [Dav1954] Davies, H.: The reflection of electromagnetic waves from a rough surface. In: *Proceedings of the IEE - Part IV: Institution Monographs* 101 (1954), Nr. 7, S. 209–214
- [Don2017] Dong, Y. L.; Pan, B.: A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation. In: *Experimental Mechanics* 57 (2017), Nr. 8, S. 1161–1181. – ISSN 0014-4851
- [Ell2018] Ellendt, N.; Mädler, L.: High-Throughput Exploration of Evolutionary Structural Materials. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 73 (2018), Nr. 1, S. 3–12. – ISSN 1867-2493
- [Far2019] Farfan-Cabrera, L. I.: Tribology of electric vehicles: A review of critical components, current state and future improvement trends. In: *Tribology International* 138 (2019), S. 473–486. – ISSN 0301679X
- [Fis2017] Fischer, A.: Fundamental uncertainty limit for speckle displacement measurements. In: *Applied optics* 56 (2017), Nr. 25, S. 7013–7019
- [Fis2022] Fischer, A.; Stöbener, D.; Behrends, G.: A lateral-scanning white-light interferometer for topography measurements on rotating objects in process environments. In: *CIRP Annals* 71 (2022), Nr. 1, S. 437–440. – ISSN 0007-8506
- [Fis2023a] Fischer, A.; Tausendfreund, A.; Hess, R.; Petersen, T.; Stöbener, D.: In-process measurement of mechanical loads during electrical discharge machining. In: *CIRP Annals* 72 (2023), Nr. 1, S. 461–464. – URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785062300118X>. – ISSN 0007-8506
- [Fis2023b] Fischer, A.: Capabilities and limits of surface roughness measurements with monochromatic speckles. In: *Applied Optics* 62 (2023), Nr. 14, S. 3724. – ISSN 0003-6935
- [Fle2003] Fleming, G. A.: Surface Deformation Measurements. In: Mercer, C. R. (Hrsg.): *Optical Metrology for Fluids, Combustion and Solids*. Boston, MA : Springer US, 2003, S. 383–418. – ISBN 978-1-4757-3777-6
- [Flo1972] Flournoy, P. A.; McClure, R. W.; Wyntjes, G.: White-light interferometric thickness gauge. In: *Applied optics* 11 (1972), Nr. 9, S. 1907–1915

- [Fuj1974] Fujii, H.; Asakura, T.: Effect of surface roughness on the statistical distribution of image speckle intensity. In: *Optics Communications* 11 (1974), Nr. 1, S. 35–38. – URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0030401874903277>. – ISSN 00304018
- [Fuj1976] Fujii, H.; Asakura, T.; Shindo, Y.: Measurement of surface roughness properties by using image speckle contrast. In: *Journal of the Optical Society of America* 66 (1976), Nr. 11, S. 1217. – ISSN 0030-3941
- [Fun1985] Fung, A. K.; Chen, M. F.: Numerical simulation of scattering from simple and composite random surfaces. In: *Journal of the Optical Society of America A* 2 (1985), Nr. 12, S. 2274–2284. – ISSN 1084-7529
- [Goo1996] Goodman, J. W.: *Introduction to Fourier optics*. 2. ed. New York and London : McGraw-Hill, 1996 (Electromagnetics). – ISBN 0070242542
- [Goo2007] Goodman, J. W.: *Speckle phenomena in optics: Theory and applications*. Englewood, Colo. : Roberts, 2007. – ISBN 9781936221141
- [Hec2018] Hecht, E.: *Optik*. Berlin, Boston : De Gruyter, 2018. – URL <https://www.degruyter.com/view/product/482039>. – ISBN 978-3-11-052664-6
- [Hei1927] Heisenberg, W.: Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. In: *Z. Physik (Zeitschrift für Physik)* 43 (1927), Nr. 3-4, S. 172–198
- [Hil2006] Hild, F.; Roux, S.: Digital Image Correlation: from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties - a Review. In: *Strain* 42 (2006), Nr. 2, S. 69–80. – ISSN 00392103
- [Hil2015] Hild, F.; Bouterf, A.; Roux, S.: Damage measurements via DIC. In: *International Journal of Fracture* 191 (2015), Nr. 1-2, S. 77–105. – ISSN 0376-9429
- [Hir2006] Hirabayashi, H.; Matsuo, T.; Ishizawa, H.; Kanai, H.; Nishimatsu, T.: Surface Roughness Evaluation by Laser Speckle. In: *2006 SICE-ICASE international joint conference*. Piscataway, NJ : IEEE Service Center, 2006, S. 5809–5812. – ISBN 89-950038-4-7
- [Hor1997] Hornbeck, L. J.: Digital Light Processing for high-brightness high-resolution applications. In: Ming Hsien Wu (Hrsg.): *Projection Displays III* Bd. 3013, SPIE, 1997, S. 27–40
- [Int1998] International Organization for Standardization: *DIN EN ISO 3274:1998-04, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten*. 1998
- [Int2010a] International Organization for Standardization: *DIN EN ISO 25178-6:2010-06, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 6: Klassifizierung von Methoden zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit*. 2010
- [Int2010b] International Organization for Standardization: *DIN EN ISO 4287:2010-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. 2010
- [Int2012] International Organization for Standardization: *DIN EN ISO 25178-2:2012-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen*. 2012

- 
- [Int2016] International Organization for Standardization: *DIN EN ISO 25178-1:2016-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit*. 2016
- [JCGM2008] JCGM Joint Committee for Guides in Metrology: *JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2008
- [Kad1987] Kadono, H.; Asakura, T.; Takai, N.: Roughness and correlation-length determination of rough-surface objects using the speckle contrast. In: *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry* 44 (1987), Nr. 3, S. 167–173. – ISSN 0721-7269
- [Kad1988] Kadono, H.; Asakura, T.; Takai, N.: Roughness And Correlation-Length Measurements Of Rough Surface Objects Using The Speckle Contrast In The Diffraction Field. In: Morris, G. M. (Hrsg.): *Statistical Optics*, SPIE, 1988 (SPIE Proceedings), S. 210
- [Kna2003] Knauss, W. G.; Chasiotis, I.; Huang, Y.: Mechanical measurements at the micron and nanometer scales. In: *Mechanics of Materials* 35 (2003), Nr. 3-6, S. 217–231. – ISSN 01676636
- [Lea2011] Leach, R.: *Optical Measurement of Surface Topography*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 9783642120121
- [Lea2014] Leach, R.: *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. Elsevier, 2014. – ISBN 9781455777532
- [Leh1999] Lehmann, P.: Surface-roughness measurement based on the intensity correlation function of scattered light under speckle-pattern illumination. In: *Applied Optics* 38 (1999), Nr. 7, S. 1144–1152. – ISSN 0003-6935
- [Lew1966] Lewis, T. O.; Odell, P. L.: A Generalization of the Gauss-Markov Theorem. In: *Journal of the American Statistical Association* 61 (1966), Nr. 316, S. 1063–1066. – ISSN 0162-1459
- [Li2021] Li, Y.; Liu, J.; Chen, X.; Wu, J.; Li, N.; He, W.; Feng, Y.: Tailoring Surface Properties of Electrodes for Synchronous Enhanced Extracellular Electron Transfer and Enriched Exoelectrogens in Microbial Fuel Cells. In: *ACS applied materials & interfaces* 13 (2021), Nr. 49, S. 58508–58521
- [Lia2013] Liang, G.; Li, X.; Zhang, M.; Li, Z.; Liu, C.; Cheng, C.: Experimental extraction of rough surface parameters from speckles in the deep Fresnel region with a scanning fibre-optic probe. In: *The European Physical Journal D* 67 (2013), Nr. 4, S. 1–6. – ISSN 1434-6079
- [Liu2014] Liu, C.; Dong, Q.; Li, H.; Li, Z.; Li, X.; Cheng, C.: Measurement of surface parameters from autocorrelation function of speckles in deep Fresnel region with microscopic imaging system. In: *Optics Express* 22 (2014), Nr. 2, S. 1302–1312
- [Liu2020] Liu, H.; Liu, H.; Zhu, C.; Sun, Z.; Bai, H.: Study on contact fatigue of a wind turbine gear pair considering surface roughness. In: *Friction* 8 (2020), Nr. 3, S. 553–567. – ISSN 2223-7690
- [Lu2000] Lu, H.; Cary, P. D.: Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient. In: *Experimental Mechanics* 40 (2000), Nr. 4, S. 393–400. – ISSN 0014-4851

- [Lu2006] Lu, R.-S.; Tian, G.-Y.; Gledhill, D.; Ward, S.: Grinding surface roughness measurement based on the co-occurrence matrix of speckle pattern texture. In: *Applied Optics* 45 (2006), Nr. 35, S. 8839–8847. – ISSN 0003-6935
- [Mal2013] Malesa, M.; Malowany, K.; Tomczak, U.; Siwek, B.; Kujawińska, M.; Siemińska-Lewandowska, A.: Application of 3D digital image correlation in maintenance and process control in industry. In: *Computers in Industry* 64 (2013), Nr. 9, S. 1301–1315. – ISSN 01663615
- [Nor2004] Norlin, A.; Pan, J.; Leygraf, C.: Investigation of Pt, Ti, TiN, and nano-porous carbon electrodes for implantable cardioverter-defibrillator applications. In: *Electrochimica Acta* 49 (2004), Nr. 22-23, S. 4011–4020. – ISSN 00134686
- [Ogi1989] Ogilvy, J. A.; Foster, J. R.: Rough surfaces: gaussian or exponential statistics? In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 22 (1989), Nr. 9, S. 1243–1251. – ISSN 0022-3727
- [Ols2000] Olszak, A.: Lateral scanning white-light interferometer. In: *Applied optics* 39 (2000), Nr. 22, S. 3906–3913
- [Opp1999] Oppenheim, A. V.; Schafer, R. W.; Buck, J. R.: *Discrete-time Signal Processing*. Prentice Hall, 1999 (Prentice Hall international editions). – URL <https://books.google.de/books?id=Bv1SAAAAMAAJ>. – ISBN 9780137549207
- [Pan2009] Pan, B.; Qian, K.; Xie, H.; Asundi, A.: Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. In: *Measurement Science and Technology* 20 (2009), Nr. 6, S. 062001. – URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/20/6/062001/pdf>. – ISSN 0957-0233
- [Pan2013] Panagiotidou, A.; Meswania, J.; Hua, J.; Muirhead-Allwood, S.; Hart, A.; Blunn, G.: Enhanced wear and corrosion in modular tapers in total hip replacement is associated with the contact area and surface topography. In: *Journal of orthopaedic research : official publication of the Orthopaedic Research Society* 31 (2013), Nr. 12, S. 2032–2039
- [Pat2010] Patzelt, S.: *Forschungsberichte über Messtechnik, Automatisierung, Qualitätswissenschaft und Energiesysteme*. Bd. 4: *Simulation und experimentelle Erprobung parametrisch-optischer Rauheitsmessprozesse auf der Basis von kohärentem Streulicht und Speckle-Korrelationsverfahren: Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2009*. 1. Aufl. Aachen : Mainz, 2010. – ISBN 9783861307471
- [Pat2016] Patzelt, S.; Stehno, C.; Tausendfreund, A.; Ströbel, G.: Optimierter Laserspeckle-basierter Rauheitsmessprozess für bewegte, spiegelnde Oberflächen. In: *tm - Technisches Messen* 83 (2016), Nr. 9, S. 484–493. – ISSN 2196-7113
- [Pat2017] Patzelt, S.; Stehno, C.; Stöbener, D.; Ströbel, G.; Fischer, A.: In-Prozess-Charakterisierung spiegelnder Oberflächen mit Laserstreulicht und leistungsfähiger Hardware. In: *tm - Technisches Messen* 84 (2017), Nr. 9, S. 557–567. – ISSN 2196-7113
- [Pat2019] Patzelt, S.; Stöbener, D.; Fischer, A.: Laser light source limited uncertainty of speckle-based roughness measurements. In: *Applied Optics* 58 (2019), Nr. 23, S. 6436–6445. – ISSN 0003-6935
- [Ped1974] Pedersen, H. M.: The roughness dependence of partially developed, monochromatic speckle patterns. In: *Optics Communications* 12 (1974), Nr. 2, S. 156–159. – URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0030401874903800>. – ISSN 00304018

- [Ped1975] Pedersen, H. M.: Second-order Statistics of Light Diffracted from Gaussian, Rough Surfaces with Applications to the Roughness Dependence of Speckles. In: *Optica Acta: International Journal of Optics* 22 (1975), Nr. 6, S. 523–535. – ISSN 0030-3909
- [Pfe2015] Pfeifer, T.: *Production Metrology*. Berlin and Boston : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2015. – ISBN 9783486258851
- [Pos2008] Post, D.; Han, B.: Moiré Interferometry. In: Sharpe, W. N. (Hrsg.): *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Boston, MA : Springer US, 2008, S. 627–654. – ISBN 978-0-387-30877-7
- [Pra2019] Pradana, A. B.; Prajitno, P.: A Portable Surface Roughness Measurement System Using Laser Speckle Imaging Based on GLCM. In: *2019 6th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*, IEEE, 2019, S. 100–105. – ISBN 978-1-7281-0916-9
- [Rac2013] Rachman, N. A.; Risdiyanto, A.; Khayam, U.; Suwarno: Analysis of surface roughness and contact pressure at copper connector using nickel and silver plating for EV battery. In: *2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (rICT & ICeV-T)*, IEEE, 2013, S. 1–6. – ISBN 978-1-4799-3365-5
- [Rea2017] Reagan, D.; Sabato, A.; Niezrecki, C.: Unmanned aerial vehicle acquisition of three-dimensional digital image correlation measurements for structural health monitoring of bridges. In: Wu, H. F.; Gyekenyesi, A. L.; Shull, P. J.; Yu, T.-Y. (Hrsg.): *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2017*, SPIE, 2017 (SPIE Proceedings), S. 1016909
- [Reu2014a] Reu, P.: All about Speckles: Aliasing. In: *Experimental Techniques* 38 (2014), Nr. 5, S. 1–3. – ISSN 07328818
- [Reu2014b] Reu, P.: All about speckles: Speckle Size Measurement. In: *Experimental Techniques* 38 (2014), Nr. 6, S. 1–2. – ISSN 07328818
- [Reu2015] Reu, P.: All about Speckles: Contrast. In: *Experimental Techniques* 39 (2015), Nr. 1, S. 1–2. – ISSN 07328818
- [Ruf1985] Ruffing, B.; Fleischer, J.: Spectral correlation of partially or fully developed speckle patterns generated by rough surfaces. In: *Journal of the Optical Society of America A* 2 (1985), Nr. 10, S. 1637. – ISSN 1084-7529
- [Sch2000] Schreier, H. W.: Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. In: *Optical Engineering* 39 (2000), Nr. 11, S. 2915. – ISSN 0091-3286
- [Sch2015] Schake, M.; Schulz, M.; Lehmann, P.: High-resolution fiber-coupled interferometric point sensor for micro- and nano-metrology. In: *tm - Technisches Messen* 82 (2015), Nr. 7-8, S. 367–376. – ISSN 2196-7113
- [Sch2020] Scholes, S.; Kara, R.; Pinnell, J.; Rodríguez-Fajardo, V.; Forbes, A.: Structured light with digital micromirror devices: a guide to best practice. In: *Optical Engineering* 59 (2020), Nr. 04, S. 1. – ISSN 0091-3286
- [Sha1949] Shannon, C. E.: Communication in the Presence of Noise. In: *Proceedings of the IRE* 37 (1949), Nr. 1, S. 10–21. – ISSN 0096-8390

- [Shi2015] Shimizu, M.; Sawano, H.; Yoshioka, H.; Shinno, H.: Multi-dimensional assessment of nano/micro scale surface texture using laser speckle pattern analysis. In: *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 9 (2015), Nr. 1. – URL [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamdsm/9/1/9\\_2015jamdsm0011/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamdsm/9/1/9_2015jamdsm0011/_article/-char/ja/). – ISSN 1881-3054
- [Sjö1997] Sjö Dahl, M.: Accuracy in electronic speckle photography. In: *Applied optics* 36 (1997), Nr. 13, S. 2875–2885
- [Son2018] Song, J.; Yang, J.; Liu, F.; Lu, K.: High temperature strain measurement method by combining digital image correlation of laser speckle and improved RANSAC smoothing algorithm. In: *Optics and Lasers in Engineering* 111 (2018), S. 8–18. – ISSN 01438166
- [Ste2021] Stempin, J.; Tausendfreund, A.; Stöbener, D.; Fischer, A.: Roughness Measurements with Polychromatic Speckles on Tilted Surfaces. In: *Nanomanufacturing and Metrology* 4 (2021), Nr. 4, S. 237–246. – ISSN 2520-811X
- [Sto2012] Stover, J. C.: *Press Monographs*. Bd. v.224: *Optical Scattering: Measurement and Analysis*. 3rd ed. Bellingham : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2012. – ISBN 9780819492524
- [Sto2014] Stover, J.; Han, S.: The art of specifying surface quality. In: Han, S.; Yoshizawa, T.; Zhang, S. (Hrsg.): *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications III*, SPIE, 2014 (SPIE Proceedings), S. 92760M
- [Sut2009] Sutton, M. A.; Orteu, J.-J.; Schreier, H. W.: *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications*. New York, NY : Springer, 2009. – ISBN 978-0-387-78746-6
- [Tac2007] Taconet, O.; Ciarletti, V.: Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. In: *Soil and Tillage Research* 93 (2007), Nr. 1, S. 64–76. – ISSN 01671987
- [Tah2011] Taheri, P.; Hsieh, S.; Bahrami, M.: Investigating electrical contact resistance losses in lithium-ion battery assemblies for hybrid and electric vehicles. In: *Journal of Power Sources* 196 (2011), Nr. 15, S. 6525–6533. – ISSN 03787753
- [Tau2018a] Tausendfreund, A.; Borchers, F.; Kohls, E.; Kuschel, S.; Stöbener, D.; Heinzl, C.; Fischer, A.: Investigations on Material Loads during Grinding by Speckle Photography. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2 (2018), Nr. 4, S. 71
- [Tau2018b] Tausendfreund, A.; Stöbener, D.; Fischer, A.: Precise In-Process Strain Measurements for the Investigation of Surface Modification Mechanisms. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2 (2018), Nr. 1, S. 9
- [Tau2021] Tausendfreund, A.; Stöbener, D.; Fischer, A.: In-Process Measurement of Three-Dimensional Deformations Based on Speckle Photography. In: *Applied Sciences* 11 (2021), Nr. 11, S. 4981
- [Tau2022] Tausendfreund, A.; Frerichs, F.; Stöbener, D.; Fischer, A.: Experimental validation of workpiece deformation simulations by means of rigorous boundary condition analysis. In: *Procedia CIRP* 108 (2022), S. 341–345. – ISSN 22128271
- [Tiz1994] Tiziani, H. J.; Uhde, H. M.: Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy. In: *Applied optics* 33 (1994), Nr. 10, S. 1838–1843

- 
- [Tor2016] D. I. Torre, I. M.; Hernández Montes, M. d. S.; Flores-Moreno, J. M.; Santoyo, F. M.: Laser speckle based digital optical methods in structural mechanics: A review. In: *Optics and Lasers in Engineering* 87 (2016), S. 32–58. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816616000397>. – ISSN 01438166
- [Udu2000] Udupa, G.; Singaperumal, M.; Sirohi, R. S.; Kothiyal, M. P.: Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. Principles and the measurement system. In: *Measurement Science and Technology* 11 (2000), Nr. 3, S. 305–314. – ISSN 0957-0233
- [Vio2004] Viotti, M. R.; Kaufmann, G. H.: Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses. In: *Optics and Lasers in Engineering* 41 (2004), Nr. 2, S. 297–305. – ISSN 01438166
- [Vor1993] Vorburger, T. V.; Marx, E.; Lettieri, T. R.: Regimes of surface roughness measurable with light scattering. In: *Applied optics* 32 (1993), Nr. 19, S. 3401–3408
- [Wan2009] Wang, Y. Q.; Sutton, M. A.; Bruck, H. A.; Schreier, H. W.: Quantitative Error Assessment in Pattern Matching: Effects of Intensity Pattern Noise, Interpolation, Strain and Image Contrast on Motion Measurements. In: *Strain* 45 (2009), Nr. 2, S. 160–178. – ISSN 00392103
- [Xu2017] Xu, X.; Su, Y.; Zhang, Q.: Theoretical estimation of systematic errors in local deformation measurements using digital image correlation. In: *Optics and Lasers in Engineering* 88 (2017), S. 265–279. – ISSN 01438166
- [Yan2010] Yang, L.; Lu, R.; Lei, L.: Grinding surface roughness measurement based on Gauss-Markov random field model of laser speckle pattern texture. In: Xin, J.; Zhu, L.; Wang, Z. (Hrsg.): *Fourth International Seminar on Modern Cutting and Measurement Engineering*, SPIE, 2010 (SPIE Proceedings), S. 79971X
- [Yan2019] Yang, J.; Bhattacharya, K.: Augmented Lagrangian Digital Image Correlation. In: *Experimental Mechanics* 59 (2019), Nr. 2, S. 187–205. – ISSN 0014-4851
- [Zho2001] Zhou, P.; Goodson, K.: Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation. In: *Optical Engineering* 40 (2001), Nr. 8, S. 1613–1620. – ISSN 0091-3286
- [Zho2008] Zhong, C.-J.; Luo, J.; Njoki, P. N.; Mott, D.; Wanjala, B.; Loukrakpam, R.; Lim, S.; Wang, L.; Fang, B.; Xu, Z.: Fuel cell technology: nano-engineered multimetallic catalysts. In: *Energy & Environmental Science* 1 (2008), Nr. 4, S. 454. – ISSN 1754-5692

# Eigene Veröffentlichungen

## Zeitschriften mit Peer-Review

- L. Schweickhardt**, A. Tausendfreund, D. Stöbener, A. Fischer: Digital speckle photography in the presence of displacement gradients. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publication* 19(1), 2023. DOI: 10.1051/jeos/2023012
- L. Schweickhardt**, A. Tausendfreund, D. Stöbener, A. Fischer: Parametric characterization of ground surfaces with laser speckles. *Optics Express* 30(8):12615–12629, 2022. DOI: 10.1364/OE.454741
- L. Schweickhardt**, A. Tausendfreund, D. Stöbener, A. Fischer: Noise reduction in high-resolution speckle displacement measurements through ensemble averaging. *Applied Optics* 60(7):1871–1880, 2021. DOI: 10.1364/AO.416028

## Konferenzbeiträge

- L. Schweickhardt**, D. Stöbener, A. Fischer: Speckle-basierte Charakterisierung anisotroper Oberflächen. Das XXXVII. Messtechnische Symposium des Arbeitskreis der Hochschullehrer für Messtechnik e. V. (AHMT), Freiburg, 27.-28.9.2023. *tm – Technisches Messen* 90(S1):61–66, 2023. DOI: 10.1515/teme-2023-0056
- L. Schweickhardt**, A. Tausendfreund, D. Stöbener, A. Fischer: Influence of displacement gradients on laser speckle photography. *European Optical Society Annual Meeting (EOSAM)*, Porto, Portugal, 12.-16.9.2022, TOM10 S01:2 (2 pp.).
- A. Fischer, D. Stöbener, **L. Schweickhardt**: Characterizing anisotropic surfaces with laser speckles. *World Congress for Optics and Photonics (ICO-25, OWLS-16)*, Dresden, 5.-9.9.2022, No. TS 6-3-03 (2 pp.).
- L. Schweickhardt**, A. Tausendfreund, D. Stöbener, A. Fischer: Speckle-Oberflächenmesstechnik unter Einsatz adaptiver Optiken. 122. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik e. V. (DGaO), Bremen, 21.-23.9.2021, No. A5.
- L. Schweickhardt**, A. Tausendfreund, D. Stöbener, A. Fischer: Speckle pattern modulation for high-resolution displacement measurements. *SPIE Optical Metrology, E-conference*, 21.-26.6.2021, Vol.11782, No.117820D (7 pp.).



## Betreute studentische Arbeiten

In der vorliegenden Arbeit sind Ergebnisse enthalten, die im Rahmen der Betreuung folgender studentischer Arbeiten entstanden sind. Vielen Dank an Fabian Glandorf und Arthur Süß für die wertvollen Beiträge!

F. Glandorf: Implementierung eines DMD Beleuchtungssystems zur Verringerung der spatio-temporalen Unschärfe bei Verschiebungsmessungen mittels Speckle-Fotografie. Masterarbeit, 2021.

A. Süß: Implementierung eines monochromatischen Speckle-Rauheitssensors am Roboterarm zur Quantifizierung der Quereinflüsse Neigung und Wölbung. Bachelorarbeit, 2022.