

# Hochschule für Technik Stuttgart

## Bachelorarbeit

vorgelegt von

Vipin Singh

Bachelorstudiengang Mathematik

Fakultät Vermessung, Informatik und Mathematik

Sommersemester 2022

**Entwicklung eines deflektometrischen  
Prüfaufbaus für spiegelnde Prüfobjekte**

ErstprüferIn:  
ZweitprüferIn:

Prof. Dr.-Ing. Uwe Müßigmann, Hochschule für Technik Stuttgart  
Dipl.-Ing. Sebastian Lichtenberg, NeuroCheck GmbH

# Vorwort

Die vorliegende Bachelorarbeit entstand während meiner Tätigkeit als Bachelorand bei der NeuroCheck GmbH. Zuvor war ich bei der NeuroCheck GmbH seit Beginn meines Bachelor-Studiums als Werkstudent angestellt. Die Werkstudentenanstellung fand im Rahmen des kooperativen Mathematikstudiengangs (Bachelor Mathematik - Studienvariante „Mathe<sup>2</sup>“) der Hochschule für Technik Stuttgart statt. Die NeuroCheck GmbH kooperierte als eines der ersten Unternehmen mit der Hochschule für Technik Stuttgart im Rahmen der Studienvariante. Dabei war es mir möglich, das Erlernte aus der Hochschule stetig in der Praxis zu vertiefen. Die Erfahrungen und Kenntnisse, die ich in der NeuroCheck GmbH sammeln konnte, haben mir auch im Studium an vielen Stellen sehr weitergeholfen. Mit diesem praktischen Hintergrund hatte ich eine sehr schöne und erfolgreiche Studienzeit im Bachelor-Studiengang Mathematik an der Hochschule für Technik Stuttgart.

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich im Rahmen dieser Bachelorarbeit begleitet haben. Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer der Hochschule für Technik Stuttgart, Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Müßigmann, der mich mit stetiger Anteilnahme und konstruktiver Kritik unterstützte. Meinem Betreuer der NeuroCheck GmbH, Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Lichtenberg, gilt mein herzlicher Dank für die vertiefenden Diskussionen über das Thema und sein Interesse an dieser Arbeit. Außerdem bedanke ich mich für die freundliche Unterstützung meiner Kollegen der NeuroCheck GmbH, die mir jeder Zeit mit ihrem Rat zur Seite standen. Zuletzt geht mein Dank an meine Eltern, die mich stets im Laufe meines Studiums entlastet haben.

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Weiterhin erkläre ich, dass die Arbeit nicht anderweitig veröffentlicht oder an anderer Stelle als Prüfungsleistung vorgelegt wurde.

Stuttgart, den 29. Juni 2022

---

Vipin Singh

## **Kurzfassung**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Verfahren der Deflektometrie für spiegelnde und transparente Prüfoberflächen einzuführen und mathematisch zu erklären. Der Fokus liegt darauf, mithilfe der Verfahren die Sichtprüfung für diese Oberflächen zu ermöglichen. Dabei wird erklärt, welche Methoden im wissenschaftlichen Gebiet der Deflektometrie eingesetzt werden, um Oberflächen vollständig zu erfassen. Zur Bearbeitung des Themas werden transparente Brillengläser und spiegelnde Keramikobjekte analysiert und mit den eingeführten Verfahren automatisiert ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung durch die eingeführten Verfahren zeigen, dass es möglich ist, Anomalien der Oberflächenkrümmung spiegelnder und transparenter Prüfobjekte, wie z. B. Pickel, Dellen, Kratzer oder Gravuren, zu erfassen. Dadurch wird es ermöglicht, Oberflächendefekte spiegelnder und transparenter Prüfobjekte zu lokalisieren und qualitative Aussagen der Oberflächenbeschaffenheit zu formulieren.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>3</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>10</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>11</b>
1.1 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	12
1.2 Aufbau der Bachelorarbeit . . . . .	13
1.3 Unternehmensvorstellung . . . . .	13
<b>2 Grundlagen der Deflektometrie</b>	<b>14</b>
2.1 Spiegelnde Oberflächen . . . . .	15
2.2 Rekonstruktion von spiegelnden Oberflächen . . . . .	18
2.2.1 Phasenkodierung . . . . .	20
2.2.2 Frequenzkodierung . . . . .	21
2.2.3 Stochastische Kodierung . . . . .	23
2.2.4 Rekonstruktion der Oberfläche und Regularisierungsproblem . . . . .	25
2.3 Qualitative Sichtprüfung . . . . .	26
<b>3 Sichtprüfung durch Lichtstreuung</b>	<b>29</b>
3.1 Prüfaufbau . . . . .	29
3.2 Verfahren . . . . .	30
3.3 Einsatz von mehreren Streifenmustern . . . . .	33
3.4 Optimierungen . . . . .	37
3.4.1 Unterschiede zwischen Kameraaufnahme und Monitorbild . . . . .	37
3.4.2 Muster mit unterschiedlichen Streifenbreiten . . . . .	38
3.4.3 Verknüpfung mehrerer Kameraaufnahmen . . . . .	41
3.4.4 Nachbearbeitung mit der Fourier-Analyse . . . . .	42

<b>4 Deflektometrische Registrierung</b>	<b>45</b>
4.1 Bestimmung der deflektometrischen Registrierung . . . . .	47
4.1.1 Deflektometrische Registrierung ohne Phasenentfaltung . . . . .	47
4.1.2 Deflektometrische Registrierung mit Phasenentfaltung . . . . .	50
4.2 Auswertung der deflektometrischen Registrierung . . . . .	56
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>61</b>
5.1 Sichtprüfung durch Lichtstreuung . . . . .	62
5.1.1 Durchlichtauswertung . . . . .	62
5.1.2 Spiegelbildauswertung . . . . .	64
5.2 Deflektometrische Registrierung . . . . .	65
5.2.1 Durchlichtauswertung . . . . .	66
5.2.2 Spiegelbildauswertung . . . . .	67
5.3 Diskussion . . . . .	70
<b>6 Abschlussbemerkungen</b>	<b>74</b>
6.1 Zusammenfassung . . . . .	74
6.2 Ausblick . . . . .	76
<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>77</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Spiegelsaal im Schloss von Versailles . . . . .	11
1.2	Spiegelnde Karosserieoberfläche . . . . .	12
1.3	NeuroCheck Logo . . . . .	13
2.1	Cloud Gate Chicaog - The Bean . . . . .	14
2.2	Cloud Gate mit Ausschnitt . . . . .	15
2.3	Spiegelnde und matte Oberflächen . . . . .	16
2.4	Darstellung der Szenen für spiegelnde und matte Oberflächen . . . . .	16
2.5	Rückseitenreflex . . . . .	17
2.6	Beispiel Rückseitenreflex . . . . .	18
2.7	Aufbau einer Deflektometrie-Prüfstation . . . . .	19
2.8	Kodierung und Dekodierung der Objektoberfläche . . . . .	20
2.9	Sinusoidale Streifenmuster . . . . .	21
2.10	Muster der Frequenzkodierung . . . . .	22
2.11	Specklemuster . . . . .	23
2.12	Prinzip der Zuordnung einer stochastischen Kodierung . . . . .	24
2.13	Ergebnis der Zuordnung einer stochastischen Kodierung . . . . .	24
2.14	Regularisierungsproblem . . . . .	25
2.15	Stereo-Methode zur Lösung des Regularisierungsproblems . . . . .	26
2.16	Kratzer an Hell-Dunkel-Übergang eines Streifenmusters . . . . .	27
3.1	Prüfaufbau . . . . .	29
3.2	Lichtbrechung an einem Kratzer . . . . .	30
3.3	Kratzer . . . . .	31
3.4	Eingravierung im Glas . . . . .	32
3.5	Eingravierung im Glas nach Verschiebung des Streifenmusters . . . . .	32
3.6	Rechteckschwingung bzw. <i>engl.: square wave</i> . . . . .	33
3.7	Rechteckförmiges Streifenmuster . . . . .	34
3.8	Zu verknüpfende Bilder . . . . .	35
3.9	Markierte Fehlstellen . . . . .	35
3.10	Verknüpfte Bilder über Minimierung und Maximierung . . . . .	36
3.11	Verknüpfte Bilder über Differenz . . . . .	37
3.12	Unterschied zwischen Muster und Kameraaufnahme . . . . .	38

3.13	Grauwerteverlauf in Form einer Impulsschwingung bzw. <i>engl: pulse wave, rectangular wave</i> . . . . .	39
3.14	Sägezahnschwingung bzw. Kippschwingung . . . . .	39
3.15	Einheits-Impulsschwingung . . . . .	40
3.16	Streifenmuster durch Impulsschwingung . . . . .	41
3.17	Prozess der Hervorhebung von Oberflächendefekten . . . . .	42
3.18	Amplitudenspektrum des Gesamtbildes . . . . .	43
3.19	Bild mit angewandtem frequenzselektives Filter . . . . .	44
4.1	Abbildungssystem einer spiegelnden Oberfläche . . . . .	46
4.2	Muster mit einer Periode zur Phasenkodierung . . . . .	48
4.3	Muster mit unterschiedlichen Perioden zur Phasenkodierung . . . . .	51
4.4	Bestimmung eindeutiger Position . . . . .	53
4.5	Darstellung Spalten- und Zeilenregistrierung . . . . .	57
4.6	Darstellung Spalten- und Zeilenregistrierung eines Brillenglases . . . . .	57
4.7	Spiegelndes Keramikbruchstück mit Delle . . . . .	58
4.8	Deflektometrische Registrierung bei Delle . . . . .	58
4.9	Hervorhebung von Pickeln auf reflektierenden Oberflächen. . . . .	59
5.1	Verwendete Aufbauten für die Verfahren . . . . .	61
5.2	Aufnahmen der Brillengläser bei der Durchlichtauswertung mit Streifenmustern . . . . .	63
5.3	Ergebnisbilder des Verfahrens „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ bei der Durchlichtauswertung . . . . .	63
5.4	Verbesserung der Ergebnisbilder . . . . .	63
5.5	Aufnahmen der Streifenmuster bei der Spiegelbildauswertung . . . . .	64
5.6	Ergebnisbilder des Verfahrens „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ bei der Spiegelbildauswertung . . . . .	65
5.7	Verbesserung der Ergebnisbilder . . . . .	65
5.8	Aufnahmen der Brillengläser bei der Durchlichtauswertung mit sinusoidalen Streifenmustern . . . . .	66
5.9	Bilder der deflektometrischen Registrierung der Zeilen bei der Durchlichtauswertung . . . . .	67
5.10	Ableitung der deflektometrischen Registrierung der Zeilen bei der Durchlichtauswertung . . . . .	67
5.11	Aufnahmen der Prüfobjekte unter Spiegelung der sinusoidalen Streifenmuster	68
5.12	Bilder der deflektometrischen Registrierung der Zeilen bei der Spiegelbildauswertung . . . . .	68
5.13	Ableitungen der Bilder der deflektometrischen Registrierung der Zeilen bei der Spiegelbildauswertung . . . . .	69
5.14	Mexican Hat-Filter angewandt auf die Bilder der deflektometrischen Registrierung der Zeilen . . . . .	69
5.15	Erkennbare kleine Defekte oder Laser-Gravur . . . . .	70

5.16 Sichtbare Beschriftung nach Anwendung des Verfahrens aus Kapitel 3 . . . . .	71
5.17 Erkennbare Oberflächendefekte durch deflektometrische Registrierung . . . . .	72
5.18 Rückseitenreflex bei der deflektometrischen Registrierung . . . . . . . . .	72
5.19 Rückseitenreflex bei „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ . . . . . . . . .	73

# Abkürzungsverzeichnis

- $L_{height}$  Höhe des Monitorbildes in Pixel. 34, 40, 41, 47, 50, 57, 62, 66
- $L_{width}$  Breite des Monitorbildes in Pixel. 33, 34, 39, 40, 47–56, 62, 66
- $\mathbb{R}$  Reelle Zahlen. 39, 40, 45, 46, 56
- $\mathbb{D}$  Definitionsmenge. 55, 56
- $\mathbb{W}$  Wertemenge. 56
- $f_{r,x}$  Bild der deflektometrischen Registrierung der Spaltenpositionen. 56–60
- $f_{r,y}$  Bild der deflektometrischen Registrierung der Zeilenpositionen. 56–59
- $l_r$  Deflektometrische Registrierung. 45, 46, 48, 49, 54–57, 60
- $l_{r,x}$  Deflektometrische Registrierung der Spaltenpositionen. 46–49, 51, 54–56
- $l_{r,y}$  Deflektometrische Registrierung der Zeilenpositionen. 46–49, 51, 54–56

# Kapitel 1

## Einführung

Die optischen Besonderheiten von glänzenden Oberflächen faszinieren zahlreiche Menschen. So wird Glanz bereits seit Jahrhunderten mit Luxus und Reichtum verbunden. Dieser Zusammenhang wird durch den imposanten Spiegelsaal im Schloss von Versailles untermauert (siehe Abbildung 1.1). Nach langer Bauzeit im 17. Jahrhundert bildete dieser Saal die Hauptattraktion des Schlosses und zieht heute noch sehr viele Touristen an [1].



Abbildung 1.1: Spiegelsaal im Schloss von Versailles

Bereits Neugeborene fühlen sich den Reflexionen von Glanzobjekten hingezogen [2]. Verhaltensforscher stellten anhand von Studien die Theorie auf, dass die Zuneigung zu spiegelnden Objekten evolutionär bedingt ist. Durch die Reflexionen auf den Oberflächen soll man glänzende Objekte mit Wasser assoziieren [3]. Auch die industriellen Bereiche wollen diese Faszination der Leute ansprechen. So befinden sich an vielen Stellen im Alltag glänzende Oberflächen, um Menschen zu begeistern. Z. B. in der Automobilindustrie werden täglich große Karosserieflächen glänzend lackiert. Alleine in Deutschland wurden in den Jahren von 1990 bis 2021 im Durchschnitt ungefähr 5 Millionen Personenkraftwagen pro Jahr produziert [4]. Ein großer Teil der Fahrzeuge erhält nach der Lackierung eine spiegelnde Oberfläche. Solche Oberflächen müssen zur Qualitätssicherung durch besondere Verfahren auf Defekte überprüft werden. Dabei stellen sich diese anziehenden Spiegelungen als Probleme heraus. Die spekularen Reflexionen sorgen dafür, dass nicht direkt die spiegelnden Oberflächen, sondern die verzerrten Spiegelbilder der Umgebungen betrachtet

werden. Somit schaut man z. B. in Abbildung 1.2 auf die Karosserieoberfläche, doch sieht darin das verzerrte Spiegelbild des Streifenmusters oder des Roboterarms.



Abbildung 1.2: Spiegelung der Umgebung auf der Karosserieoberfläche [5]

Die riesige Menge an produzierten Bauteilen und die hohen Qualitätsanforderungen machen eine automatisierte Prüfung der Teile unumgänglich. Dabei stoßen die üblichen Verfahren der industriellen Bildverarbeitung auf ihre Grenzen, sodass neue Methoden eingeführt werden müssen. Diese speziellen Anwendungen erfordern den Einsatz von deflektometrischen Prüfaufbauten, die sich die Spiegelung von bestimmten Szenen zunutze machen. In der Industrie sind solche Verfahren schon seit Längerem zur Analyse der Topografie von spiegelnden Freiformflächen etabliert. Deflektometrische Verfahren funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip wie auch die Inspektion von spiegelnden Oberflächen durch Prüfpersonal. Durch die Reflexionen und Verzerrungen auf glänzenden Oberflächen schließt man auf die Form und Krümmung der Oberfläche. Das wissenschaftliche Gebiet der Deflektometrie ist auch heute noch Thema für viele Forschungsarbeiten und wird stetig weiterentwickelt.

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen der Arbeit werden spekular reflektierende Objektoberflächen unter Projektion von bekannten Mustern durch eine Kamera aufgenommen, anschließend ausgewertet und auf Defekte überprüft. Welche Informationen können aus der Beobachtung von Spiegelbildern gewonnen werden? Wie sehen allgemein anwendbare Methoden aus, um spiegelnde Oberflächen qualitativ zu bewerten? Das Ziel der Arbeit ist es, diese Fragen zu erforschen und aufzuklären. Des Weiteren sollen ein Aufbau, die Ansteuerung von Beleuchtung und Kamera und die notwendige Auswertung des Bildmaterials entwickelt werden, durch welche eine Erkennung von Oberflächendefekten ermöglicht wird. Die Umsetzung soll dabei in Form einer Softwareerweiterung, eines sogenannten *Plug-ins*, für NeuroCheck erfolgen.

Während der Arbeit soll außerdem auch ein bestimmter Sonderfall betrachtet werden - transparente Prüfobjekte. Die Problematik ist dabei, dass man neben der Reflexion des Lichts mit der Transmission zu kämpfen hat. Wie auch bei den regulären deflektometrischen Verfahren ist das Ziel, anhand einer verzerrten Szene Aussagen über die Ober-

flächenbeschaffenheit zu treffen. Für die transparenten Objekte gibt es dafür verschiedene Lösungsansätze, um den negativen Einflüssen der Transmission entgegenzuwirken.

## 1.2 Aufbau der Bachelorarbeit

Die Arbeit wird zur Bearbeitung der Frage- und Problemstellungen in sechs Kapitel unterteilt.

Im zweiten Kapitel soll sich mit den theoretischen Grundlagen zur Entwicklung von deflektometrischen Verfahren befasst werden.

Im Anschluss werden in Kapitel 3 und 4 zwei deflektometrische Verfahren beschrieben, um die Fragestellungen der Thesis bearbeiten zu können.

Das fünfte Kapitel dient der Erfassung und Diskussion der Ergebnisse, die durch die eingeführten Verfahren und verwendeten Aufbauten erreicht werden können.

Das letzte Kapitel soll einen Überblick der erzielten Erkenntnisse dieser Arbeit schaffen und einen Ausblick auf zukünftige Verbesserungen der vorgestellten Verfahren geben.

## 1.3 Unternehmensvorstellung

Die vorliegende Bachelorarbeit wird in Kooperation mit der Hochschule für Technik Stuttgart bei der NeuroCheck GmbH angefertigt.

Die NeuroCheck GmbH ist ein Unternehmen, welches System- und Softwarelösungen im Fachgebiet der industriellen Bildverarbeitung anbietet. Dabei blickt das Unternehmen mit Hauptsitz in Remseck am Neckar auf eine Firmengeschichte von über 25 Jahren zurück. Mit nun mehr als 20000 verkauften Applikationen in über 40 Ländern sowie mehreren Partnerunternehmen im Ausland haben die NeuroCheck-Systeme weltweit Anwendungen gefunden.

Mithilfe der NeuroCheck-Software ist es möglich, automatisierte Sichtprüfungen zur Qualitätskontrolle durchzuführen. Hierfür lassen sich vom Anwender komplexe Prüfprogramme nach einem Baukastenprinzip erstellen. Dadurch entstehen vielseitige Anwendungsmöglichkeiten. Diese schaffen weite Teile der Industriebranchen als mögliche Kunden, unter anderem die Automobilindustrie, die Elektronikbranchen und die Medizintechnik.

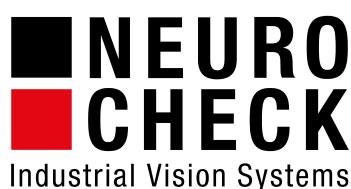


Abbildung 1.3: NeuroCheck Logo [6]

## Kapitel 2

# Grundlagen der Deflektometrie

Zunächst soll im folgenden Kapitel auf die Grundlagen der Deflektometrie und den Stand der Technik eingegangen werden. Der Begriff „Deflektometrie“ leitet sich aus dem lateinischen Wort „deflectere<sup>1</sup>“ und dem griechischen Wort „métron<sup>2</sup>“ ab. Somit bedeutet die Deflektometrie wörtlich übersetzt „Messung der Ablenkung“. Im wissenschaftlichen Kontext wird die Deflektometrie wie folgt definiert:

### Definition 2.1: Deflektometrie

Die *Deflektometrie* bezeichnet allgemein alle Methoden zur berührungslosen optischen Erfassung von Gestaltinformationen spiegelnder Oberflächen durch automatische Auswertung von Spiegelbildern bekannter Szenen. [7]

Die Übersetzung „Messung der Ablenkung“ bezieht sich dabei auf das gemessene Spiegelbild der bekannten Szene. Die Szene wird dabei über eine Oberfläche abgelenkt und schließlich durch einen Sensor als Spiegelbild aufgenommen. Aus dem Zusammenhang zwischen der Szene und dem Spiegelbild können Gestaltinformationen über die spiegelnde Oberfläche berechnet werden.



Abbildung 2.1: Cloud Gate Chicago - The Bean [8]

<sup>1</sup>lat: deflectere: abweichen, abbiegen, ablenken

<sup>2</sup>griech: μέτρον : Maß, Messung

In Abbildung 2.1 erkennt man eine spiegelnde Skulptur, dessen Oberfläche ausschließlich durch die Umgebung und die Spiegelung definiert ist. Für das menschliche Gehirn ist es zunächst nicht schwierig, die Oberflächenform zu interpretieren. Das liegt an der Einbeziehung von Kontextinformationen. So erkennt man z. B. über den Hintergrund und die Umgebung die Form der Skulptur. Zusätzlich mit der Spiegelung der Szene kann man die Krümmung der Oberfläche deuten. Wenn man den Hintergrund ausblendet, erkennt man die Schwierigkeit der Thematik (siehe Abbildung 2.2).

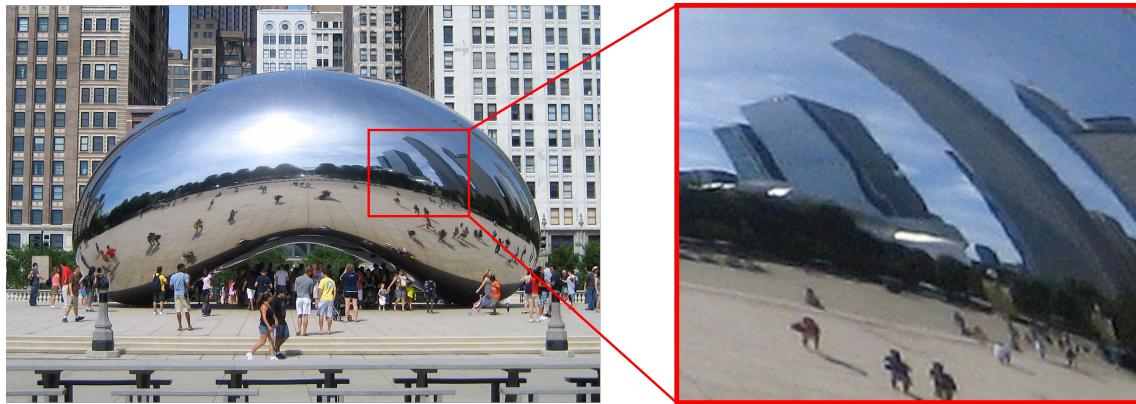


Abbildung 2.2: Cloud Gate mit Ausschnitt. *in Anlehnung an [8]*

Alleine aus dem rechten Ausschnitt von Abbildung 2.2 ist es schon schwieriger zu beurteilen, wie die Skulptur geformt sein könnte. Zieht man nun Vorwissen über die gespiegelte Szene hinzu, wie z. B. das Wissen über senkrecht stehende Gebäude in Chicago, kann man Aussagen zur Gestalt der lokalen Oberfläche treffen. Die Schwierigkeit für die automatische Auswertung ist dabei, eine eindeutige Zuordnung zwischen der Szene und dem Spiegelbild aufzustellen. Diese und ähnliche Aufgaben, in denen Spiegelbilder analysiert werden, fallen in das Themengebiet der Deflektometrie.

Die Definition 2.1 öffnet ein großes Feld für verschiedene Verfahren und Anwendungen. Die Verfahren der Deflektometrie sind auch heute noch Themen für viele Forschungsarbeiten.

## 2.1 Spiegelnde Oberflächen

Zunächst soll auf die zu analysierenden Oberflächen genauer eingegangen werden. Die deflektometrischen Verfahren wurden explizit für spiegelnde Oberflächen entwickelt. Doch aus welchem Grund trifft man die Unterscheidung zwischen spiegelnden und nicht-spiegelnden Objekten? Warum wendet man Verfahren für diffus reflektierende Oberflächen nicht auch für spiegelnde Oberflächen an? Zur Beantwortung dieser Fragen sollte man die Eigenschaften der Oberflächen genauer betrachten. Eine diffus reflektierende Oberfläche strahlt die auftreffenden Lichtstrahlen in viele Richtungen ab, wohingegen spekular reflektierende Oberflächen die Lichtstrahlen in eine Richtung reflektieren. Diffus reflektierende Oberflächen werden als matt oder rau bezeichnet, weil die Lichtstrahlen auf mikroskopischer Ebene auf eine raue Oberfläche treffen. Spekular reflektierende Oberflächen werden

als spiegelnd oder glatt bezeichnet, weil die Lichtstrahlen auf mikroskopischer Ebene auf eine glatte Oberfläche treffen. Abbildung 2.3 zeigt diesen Zusammenhang zwischen der mikroskopischen Oberflächenbeschaffenheit und den daraus folgenden Reflexionseigenschaften.

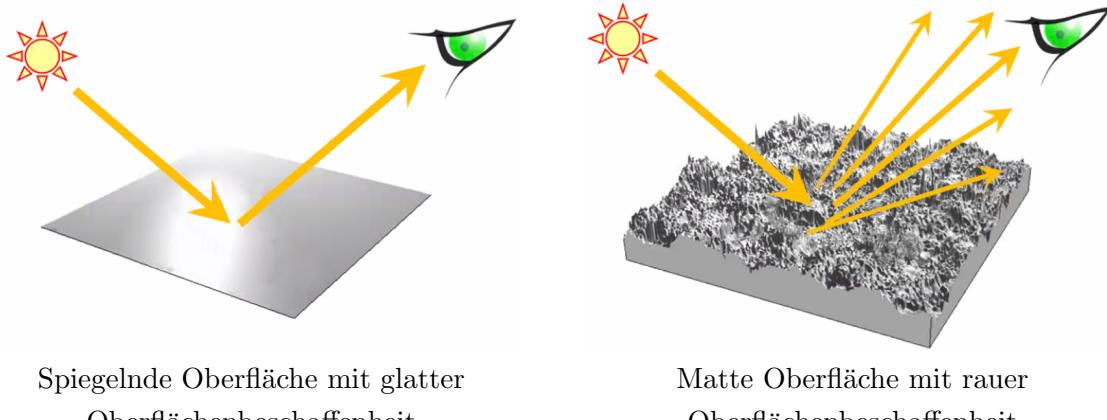


Abbildung 2.3: Spiegelnde bzw. glatte und matte bzw. raue Oberflächen in ihrer mikroskopischen Oberflächenbeschaffenheit. [9]

Durch diese unterschiedlichen Reflexionsarten eignen sich für die Oberflächen unterschiedliche Szenen zur Auswertung der Krümmung. Während eine spiegelnde Oberfläche ein abbildendes System der Szene darstellt, lässt sich eine Szene über eine matte Oberfläche nicht durch eine Spiegelung beobachten. Für matte Oberflächen eignet sich daher eine Projektion mit viel Licht zur Beobachtung einer Szene. Für spiegelnde Oberflächen ist dies aufgrund der hohen Reflexivität ungeeignet. Stattdessen verwendet man zur Darstellung einer Szene direkt einen Bildschirm (siehe Abbildung 2.4).

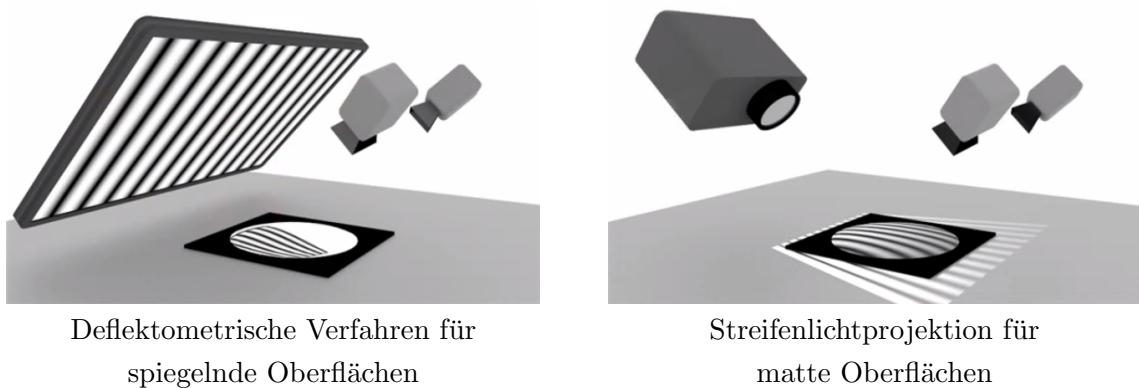


Abbildung 2.4: Darstellung der Szenen für spiegelnde Oberflächen direkt über einen Bildschirm (Deflektometrie) und für matte Oberflächen über einen Projektor (Streifenlichtprojektion). [9]

Im Vergleich erreichen beide Beleuchtungen die Aufnahme einer Szene über der Oberfläche. Dies ist notwendig, um bestimmte Aussagen über die Oberflächen der Prüfobjekte treffen zu können. Der wesentliche Unterschied der beiden Verfahren besteht in der Sensitivität

gegenüber bestimmten Oberflächenmerkmalen. Die deflektometrischen Messverfahren sind neigungssensitiv, da die Reflexion direkt von den Oberflächennormalen an den reflektierten Stellen abhängt. Im Gegensatz dazu ist die Streifenlichtprojektion allein das Hinzufügen einer Projektionslinse, ein höhensensitives Messverfahren für diffus reflektierende Objekte. Die Oberflächenneigung selbst beeinflusst die aufgenommene Szene bei der Streifenlichtprojektion nicht sehr stark. Durch die unterschiedliche Funktionsweise der Beleuchtungen für spiegelnde und matte Oberflächen verwendet man auch unterschiedliche Verfahren zur Auswertung der Messungen. Dennoch wird eine ähnliche Fragestellung behandelt und es lassen sich daher Analogien in den Verfahren feststellen.

Zuletzt ist es noch wichtig, die Besonderheiten von transparenten Objekten zu untersuchen. Die Oberflächen klarer, transparenter Objekte sind glatt und gehören somit zur Kategorie der spiegelnden Oberflächen. Entscheidend für die transparente Eigenschaft ist die hohe Lichttransmission solcher Objekte, d. h. die Eigenschaft, dass das auftreffende Licht durch das Objekt hindurchzulassen. Das bedeutet, dass das Licht in das Objekt eindringen und innerhalb des Objekts gebrochen und reflektiert werden kann (siehe Abbildung 2.5).

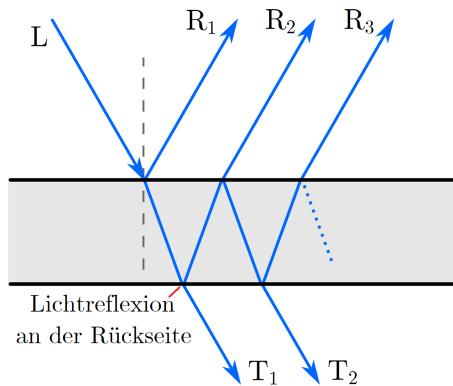


Abbildung 2.5: Brechung und Reflexion an einem ebenen transparenten Objekt.  $L$  bezeichnet den auftreffenden Lichtstrahl,  $R_i$  die Reflexionen des Lichtstrahls  $L$  und  $T_i$  die Transmissionen des Lichtstrahls  $L$ . [10]

Die Lichtreflexion an der Rückseite des Objekts wird Rückseitenreflexus genannt. Dadurch entsteht im Sichtfeld eine Überlagerung von einer doppelt reflektierten Szene. Diese Überlagerung sorgt für Probleme in der Auswertung der aufgenommenen Bilder. In Abbildung 2.6 wird der Rückseitenreflexus bei einer Glaslinse dargestellt. Die Szene ist eine Streifenbeleuchtung durch einen Bildschirm.

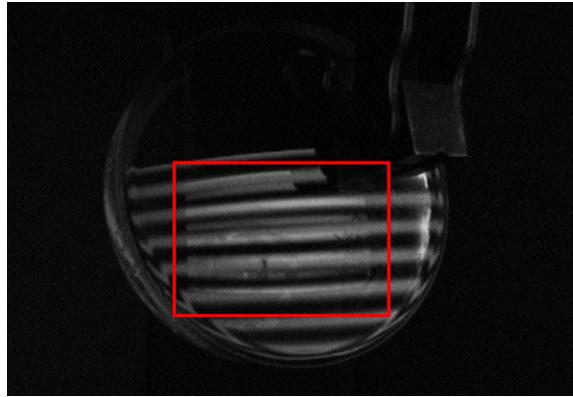


Abbildung 2.6: Beispiel des Rückseitenreflex an einer transparenten Glaslinse. Im roten Rechteck erkennt man eine leichte zweite Reflexion des Streifenmusters auf dem Bildschirm.

Der Effekt des Rückseitenreflexes lässt sich durch bestimmte Verfahren wie z. B. eine un durchsichtige Beschichtung der Oberfläche des transparenten Objekts vermeiden. Dadurch beschädigt man aber auch die Oberfläche des untersuchten Objekts. Andere Möglichkeiten, dies zu reduzieren, sind spezielle Beleuchtungen. So kann man z. B. statt LCD-Bildschirme Beleuchtungen mit Lichtwellen im ultravioletten Bereich verwenden [11]. Ganz umgehen kann man den Rückseitenreflex, indem man keine Reflexion aufnimmt, sondern mit Durchlicht arbeitet. Damit kommen allerdings auch Einschränkungen einher, die bestimmte deflektometrische Verfahren ausschließen.

Mit diesem Wissen über den Einsatz bestimmter Beleuchtungsstrategien für spezielle Oberflächen und Objekte können Verfahren zur Analyse von spiegelnden Oberflächen beschrieben werden.

## 2.2 Rekonstruktion von spiegelnden Oberflächen

Das Hauptforschungsgebiet der gegenwärtigen Deflektometrie ist die Generierung von dreidimensionalen Modellen von spiegelnden Objektoberflächen. Der Aufbau eines solchen Anwendungsfalls sieht eine Beleuchtungseinheit (z. B. einen Bildschirm), einen Sensor (z. B. eine Kamera) und ein zu untersuchendes Objekt vor.

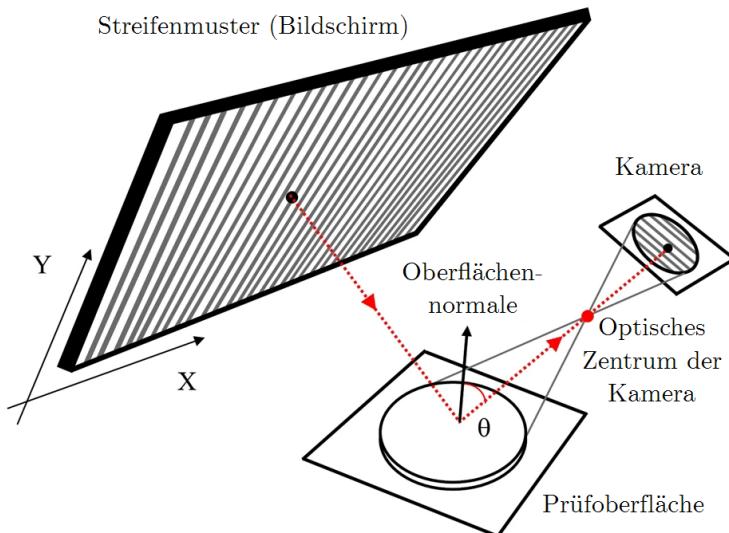


Abbildung 2.7: Aufbau einer Deflektometrie-Prüfstation. *in Anlehnung an [12]*

Wie in Abbildung 2.7 angedeutet, wird ein Muster als bekannte Szene auf ein Prüfobjekt abgebildet und anschließend von einer Kamera aufgenommen. Das grundlegende Prinzip basiert darauf, dass jeder durch die Kamera aufgenommene Punkt des Objekts dem Punkt auf dem Bildschirm zugeordnet wird, der den Objektpunkt beleuchtet bzw. der am Objektpunkt in die Kamera reflektiert wird. Dabei ordnet man jedem Pixel des projizierten Musters sein zugehöriges Pixel des erzeugten Musters auf dem Bildschirm zu. Durch diese Zuordnung von Kamera- und Bildschirmpunkten lassen sich Neigungsinformationen der Oberfläche berechnen. Dies kann durch Strahlenverfolgungen erreicht werden. In Abbildung 2.7 lässt sich das über die in Rot eingezeichneten Vektoren erkennen. Die Schwierigkeit liegt in der eindeutigen Zuordnung zwischen der Szene und dem Spiegelbild. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze, dies zu erreichen. Grundlegend ist dabei die Kodierung der Objektoberfläche (siehe Definition 2.2), damit diese durch die Kamera aufgenommen werden kann. Die Kamera digitalisiert dann die kodierte Oberfläche zu einem oder mehreren Bildern. Unter Berücksichtigung der Kodierung können die Bilder durch einen entsprechenden Softwarealgorithmus dekodiert werden und man erhält damit die Zuordnung zwischen der Szene und dem Spiegelbild (siehe Abbildung 2.8).

### Definition 2.2: Kodierung der Objektoberfläche

Die Abbildung einer oder mehrerer vordefinierter Szenen auf eine spiegelnde Oberfläche wird als *Kodierung der Objektoberfläche* bezeichnet. Das Ziel ist es dabei die Punkte aus der Szene eindeutig durch eine oder mehrere Aufnahmen der Oberfläche zu identifizieren.

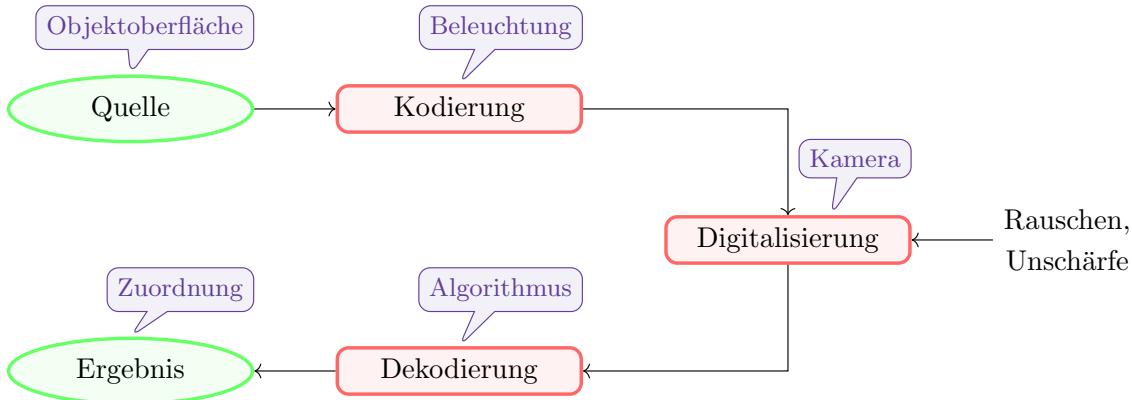


Abbildung 2.8: Kodierung und Dekodierung der Objektoberfl\u00e4che.

Die Art, wie man die Informationen in den digitalen Kanal \u00f6bertr\u00e4gt, ist entscheidend f\u00fcr eine gute Zuordnung. Aus diesem Grund besch\u00e4ftigen sich einige wissenschaftlichen Forschungsarbeiten mit der optimalen Kodierung der Objektoberfl\u00e4che. Auf eine Auswahl von M\u00f6glichkeiten aus dem heutigen wissenschaftlichen Stand soll im Folgenden eingegangen werden.

### 2.2.1 Phasenkodierung

Die am h\u00e4ufigsten eingesetzte Kodiermethode im Kontext der Deflektometrie ist die Phasenkodierung. Dieser Ansatz wird im Themengebiet der „Phasenmessenden Deflektometrie“ beschrieben. Dabei verwendet man Streifenmuster die entlang der Ausbreitung der Streifen, den Grauwertverlauf einer trigonometrischen Funktion (z. B. Sinus- oder Kosinus-Funktion) annehmen. Solche Muster nennt man auch sinusoidale Streifenmuster. Die Szene bzw. der Monitor wird dabei \u00f6ber die Phase der Sinus-Funktion kodiert. Das hei\u00dft, jeder Punkt auf einem Monitor, angegeben durch eine  $x$ - und eine  $y$ -Koordinate, wird durch eine Phase  $\phi_x$  in  $x$ -Richtung und eine Phase  $\phi_y$  in  $y$ -Richtung kodiert. Verwendet man Streifenmuster, stellt man die Kodierung in zwei Bildern dar. Das erste Bild kodiert die Spaltenpositionen durch die Phasen  $\phi_x$  und das zweite Bild kodiert die Zeilenpositionen durch die Phasen  $\phi_y$  (siehe Abbildung 2.9).

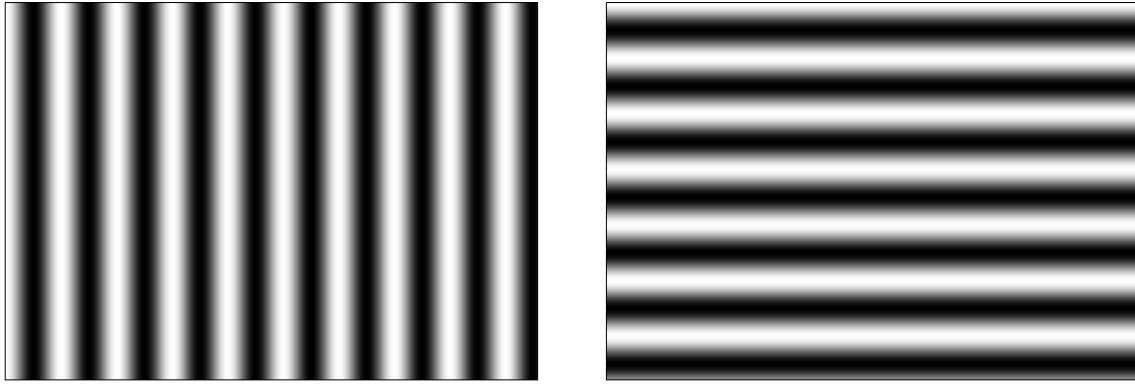


Abbildung 2.9: Sinusoidale Streifenmuster zur Kodierung der Szene durch die Phasen  $(\phi_x, \phi_y)$ .

Der Vorteil ist dabei die Kodierung durch die Grauwerte, die unabhängig von benachbarten Positionen dekodiert werden können. Zur Dekodierung müssen aus den Grauwerten zunächst die Phasen bestimmt werden. Dies funktioniert über ein sogenanntes Phasenschiebeverfahren [13], bei dem weitere Bildaufnahmen mit Phasenverschiebungen der trigonometrischen Funktion vorgenommen werden. Durch die Periodizität der verwendeten trigonometrischen Funktion sind die bestimmten Phasen zunächst noch relativ zu den einzelnen Perioden angegeben. In einem weiteren Schritt muss eine sogenannte Phasenentfaltung bzw. ein „Phase Unwrap“ durchgeführt werden (siehe auch Definition 4.2), damit die absoluten Phasen  $(\phi_x, \phi_y)$  bestimmt werden können. Die Dekodierung über das „Phase Unwrap“ erfolgt dabei durch die Verwendung von weiteren sinusoidalen Streifenmustern mit unterschiedlicher Frequenz. Diese Art der Kodierung erfordert deshalb weitere Bilder. Ein solches Verfahren wird im Kapitel 4.1 genauer beschrieben.

Es sind damit zunächst mehrere Bildaufnahmen erforderlich. Da solche Verfahren damit mehr Ressourcen verwenden, fokussieren sich einige Forschungsarbeiten darauf, die Anzahl der benötigten Muster zu reduzieren. Der heutige technische Stand ermöglicht es bereits z. B. durch Überlagerung von Mustern und weiteren Optimierungen, die Phasendekodierung durch eine einzige Kameraaufnahme umzusetzen (vgl. [14]). Allerdings wird dadurch mehr Information kodiert auf gleichem Ort, wodurch Unschärfen und starke Krümmungen des Objekts das Ergebnis der deflektometrischen Messung stärker verfälschen können.

### 2.2.2 Frequenzkodierung

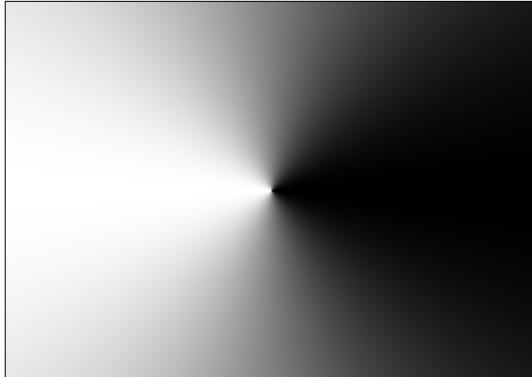
Als Alternative zur Phasenkodierung kann man die trigonometrischen Funktionen auch nutzen, um die Ortskoordinaten des Bildschirms über Frequenzen zu kodieren. Hierfür eignet sich die Darstellung der Koordinaten in der Polarform.

$$(x, y) \mapsto (r, \phi)$$

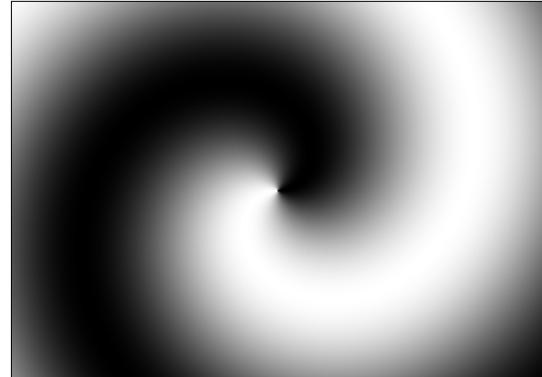
Wenn man im Folgenden den Radius  $r$  einer speziellen Frequenz und die Phase  $\phi$  als Phasenverschiebung einer trigonometrischen Funktion zuweist, erhält man zeitabhängige Muster. So könnte zum Beispiel durch

$$f_t(r, \phi) = 1 + \sin(2\pi rt + \phi)$$

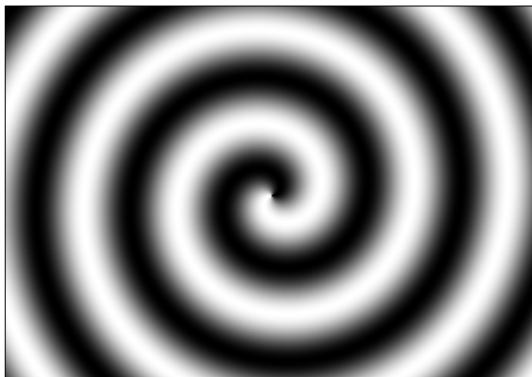
die Kodierung der Szene in Abhängigkeit der Zeit  $t$  angegeben sein. In Abbildung 2.10 wird eine Kodierung dieser Art zu bestimmten Zeitpunkten abgebildet.



Muster zum Zeitpunkt  $t = 0$



Muster zum Zeitpunkt  $t = 1$



Muster zum Zeitpunkt  $t = 4$



Muster zum Zeitpunkt  $t = 10$

Abbildung 2.10: Muster der Frequenzkodierung der Szene zu festen Zeitpunkten  $t$ .

Zur Dekodierung muss hier über eine gewisse Zeit die Frequenz der einzelnen Bildpunkte gemessen werden. Zusätzlich muss der Phasenwinkel  $\phi$  bestimmt werden. Dafür kann ein ähnliches Verfahren wie auch bei der Bestimmung der Phase im vorhergehenden Abschnitt 2.2.1 eingesetzt werden. Zur Optimierung des Rechenaufwands ist es auch möglich, jeder Ortskoordinate eine eigene Frequenz zuzuweisen, damit der Phasenwinkel nicht explizit bestimmt werden muss.

Da in diesem Kodierverfahren nicht mehr die Grauwerte des Bildes selbst den Ort kodieren, ist es unempfindlich gegenüber Nichtlinearitäten in den Anzeige- oder Aufnahmefarben. Außerdem lassen sich mehrere Signale überlagern und durch die Frequenz trennen, d. h. es lassen sich außer dem Ort noch zusätzliche Informationen kodieren. Ein großer Nachteil im Vergleich zur Phasenkodierung ist allerdings die lange Messzeit der Frequenz [9].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird nicht weiter auf dieses Kodierverfahren eingegangen.

### 2.2.3 Stochastische Kodierung

Bei der stochastischen Kodierung nutzt man ein zufällig generiertes Muster als Szene. Geeignet für dieses Verfahren sind sogenannte „Specklemuster“ [15]. Es handelt sich dabei um bandbegrenzte Muster mit zufällig verteilten Grauwerten. Aufgrund der Unschärfe und des Rauschens in den Bildern, welche durch eine Kameraaufnahme einfließen, ist die Bandbegrenztheit notwendig, um eine Dekodierung zu ermöglichen. Abbildung 2.11 zeigt ein solches Muster.

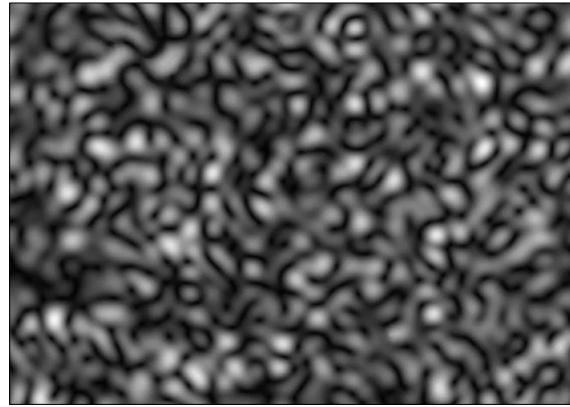


Abbildung 2.11: Specklemuster.

Das Grundprinzip der Dekodierung für dieses Kodierverfahren ist das Verfolgen der Punkte beim Verschieben des Specklemusters. Es wird zunächst die Spiegelung des Specklemusters auf der Objektoberfläche aufgenommen und ein Referenzpunkt definiert. Nach der Verschiebung des Specklemusters (z. B. in x-Richtung) wird dieser Referenzpunkt in dem zweiten Bild über seine Umgebung gesucht. Dabei verwendet man einen Algorithmus zur Berechnung der zweidimensionalen Bildkorrelation, der die höchste Übereinstimmung mit der Umgebung sucht. Wenn der verschobene Referenzpunkt gefunden wurde, wird an derselben Stelle der Punkt im ersten Bild markiert. Der markierte Punkt ist dann der neue Referenzpunkt, der im zweiten Bild gesucht wird. Dieser Vorgang wiederholt sich, solange die Referenzpunkte im Bild liegen. Abbildung 2.12 zeigt schematisch das Verfahren zur Dekodierung.

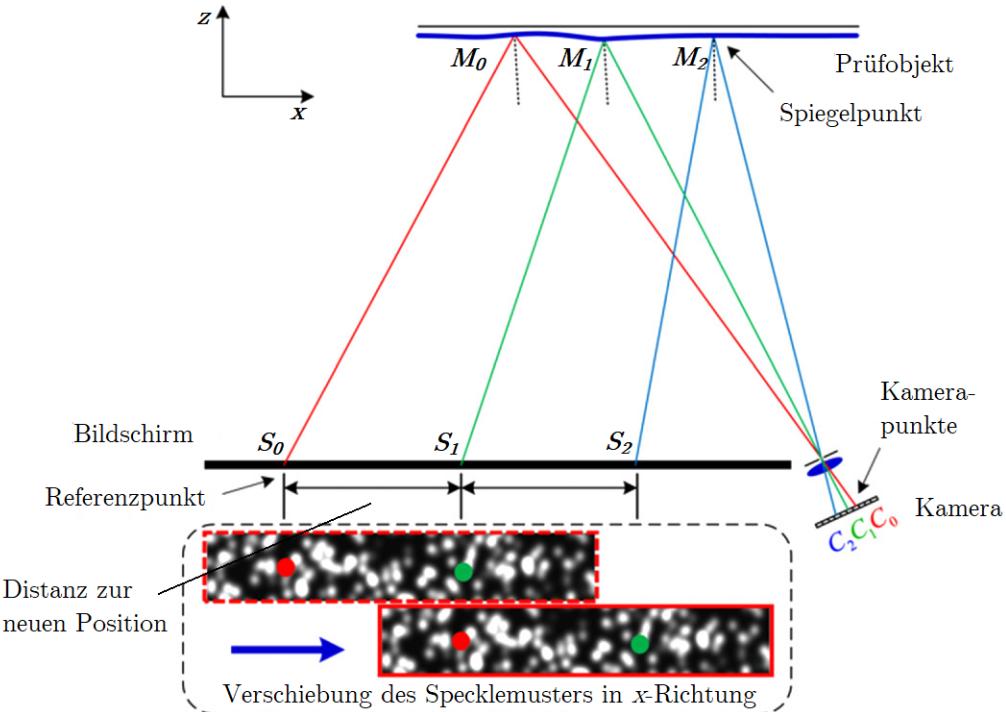


Abbildung 2.12: Prinzip der Zuordnung einer stochastischen Kodierung. *in Anlehnung an [15]*

Führt man dasselbe auch für eine andere Richtung (z. B. in y-Richtung) durch, erhält man ein Raster auf dem Objekt, an dem die Objektpunkte zugeordnet wurden (siehe Abbildung 2.13).

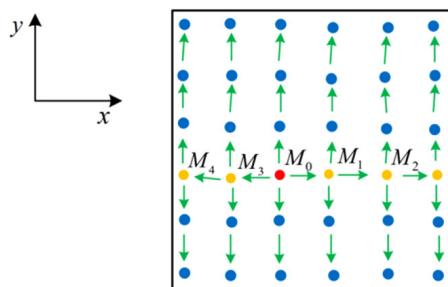


Abbildung 2.13: Ergebnis der Zuordnung einer stochastischen Kodierung. Die grünen Pfeile zeigen an, von welchem Referenzpunkt man auf die nächste Zuordnung kam. *in Anlehnung an [15]*

Im Vergleich zu den vorgestellten Kodierverfahren in den vorherigen Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2 liefert die Dekodierung in diesem Fall nur eine begrenzte Auflösung und keine vollflächige Zuordnung. Außerdem ist dieses Verfahren nicht anwendbar für Objekte, die eine große Verzerrung des Musters erzeugen, da die zweidimensionalen Bildkorrelation ansonsten die Referenzpunkte nicht finden kann. Dennoch sind große Vorteile dieses Verfahrens, der geringe Rechenaufwand und die Möglichkeit, durch drei Bilder eine erfolgreiche Dekodierung durchzuführen [15].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird nicht weiter auf dieses Kodierverfahren eingegangen.

#### 2.2.4 Rekonstruktion der Oberfläche und Regularisierungsproblem

Durch das Vorgehen nach Abbildung 2.8 und die beschriebenen Kodiermöglichkeiten kann die Zuordnung der Kamerapunkte und der Bildschirmpunkte erfolgen. Mithilfe weiterer Schritte kann man daraus die Oberfläche rekonstruieren.

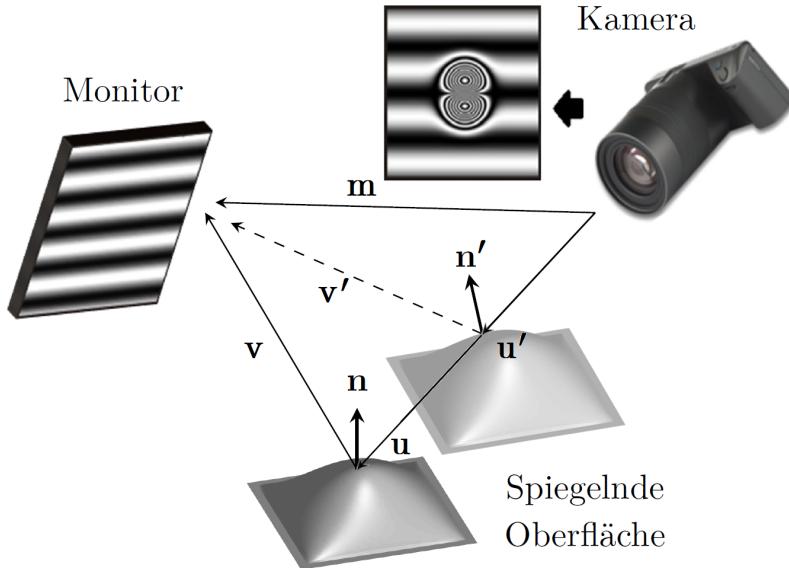


Abbildung 2.14: Mehrere Positionsmöglichkeiten für die spiegelnde Oberfläche bei gleicher Zuordnung von Kamera- und Bildschirmpunkten, auch Regularisierungsproblem genannt. *in Anlehnung an [16]*

Abbildung 2.14 zeigt die Strahlenverfolgung zur Bestimmung der Oberflächennormalen  $n$ . Zunächst benötigt man neben der Zuordnung zusätzliche Informationen über den Systemaufbau. Das umfasst die Positionen und Ausrichtungen der Kamera und des Monitors im Raum, womit man die Zuordnung in Weltkoordinaten angeben kann. Dadurch ist der Vektor  $m$  sowie die Richtung des Sichtvektors  $u$  bestimmt. Es ist zwar bekannt, welcher Kamerapunkt durch welchen Punkt des Bildschirms beleuchtet wird, allerdings ist dadurch das optische System nicht ausreichend beschrieben, um die Länge des Sichtvektors  $u$  anzugeben. Es fehlt die Lage der Oberfläche. Wäre diese bekannt, könnte der Reflexionsvektor  $v$  mit

$$v = m - u$$

bestimmt werden. Mithilfe des Reflexionsgesetzes kann man aus dem Reflexionsvektor  $v$  und dem Sichtvektor  $u$  den Normalenvektor  $n$  bestimmen:

$$n = \frac{v - u}{\|v - u\|} \quad (2.1)$$

Der Sichtvektor  $u$  lässt sich für jeden Kamerapunkt aufstellen. Berechnet man nach der Überlegung die Normalenvektoren  $n$  für jeden Kamerapunkt, erhält man ein Vektorfeld,

welches Normalenfeld genannt wird. Damit wären die Neigungsinformationen der Oberfläche bekannt.

Durch die unzureichende Information über die Lage der spiegelnden Oberfläche, erhält man entlang der Richtung eines Sichtvektors  $u$  unendlich viele potenzielle Normalenvektoren  $n'$ . Man bekommt somit auch viele verschiedene Normalenfelder für eine eindeutige Zuordnung von Kamera- und Bildschirmpunkten. Diese Mehrdeutigkeit wird als Regularisierungs- oder Deflektometrieproblem bezeichnet. Zur Auflösung des Regularisierungsproblems gibt es verschiedene Ansätze. Ein solcher Ansatz ist die Stereo-Methode. Dabei werden zwei Aufnahmen aus unterschiedlichen Positionen verwendet. Man bestimmt für beide Aufnahmen jeweils eine Zuordnung von Kamera- und Bildschirmpunkten. Somit entstehen für beiden Aufnahmen mehrere potenzielle Normalenfelder. Bestimmt man die Korrelation zwischen den Normalenfeldern der unterschiedlichen Aufnahmen, sollte man eine Lage finden, an denen die Normalenfelder übereinstimmen. Das Normalenfeld in dieser Lage entspricht damit dem tatsächlichen Normalenfeld (siehe Abbildung 2.15). Dieses und auch weitere Verfahren zur Auflösung des Regularisierungsproblems wird in der Dissertation von J. Balzer näher thematisiert[17].

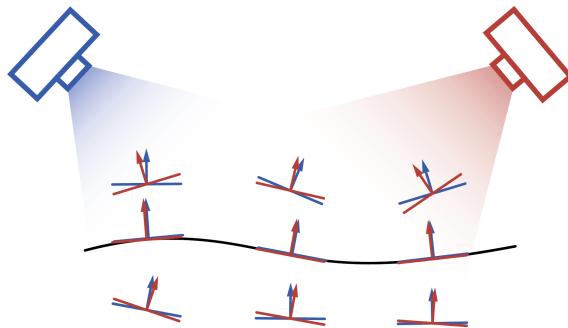


Abbildung 2.15: Stereo-Methode zur Auflösung der Mehrdeutigkeit der Normalenfelder.  
Die eingezeichneten Pfeile sind die potenziellen Normalenvektoren auf unterschiedlichen Höhen. [16]

Schließlich ist es möglich, aus dem Normalenfeld die räumlichen Informationen der Oberfläche zu berechnen. Dafür kann man zunächst aus den Normalenvektoren die zugehörigen Tangentialebenen berechnen, die über je zwei Richtungsvektoren definiert sind. Diese Richtungsvektoren bilden die Tangentialfelder des Prüfobjekts. Man kann über eine Integration der Tangentialfelder in ausgewählte Richtungen Kurven bestimmen, die auf der Oberfläche des Objekts liegen. Durch diese Integration erhält man einen Höhenzusammenhang der Oberflächenpunkte. Wenn zusätzlich die Lage eines Oberflächenpunkts im Raum gegeben ist, kann man die Positionen der Oberflächenpunkte im Raum angeben [18].

## 2.3 Qualitative Sichtprüfung

Der Bereich der qualitativen Sichtprüfung hat grundlegend die Aufgabe, Bilder von Prüfobjekten nach bestimmten Kriterien in gut und fehlerhaft zu unterteilen. Im Rahmen

dieser Arbeit werden als Prüfobjekte die spiegelnden Oberflächen oder auch transparente Objekte untersucht. Zur Bildaufnahme von spiegelnden Oberflächen verwendet man Aufbauten, die in der Regel ähnlich sind zum Aufbau aus Abbildung 2.7. Zur Analyse dieser spiegelnden Oberflächen ist es nicht unbedingt nötig, zuerst ein dreidimensionales Oberflächenmodell zu erzeugen. Ein wesentlicher Unterschied ist deshalb, dass die Informationen über den Systemaufbau nicht zwingend notwendig für die Berechnungen sind. Um eine möglichst allgemein einsetzbare Lösung zu entwickeln, ist dies ein essenzieller Vorteil. Die Vorgehensweise bei diesen Verfahren basiert in den meisten Fällen darauf, die Abweichungen der Oberflächenstruktur zu einem Referenzobjekt zu bewerten. Abhängig von den einzelnen Oberflächenmerkmalen können verschiedene Muster und Strategien zur Auswertung eingesetzt werden.

In seiner Dissertation „Deflektometrie zur automatischen Sichtprüfung und Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen“ [18] listet Stefan Bruno Werling vom Karlsruher Institut für Technologie einige Auswertungsmöglichkeiten auf. Daraus sind die Folgenden eine Auswahl seiner Strategien:

- Untersucht man auf der Oberfläche eines Objekts ein sinusoidales Streifenmuster, dann können im Frequenzraum Abweichungen des Musters von einem „Idealmuster“ bzw. Referenzmuster festgestellt werden. Dadurch entdeckt man Unterschiede in der Oberflächenkrümmung. Die Transformation des Bildes in den Frequenzraum wird durch die Fourier-Transformation erreicht.
- Nutzt man zur Auswertung ein Schachbrettmuster, so können durch die Wahl eines geeigneten Schwellwerts bestimmte Flächen segmentiert und geometrisch analysiert werden. Nach der Analyse sollen Anomalien der geometrischen Merkmale Aussagen über die Krümmung treffen.
- Besonders kleine Fehler und Defekte der Oberflächenstruktur lassen sich an Hell-Dunkelübergängen gut hervorheben. Hierfür kann man einfache Streifenmuster analysieren, wie es in Abbildung 2.16 gezeigt ist. Dieses Verfahren wird im Kapitel 3 näher beschrieben.

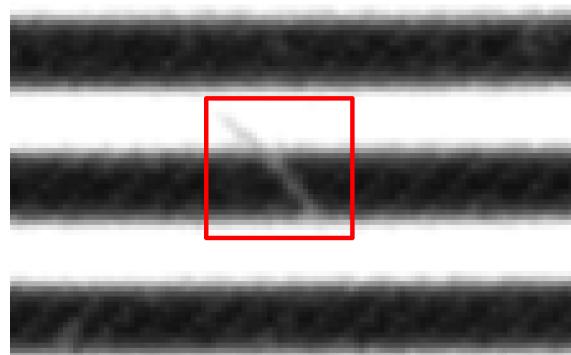


Abbildung 2.16: Kratzer an Hell-Dunkel-Übergang eines Streifenmusters

Neben diesen Verfahren gibt es auch noch die Möglichkeit, die Krümmung zu analysieren, indem man die Zuordnung zwischen Kamera- und Bildschirmkoordinaten (siehe Abschnitt 2.2) auswertet. Analytisch betrachtet ändert sich bei starken lokalen Krümmungen der Oberfläche auch die Oberflächennormale an der lokalen Stelle besonders stark. Mit dem Reflexionsgesetz wird damit kenntlich, dass lokal in der Reflexion große Abweichungen von einer ebenen Spiegelung auftreten. Die Abweichung von einer ebenen Spiegelung lässt sich in der beschriebenen Zuordnung direkt erkennen, ohne weitere Systemparameter berücksichtigen zu müssen. Dies wird im Abschnitt 4.2 genauer behandelt.

Durch die Variabilität der deflektometrische Verfahren und der vielen Möglichkeiten der qualitativen Sichtprüfung lassen sich z. B. durch Veränderung bestimmter Muster zahlreiche verschiedene Verfahren aufstellen, um eine Objektoberfläche zu analysieren. Aus dem Grund wird keine allgemeine Funktionsweise von deflektometrischen Verfahren für die qualitative Sichtprüfung beschrieben, sondern auf konkrete Verfahren eingegangen, wie es z. B. in Kapitel 3 ausgeführt wird.

# Kapitel 3

## Sichtprüfung durch Lichtstreuung

Dieses Kapitel legt den Schwerpunkt auf die Erkennung von kleineren Oberflächendefekten auf transparenten Prüfobjekten, wie z. B. Kratzer. Dabei sollen insbesondere Beschädigungen von Brillengläsern kenntlich gemacht werden.

### 3.1 Prüfaufbau

Die folgende Abbildung 3.1 zeigt eine Skizze des verwendeten Prüfaufbaus. Zur Vereinfachung werden in der Skizze keine Halterungen dargestellt.

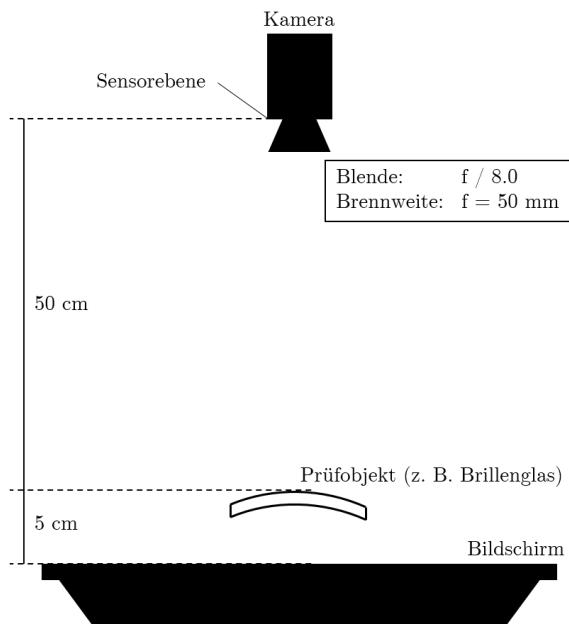


Abbildung 3.1: Prüfaufbau (Abbildung nicht maßstabsgerecht)

Die Parameter des Prüfaufbaus wie z. B. Kameraeinstellungen und Entfernungen lassen sich aus Abbildung 3.1 entnehmen. Es gilt zu beachten, dass die Entfernung der Prüfobjekte zur Kamera nicht am Objektiv, sondern an der Sensorebene gemessen wird. Der Grund liegt darin, dass Objektive unterschiedliche Größen haben, weshalb die Entfernung für verschiedene Objektive unterschiedlich sein würde. Die Sensorebene einer Ka-

mera ist die Position des Kameratasors, an der das einfallende Licht aufgenommen wird. Zur Erzeugung des Bildmaterials wird ein Monitor als Durchlichtbeleuchtung verwendet, um die speziellen Eigenschaften der Lichtstreuung an den Oberflächenbeschädigungen zu nutzen. Auf diese Eigenschaften wird im Kapitel 3.2 weiter eingegangen. Die Objekte zwischen der Kamera und der Beleuchtung sind dabei transparente Brillengläser mit Oberflächenbeschädigungen. Die Oberflächenbeschädigungen umfassen Eingravierungen, Kratzer und ähnliche Fehlstellen.

## 3.2 Verfahren

Es soll ein Verfahren beschrieben werden, das es ermöglicht, Kratzer und ähnliche Defekte mittels Methoden aus der Deflektometrie sichtbar zu machen. Man nutzt die abweichen- de Lichtstreuung an Kratzern und anderen Oberflächenbeschädigungen im Gegensatz zur idealen Oberfläche des Objekts. Das folgende Verfahren lässt sich mit geeigneter Anpas- sungen des Versuchsaufbaus auch auf spiegelnde Oberflächen anwenden. Dabei gilt es zu beachten, dass Spiegelbilder anstelle von Bildern der Durchlichtprojektionen ausgewertet werden.

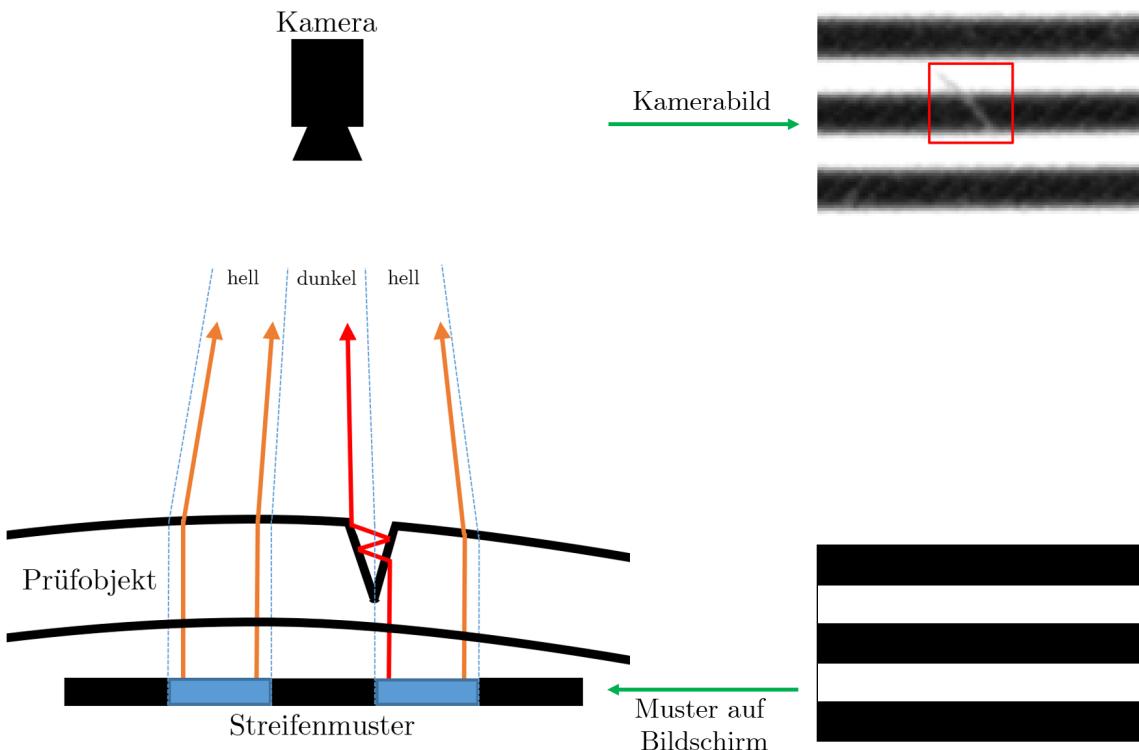


Abbildung 3.2: Querschnitt eines Brillenglases mit Lichtbrechung an einem Kratzer. Die blauen Stellen entsprechen den hellen Streifen und die schwarzen Stellen den dunklen Streifen auf dem Monitor. (Abbildung nicht maßstabsgetreu)

In Abbildung 3.2 wird schematisch die Überlegung hinter dem Ansatz dargestellt. Man verwendet ein Streifenmuster und bildet dieses durch einen geeigneten Bildschirm auf ein Prüfobjekt ab. Für transparente Prüfobjekte kann man das Streifenmuster als Durch-

lichtbeleuchtung abbilden (vgl. Abbildung 3.2), um den Rückseitenreflex (siehe Abschnitt 2.1) zu verhindern. Im Falle von spiegelnden nicht-transparenten Prüfobjekten bildet man das Muster von oben auf das Prüfobjekt ab (vgl. Abbildung 2.7). Mit der Kamera wird schließlich das abgebildete Muster auf dem Prüfobjekt aufgenommen. Dabei fällt an den Hell-Dunkelübergängen Licht vom hellen Streifen in den Kratzer. Durch den Kratzer werden manche Lichtstrahlen so gestreut, dass diese an der Stelle des dunklen Streifens in den Kamerasensor gelangen (siehe roten Lichtstrahl in Abbildung 3.2). Man erkennt im Kamerabild eine lokale Fehlstelle, da der Kratzer heller ist als der umliegende dunkle Streifen. Analog dazu erkennt man im hellen Streifen lokal eine etwas dunklere Stelle. Durch Anpassung der Kameraeinstellungen kann man beeinflussen, wie deutlich man den Kratzer sieht. Z. B. kann dies durch die Erhöhung der Belichtungszeit oder weitere Öffnung der Blende geschehen. Dadurch wird ein Oberflächendefekt im dunklen Streifen zwar besser und stärker sichtbar, allerdings ist es möglich, die Informationen über den Defekt im hellen Streifen zu verlieren. Dies liegt daran, dass auch die dunklere Stelle im hellen Streifen so hell werden kann, dass sie nicht mehr von dem hellen Streifen selbst zu unterscheiden ist. Dieses Problem erkennt man in der Abbildung 3.3.

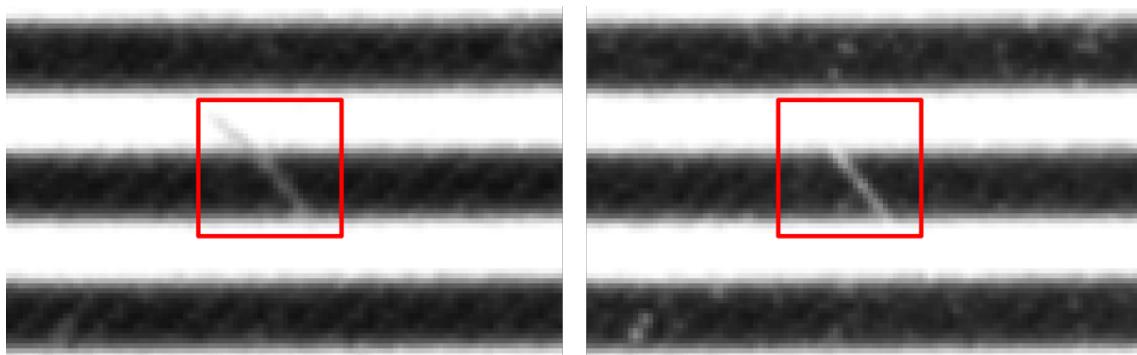


Abbildung 3.3: Kratzer an Hell-Dunkel-Übergang. Links mit weniger weit geöffneten Blende im Vergleich zu rechts.

Trotz der fehlenden Information hat das rechte Bild den Vorteil, dass durch den höheren Kontrast zwischen dem Oberflächendefekt und dem Hintergrund eine bessere Erkennung möglich ist. Je ausgeprägter die Beschädigung in der Oberfläche ist, desto mehr Licht wird an der Stelle gestreut und die Beschädigung wird besser erkennbar.



Abbildung 3.4: Schlecht erkennbare Eingravierung im Glas.

In Abbildung 3.4 stellt man fest, dass kleine Defekte der Oberflächenstruktur, wie hier z. B. die Eingravierung, nur zum Teil und besonders in der Nähe der Übergänge zu erkennen sind. Nach Verschiebung des Streifenmusters ist die Eingravierung, die sich im roten Rechteck in Abbildung 3.4 befindet, nicht länger erkennbar. Zur Demonstration wurde hierfür das rote Rechteck aus Abbildung 3.4 an dieselbe Stelle in Abbildung 3.5 übertragen.



Abbildung 3.5: Nicht erkennbare Eingravierung im Glas, nach Verschiebung des Streifenmusters unter dem Prüfobjekt (siehe rotes Rechteck, vgl. Abbildung 3.4).

Daraus lassen sich bestimmte Folgerungen ziehen. Zunächst decken solche Streifenmuster nur unmittelbar an den Übergängen zuverlässig Defekte auf. Das bedeutet, um Defekte an bestimmten Stellen zu erfassen, muss das verwendete Streifenmuster an den Stellen Übergänge haben. Das bedeutet auch, dass Muster mit schmaleren Streifen aufgrund weiterer Übergänge besser geeignet sind, um auch kleinere Oberflächendefekte sichtbar zu machen. Allerdings führt dies auch dazu, dass stets nur kleine Teile der Defekte zu erkennen sind. Als Lösung dieses Problems kann man mehrere Streifenmuster verwenden, deren Streifen stets in ihrer Ausbreitungsrichtung verschoben sind. Verknüpft man die sichtbaren Teile der Defekte, kann man in einem vollständigen Gesamtbild alle Oberflächendefekte ab einer bestimmten Mindeststärke sichtbar machen. Die Mindeststärke hängt dabei unter anderem von den Kameraeinstellungen, der Beleuchtungsstärke und den verwendeten Streifenmustern ab.

### 3.3 Einsatz von mehreren Streifenmustern

Die verwendeten Streifenmuster haben entlang ihrer Ausbreitungsrichtung den Grauwertverlauf einer Rechteckschwingung.

Die periodische Einheitsrechteckschwingung  $s_f(t)$  sei definiert durch (vgl. [19]):

$$s_f(t) := \operatorname{sgn}(\sin(2\pi ft)) \quad (3.1)$$

$\operatorname{sgn}(x)$  bezeichnet hierbei die Vorzeichenfunktion mit:

$$\operatorname{sgn}(x) := \begin{cases} -1 & \text{für } x < 0 \\ 0 & \text{für } x = 0 \\ 1 & \text{für } x > 0 \end{cases}$$

Die Periodendauer  $T$  der Einheitsrechteckschwingung  $s_f(t)$  steht über den Kehrwert im Zusammenhang mit der Frequenz  $f$ :

$$T = \frac{1}{f}$$

Für  $f = \frac{1}{3}$  und  $f = \frac{1}{4}$  sieht das Schaubild der Funktion aus wie in Abbildung 3.6:

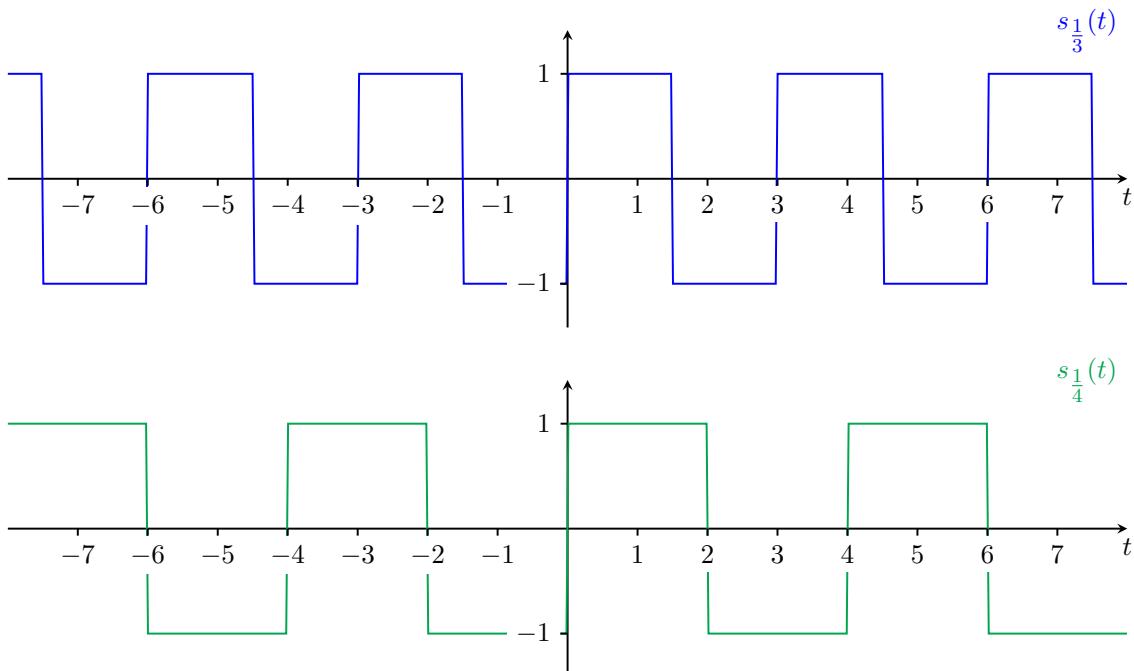


Abbildung 3.6: Einheitsrechteckschwingung (engl.: square wave) für  $f = \frac{1}{3}$  (in blau) und  $f = \frac{1}{4}$  (in grün).

Mithilfe der Einheitsrechteckschwingung aus Gleichung 3.1 lässt sich ein Streifenmuster mit Ausbreitungsrichtung in  $x$  ausdrücken durch:

$$m_k(x, y) = A_m \left( 1 + s_f \left( x - \frac{1}{2\pi f} \psi_k \right) \right), \quad (3.2)$$

$$f = \frac{N_p}{L_{width}}, \quad \psi_k = (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}}, \quad k \in \{1, \dots, N_{shift}\}$$

Das Streifenmuster aus Gleichung 3.2 ist durch die Periodizität der Einheitsrechteckschwingerung auch periodisch zur Ausbreitungsrichtung.  $A_m$  bezeichnet die Amplitude,  $f$  die Frequenz,  $N_p$  die Anzahl der Perioden über die Monitorbreite  $L_{width}$ ,  $N_{shift}$  die Anzahl der Phasenverschiebungen und  $\psi_k$  die Phasenverschiebung des  $k$ -ten Musters. Analog zu Gleichung 3.2 lassen sich auch Streifenmuster mit Ausbreitungsrichtung in  $y$  über die Monitorhöhe  $L_{height}$  beschreiben. Das Bild eines vertikalen Streifenmusters, d. h. mit Ausbreitungsrichtung in  $x$ , nach Gleichung 3.2 wird in Abbildung 3.7 dargestellt.

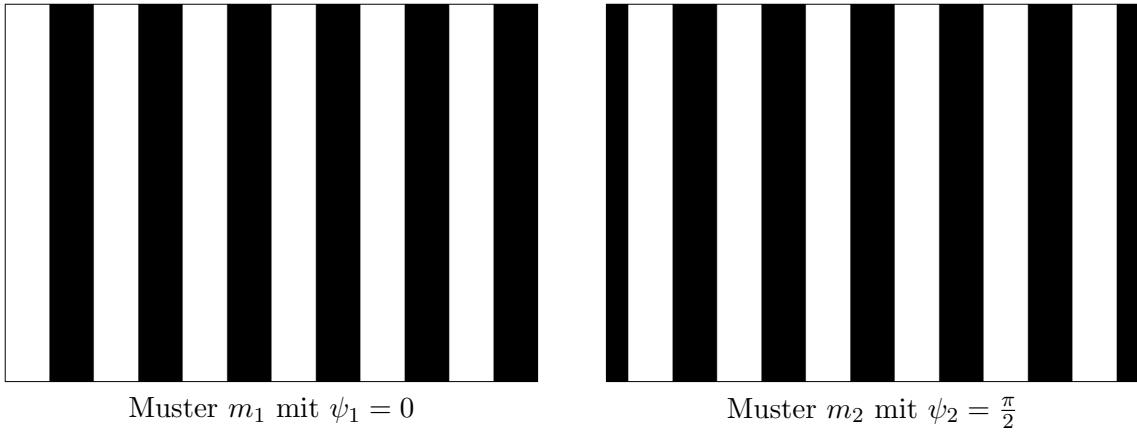


Abbildung 3.7: Streifenmuster nach Gleichung 3.2, mit  $A_m = 127.5$ ,  $N_p = 6$ ,  $N_{shift} = 4$  und  $L_{width} = 384$ . Die Breite der Streifen betragen jeweils 32 Pixel.

Die verschiedenen Streifenmuster  $m_k$  können nach Gleichung 3.2 als zueinander phasenverschoben bezeichnet werden. Die Phasenverschiebung  $\psi_k$  wird durch einen Phasenwinkel im Bogenmaß angegeben. Eine Phasenverschiebung von  $\pi$  bedeutet dementsprechend eine Phasenverschiebung um eine halbe Periode des Musters. Anschaulich stellt man fest, dass für gleich breite helle und dunkle Streifen diese ihre Positionen tauschen. Dies kann man sich zunutze machen, denn das bedeutet, dass die Schnittmenge der dunklen Streifen in den beiden Streifenmustern am kleinsten ist. Da bestimmte Fehlstellen entweder in den dunklen oder in den weißen Streifen deutlich zu erkennen sind, ergänzen sich die beiden Streifenmuster durch die sichtbaren Fehlstellen. Verknüpft man die Kamerabilder von solchen Mustern, dann kann man damit die meiste Information aus zwei Bildern extrahieren. Durch zusätzliche Bildaufnahmen mit verschobenen Streifenmustern kann man detailliertere Oberflächeninformationen von dem Prüfobjekt gewinnen.

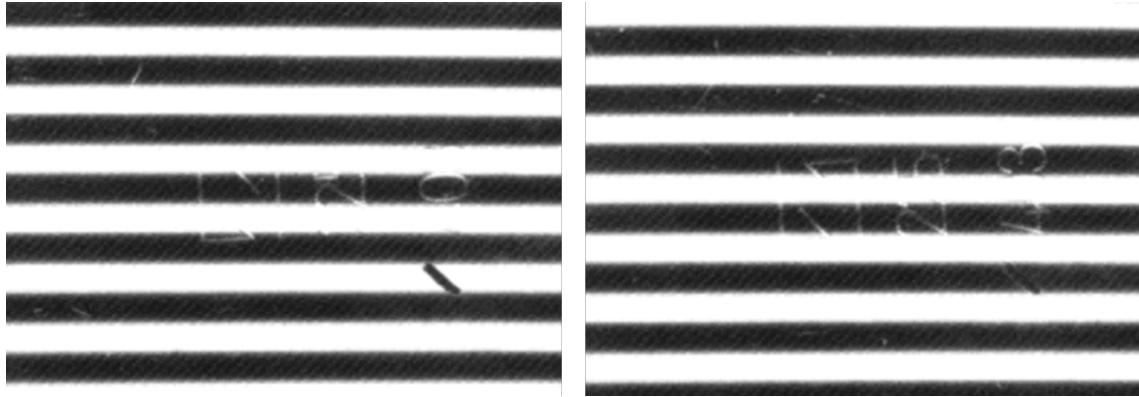


Abbildung 3.8: Kameraaufnahme eines Prüfobjekts unter Beleuchtung durch Streifenmuster mit einer Phasenverschiebung von  $\pi$  zueinander.

Wie man erkennt, sind die Streifen der beiden Bilder genau zueinander versetzt. Die Auffälligkeiten in den Bildern wie z. B. Eingravierungen sind oft entweder in den dunklen oder in den hellen Streifen zu erkennen. Durch den Unterschied zum Streifenhintergrund erfasst man gewisse Oberflächeninformationen des Prüfobjekts. Das heißt, dass die beiden Bilder sich durch den Versatz in ihrer Oberflächeninformation ergänzen. Zur Verknüpfung der Informationen in einem Gesamtbild überlegt man sich, wie bestimmte Defekte in den beiden Bildern aussehen. Die Defekt- und Fehlstellen werden in zwei Fälle unterteilt (siehe Abbildung 3.9).

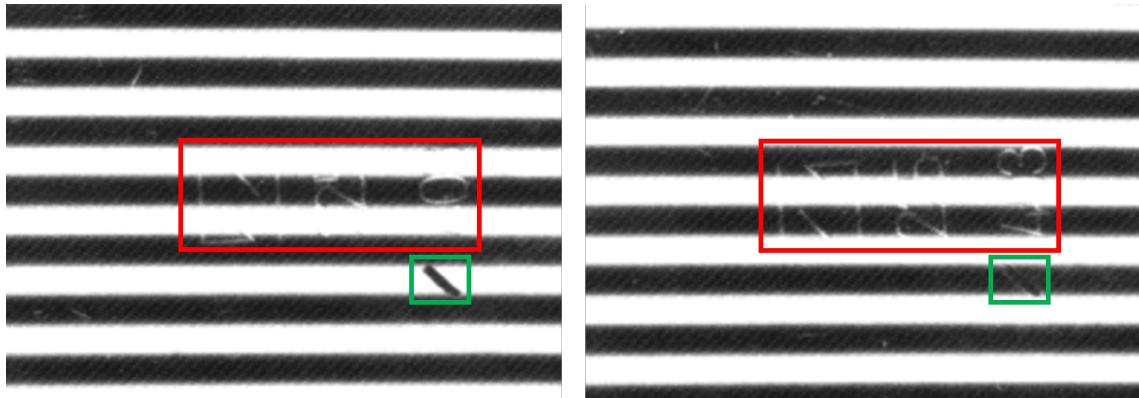


Abbildung 3.9: Kameraaufnahme eines Prüfobjekts mit Fehlstellen und deren Kennzeichnung. Im linken Teilbild Aufnahme des Musters  $m_1$ . Im rechten Teilbild Aufnahme des Musters  $m_2$ .

#### Fall 1: z. B. Kratzer (siehe rote Rechtecke in Abbildung 3.9)

Aufnahme von Muster $m_1$	↔	Aufnahme von Muster $m_2$
Helle Fragmente in dunklen Streifen	↔	Helle Fragmente in hellen Streifen

#### Fall 2: z. B. Partikel (siehe grüne Rechtecke in Abbildung 3.9)

Aufnahme von Muster $m_1$	↔	Aufnahme von Muster $m_2$
Dunkle Fragmente in hellen Streifen	↔	Dunkle Fragmente in dunklen Streifen

Die Muster  $m_1$  und  $m_2$  sind Streifenmuster, die zueinander um  $\pi$  phasenverschoben sind. Für eine Verknüpfung von Bildern errechnet man ein neues Bild, indem man zwei Bilder punktweise zusammen verrechnet. Das bedeutet, um für das Ergebnisbild den Grauwert an der Stelle  $(x, y)$  zu berechnen, verknüpft man die beiden Grauwerte der Eingangsbilder an der gleichen Stelle  $(x, y)$ . Daraus folgt auch, dass die zu verrechnenden Bilder dieselbe Größe haben müssen. Diese Bedingung ist hier durch dieselben Kameraeinstellungen gegeben.

Unter Berücksichtigung dieser beiden Fälle soll man eine Verknüpfung für diese Bilder aufstellen, sodass die Oberflächendefekte und Fehlstellen hervorgehoben werden. Um die Fehlstellen vom Typ *Fall 1* zu erkennen, reicht es aus, für alle Bildpunkte zu untersuchen, ob einer der beiden Bildpunkte dunkel ist. Ist das erfüllt, dann wird der Bildpunkt zum Hintergrund hinzugefügt. Dies kann man erreichen, indem man punktweise das Minimum der Bilder bestimmt. Dadurch würden nur Defekte von *Fall 1* hell sein und die restlichen Bildpunkte dunkel. Da *Fall 2* genau umgekehrt zu *Fall 1* ist, kann man analog vorgehen, um die Defekte von *Fall 2* zu erkennen. Das heißt, dass punktweise das Maximum der Bilder bestimmt wird. Alle Bildpunkte, die nicht in beiden Bildern dunkel sind, werden damit hell. In Abbildung 3.10 sollen diese Verknüpfungen dargestellt werden.

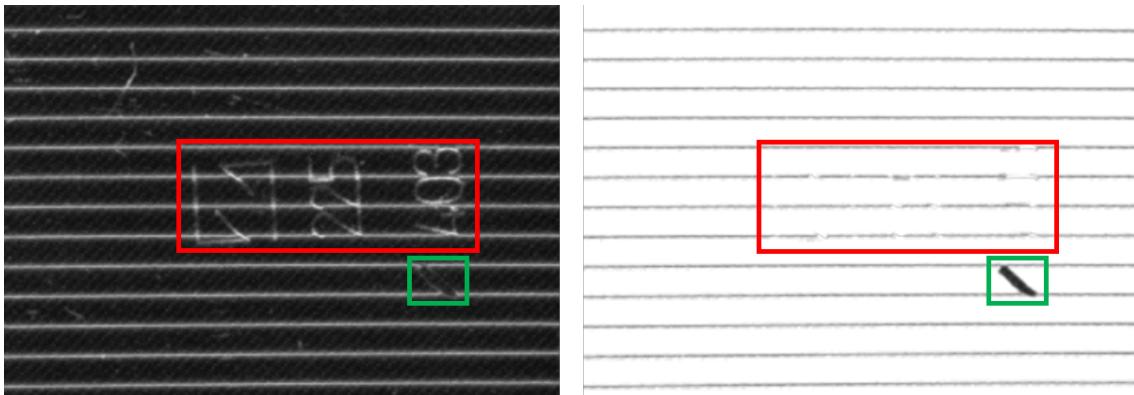


Abbildung 3.10: Verknüpfte Bilder, um Defekte von *Fall 1* (rot umrahmt) und Defekte von *Fall 2* (grün umrahmt) isoliert voneinander zu betrachten. Links über Minimierung und rechts über Maximierung verknüpft. Die verknüpften Quellbilder sind in Abbildung 3.8 einzusehen.

In den Bildern aus Abbildung 3.10 sind noch horizontale Streifen zu erkennen. Diese sind keine Defekte, sondern entstehen aus Überlappungen der Streifenmuster in den Kamerabildern. Auf diese „Fehler“ und Möglichkeiten zur Beseitigung dieser wird im nächsten Abschnitt 3.4 eingegangen.

Als Nächstes sollen beide Fälle in einem Gesamtbild kenntlich gemacht werden. Hierfür macht man sich die Gemeinsamkeiten von *Fall 1* und *Fall 2* zunutze. Man kann feststellen, dass die Helligkeit der Defekte in beiden Kamerabildern trotz Veränderung der Muster ungefähr gleich bleibt. Verknüpft man die beiden Bilder durch die punktweise betragsmäßige Differenz, werden Defekte aus den beiden Fällen dunkel. Die restliche, normal-spiegelnde

Oberfläche wird hell, da jeder sonstige Bildpunkt in einem Muster dunkel und im anderen Muster hell erscheinen sollte, also eine hohe Differenz ergibt. Die Ausnahme bilden dabei auch hier die Überlappungen der Streifen (siehe Abbildung 3.11).

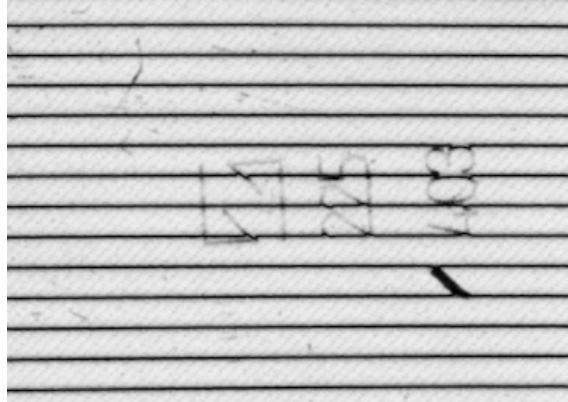


Abbildung 3.11: Über betragsmäßige Differenz verknüpfte Bilder.

## 3.4 Optimierungen

Nach dem Verknüpfen der Bilder verbleiben neben den Defekten noch schmale horizontale Streifen (vgl. Abbildung 3.10 und 3.11). Diese entstehen, wenn in den Kamerabildern von den um  $\pi$  phasenverschobenen Streifenmustern Überlappungen der Streifen vorkommen. Das kann durch eine Reihe von Ungenauigkeiten im gesamten Prozess passieren. Zum besseren Verständnis muss auf die Differenzen zwischen dem aufgenommenen Kamerabild und der erzeugten Muster auf dem Bildschirm eingegangen werden.

### 3.4.1 Unterschiede zwischen Kameraaufnahme und Monitorbild

Das Kameraobjektiv hat bestimmte Einstellungsmöglichkeiten, darunter die Blende und der Fokus. Aufgrund der festen Brennweite des verwendeten Objektivs wird der Einfluss der Brennweite nicht genauer betrachtet. Die entscheidenden Einstellungen für diesen Prozess sind also der Fokus und die Blende. Über die Fokussteuerung kann eine einzelne Tiefenebene im Bild scharf gestellt werden. Da das Prüfobjekt und das Streifenmuster in unterschiedlichen Tiefenebenen liegen, führt das bereits dazu, dass im Kamerabild nicht beides gleichzeitig fokussiert werden kann. Der Fokus liegt zur Prüfung auf der Oberfläche des Objekts. Dadurch wird das Streifenmuster unscharf, wodurch die Breiten der hellen und dunklen Streifen verändert werden. Die zweite Einstellungsmöglichkeit ist die Blende. Öffnet man diese weiter, lässt man mehr Licht in den Kamerasensor. Durch mehr einfalldendes Licht vergrößern sich die Breiten der hellen Streifen im Bild. Oberflächendefekte des Prüfobjekts werden gleichzeitig besser sichtbar. Zur Kompensation der unterschiedlichen Streifenbreiten im Kamerabild müssen die Breiten der hellen und dunklen Streifen im erzeugten Muster unterschiedlich gewählt werden (siehe Abbildung 3.12).

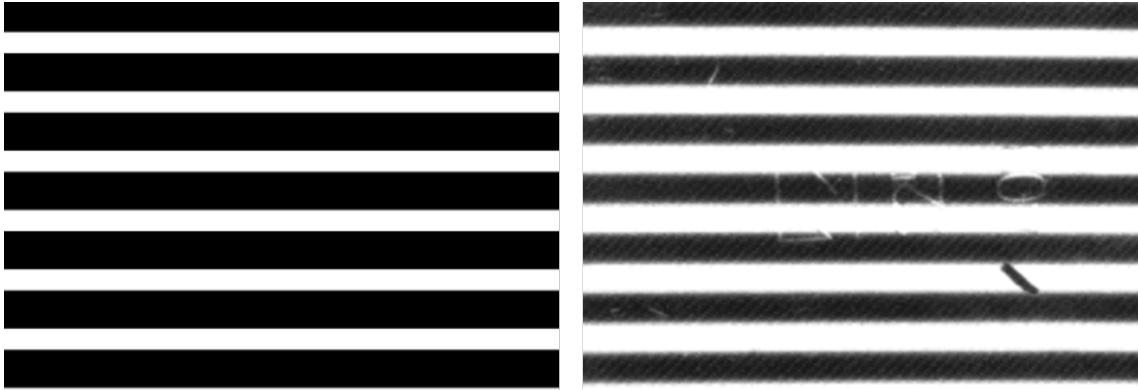


Abbildung 3.12: Unterschied zwischen Muster und Kameraaufnahme. Links erzeugtes Muster mit fünf Pixel Breite der hellen und neun Pixel Breite der dunklen Streifen, rechts Kameraaufnahme

Man muss also mit Streifenmustern arbeiten, die von der Gleichung 3.2 abweichen und unterschiedliche Breiten für die hellen und dunklen Streifen haben. Es kommt dazu, dass die hellen und dunklen Streifen im Kamerabild unter Umständen nicht exakt gleich breit sein können, da die Anpassung der Streifenbreiten lediglich auf pixelgenauer Ebene durchgeführt werden kann. Außerdem gibt es auch bei der Phase der Streifenmuster die Beschränkung, dass die maximale Genauigkeit der Verschiebung ein Pixel beträgt. Das bedeutet, dass die Streifen selbst bei exakt gleicher Breite unter dem Kamerabild nicht genau versetzt zueinander liegen. Es kommt hinzu, dass diese Genauigkeit sich auf den abbildenden Bildschirm bezieht. Durch das Brillenglas zwischen der Kamera und dem Bildschirm kann die Phasenverschiebung im Kamerabild also mit zusätzlichen Fehlern behaftet sein. Außerdem ist zu beachten, dass in der Kameraaufnahme stets ein Rauschen die Szene überlagert.

### 3.4.2 Muster mit unterschiedlichen Streifenbreiten

Das erzeugte Streifenmuster in Abbildung 3.12 hat nicht mehr den Grauwertverlauf einer Rechteckschwingung (vgl. Abbildung 3.6) entlang der Ausbreitungsrichtung. Dadurch lässt sich das Streifenmuster nicht mehr in der Form aus Gleichung 3.2 darstellen. Der Grauwertverlauf in einer Zeile bzw. Spalte eines solchen Streifenmusters entspricht einer Impulsschwingung (siehe Abbildung 3.13).

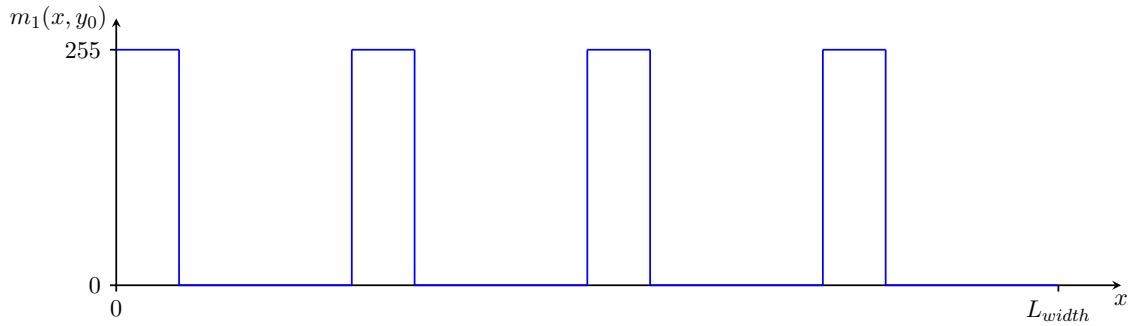


Abbildung 3.13: Impulsschwingung, *engl: pulse wave, rectangular wave*, eines Streifenmusters mit Ausbreitungsrichtung in  $x$  bei fester, aber beliebiger Zeile  $y_0$ .

Um eine Gleichung für eine solche Impulsschwingung (siehe Abbildung 3.13) herzuleiten, kann man die periodische Sägezahnschwingung verwenden [20]. Eine Sägezahnschwingung lässt sich darstellen durch (vgl. [21]):

$$w_f(t) = 2(ft - \lfloor ft \rfloor) - 1 \quad (3.3)$$

$f$  bezeichnet die Frequenz der Sägezahnschwingung und steht analog zu Gleichung 3.1 über den Kehrwert im Zusammenhang mit der Periodenlänge der Sägezahnschwingung  $w_f(t)$ :

$$f = \frac{1}{T}$$

Mit  $T = 3$  erhält man folgendes Schaubild (siehe Abbildung 3.14).

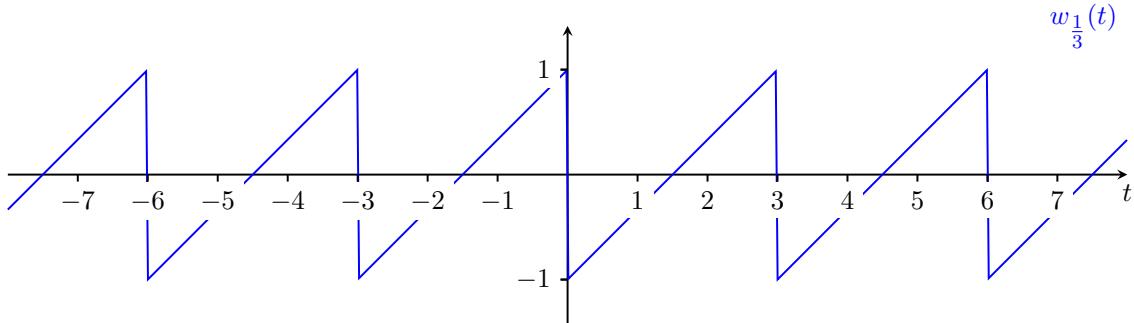


Abbildung 3.14: Sägezahnschwingung nach Gleichung 3.3 mit  $f = \frac{1}{3}$ .

Bildet man die Differenz von zwei zueinander um  $\frac{D}{f}$  in  $t$ -Richtung versetzten Sägezahnfunktionen, erhält man die Impulsschwingung  $p_{f,D}(t)$ :

$$p_{f,D}(t) = w_f(t - \frac{D}{f}) - w_f(t) - w_f(-\frac{D}{f}), \quad D \in (0, 1] \subset \mathbb{R} \quad (3.4)$$

$D$  wird Tastgrad (*engl: duty cycle*) genannt und bezeichnet die Impulsdauer der Impulsschwingung im Verhältnis zur Periodenlänge  $T$ . Auch für die Impulsschwingung gilt der Zusammenhang zwischen der Frequenz  $f$  und der Periodendauer  $T$  wie für die Sägezahnschwingung:

$$f = \frac{1}{T}$$

Somit erhält man mit  $D = \frac{1}{2}$  eine Rechteckschwingung wie auch in Abbildung 3.6. Ein Schaubild der Gleichung 3.4 wird in Abbildung 3.15 dargestellt.

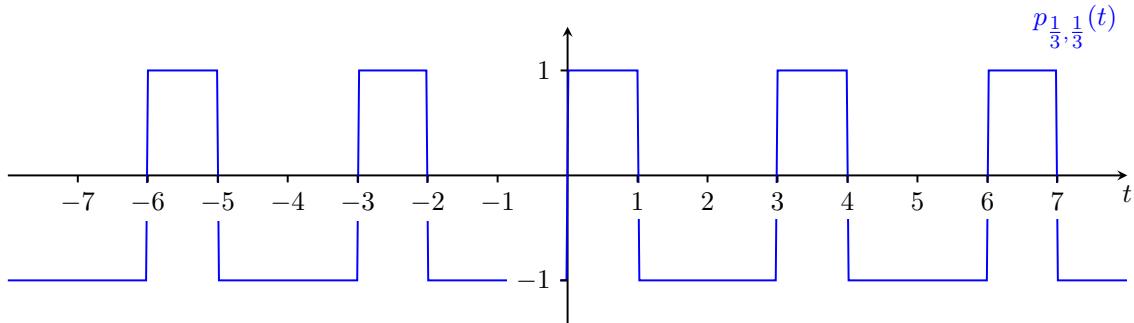


Abbildung 3.15: Einheits-Impulsschwingung nach Gleichung 3.4 mit  $f = \frac{1}{3}$  und  $D = \frac{1}{3}$ .

Aus Gleichung 3.4 lässt sich somit eine mathematische Darstellung für Streifenmuster mit unterschiedlichen Streifenbreiten aufschreiben:

$$m_k(x, y) = A_m \left( 1 + p_{f, D} \left( x - \frac{1}{2\pi f} \psi_k \right) \right), \quad (3.5)$$

$$f = \frac{N_p}{L_{width}}, \quad D \in (0, 1] \subset \mathbb{R}, \quad \psi_k = (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}}, \quad k \in \{1, \dots, N_{shift}\}$$

Wie auch in Gleichung 3.2 gilt für dieses Muster die Periodizität in der Ausbreitungsrichtung. Auch hier bezeichnet  $A_m$  die Amplitude,  $N_p$  die Anzahl der Perioden über die Monitorbreite  $L_{width}$ ,  $N_{shift}$  die Anzahl der Phasenverschiebungen und  $\psi_k$  die Phasenverschiebung des  $k$ -ten Musters. Zusätzlich zu diesen Parametern hat man den Tastgrad  $D$ , der in diesem Fall die Breite der hellen Streifen im Verhältnis zu der Periodenlänge  $T$  angibt. Die Periodenlänge  $T$  ist im Streifenmuster die Summe der Breite eines einzelnen dunklen und eines einzelnen hellen Streifens. Analog zu Gleichung 3.5 lässt sich auch ein horizontales Streifenmuster mit Ausbreitungsrichtung in  $y$  über die Monitorhöhe  $L_{height}$  beschreiben. Das Bild eines horizontalen Streifenmusters analog zu Gleichung 3.5, d. h. mit Ausbreitungsrichtung in  $y$ , wird in Abbildung 3.16 dargestellt.



Muster  $m_1$  mit  $\psi_1 = 0$



Muster  $m_3$  mit  $\psi_3 = \pi$

Abbildung 3.16: Horizontale Streifenmuster analog zu Gleichung 3.5 erzeugt, mit  $A_m = 127.5$ ,  $N_p = 4$ ,  $L_{height} = 272$ ,  $N_{shift} = 4$  und  $D = \frac{1}{4}$ . Die hellen Streifen haben damit eine Höhe von 17 Pixeln und die dunklen Streifen eine Höhe von 51 Pixeln.

### 3.4.3 Verknüpfung mehrerer Kameraaufnahmen

Im Abschnitt 3.4.1 wurde erklärt, dass die streifenförmigen Artefakte in den Ergebnisbildern aus Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11 hauptsächlich durch Unregelmäßigkeiten im Aufnahmeprozess entstehen. Die Aufnahmeparameter bzw. Kameraeinstellungen müssen allerdings auf die Prüfstation und Prüfbedingungen angepasst werden, deshalb lassen sich diese Artefakte im Vorhinein nur schwer entfernen. Stattdessen kann man verschiedene Verfahren der Nachbearbeitung einsetzen. Aufgrund der Periodizität und der festen Ausbreitungsrichtung der streifenförmigen Artefakte bietet es sich an, die Fourier-Analyse anzuwenden. Man untersucht die Frequenzkomponenten der Artefakte und filtert gezielt diese aus dem Bild heraus. Dennoch kann man so nicht die Information an den dunklen Artefakten wiederherstellen, sondern lediglich eine Bildverbesserung durchführen. Analog zur Überlegung aus Abschnitt 3.3 ist eine andere Möglichkeit das Hinzuziehen von weiteren Bildern. Da an den Stellen der Artefakte Informationen fehlen, kann man zusätzliche Muster zur Hand nehmen, um die Informationen zu ergänzen. Man zieht weitere phasenverschobene Muster hinzu. Um zu jedem Muster ein zugehöriges Muster mit einer Phasenverschiebung von  $\pi$  zu haben, benötigt man eine gerade Anzahl an Mustern. Wie auch in Abschnitt 3.3 begründet, ist dies notwendig um die Oberflächeninformationen zu verknüpfen. Dadurch eliminiert man die Artefakte, die durch Überlappungen von Streifen in den unterschiedlichen Kamerabildern entstehen.

Im Folgenden werden als Beispiel die vier Kamerabilder der Streifenmuster  $m_1$  bis  $m_4$  miteinander verknüpft, die mit  $N_{shift} = 4$  gebildet wurden. Aus den vier aufgenommenen Bildern verknüpft man je zwei Bilder mit der betragsmäßigen Differenz, in denen die Streifenmuster eine Phasenverschiebung von  $\pi$  zueinander haben. Die zwei resultierenden Bilder haben zueinander versetzte Streifen, die aus den Überlappungen entstehen. Zum Schluss kann man die beiden Bilder so verknüpfen, dass man stets den Bildpunkt mit dem höheren Helligkeitswert nimmt. Das entspricht der Maximierung. Analog kann man auch

die streifenförmigen Artefakte aus Abbildung 3.10 eliminieren, in welcher die Typen von Fehlstellen isoliert voneinander betrachtet wurden. In Abbildung 3.17 werden die einzelnen Schritte dieses Verfahrens veranschaulicht.

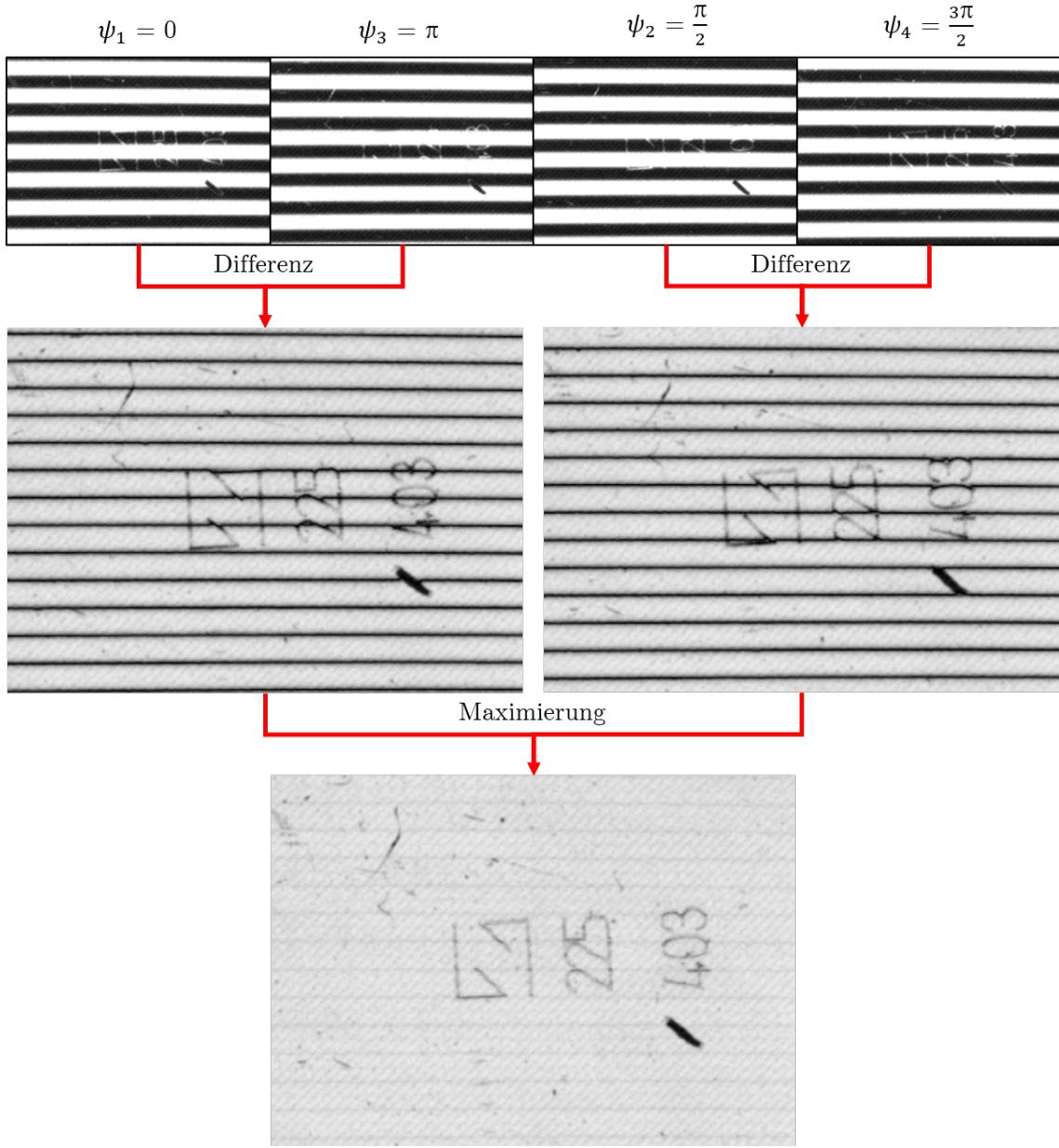


Abbildung 3.17: Prozess zur Hervorhebung von Oberflächendefekten mit  $N_{shift} = 4$ .

Analog zu den gezeigten Schritten aus Abbildung 3.17 lässt sich auch die Verknüpfung von mehr als vier phasenverschobenen Streifenmustern durchführen.

#### 3.4.4 Nachbearbeitung mit der Fourier-Analyse

Im praktischen Durchlauf verbleiben auch im letzten Bild aus Abbildung 3.17 noch schwache horizontale Streifen. Das liegt an den Ungenauigkeiten im Prüfprozess und der Mustererzeugung (vgl. Abschnitt 3.4.1). Da das Ergebnis mit weiteren phasenverschobenen

Streifenmustern stetig besser wird, könnte man diese durch eine höhere Anzahl von Streifenmustern  $N_{shift}$  eliminieren. Dabei gilt zu beachten, dass man im Diskreten und Numerischen arbeitet und bei einer sehr hohen Anzahl von Phasenverschiebungen Messfehler und Gleitpunktfehler zum Tragen kommen. Das bedeutet, man muss eine zum Prüfaufbau passende Anzahl an Mustern verwenden, um bessere Ergebnisse dokumentieren zu können.

Zur Bildverbesserung hat man auch die Möglichkeit, die zuvor erwähnte Fourier-Analyse anzuwenden. Die noch verbliebenen Strukturen lassen sich im Amplitudenspektrum des Bildes durch die Ausbreitungsrichtung finden. Da diese Strukturen nur noch sehr schwach im Bild vorhanden ist, sind die jeweiligen Frequenzkomponenten auch dementsprechend gering gewichtet (siehe Abbildung 3.18).

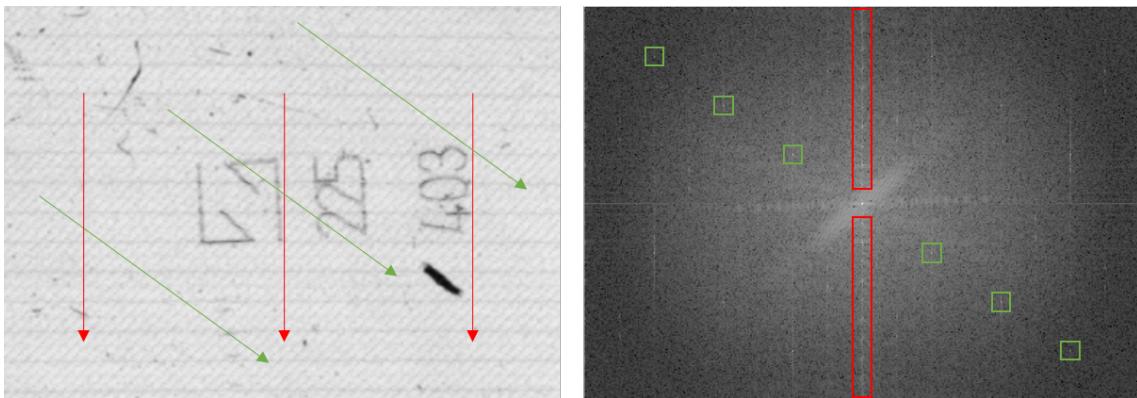


Abbildung 3.18: Amplitudenspektrum des Gesamtbildes. (mit Markierungen)

In Rot ist im Bild die Ausbreitungsrichtung der ersten Struktur markiert. Die entsprechenden Gewichte der Frequenzkomponenten sind in derselben Farbe im Amplitudenspektrum umrahmt. Analog sind in Grün die für die zweite Struktur relevante Ausbreitungsrichtung und Gewichte der Frequenzkomponenten markiert. Die grün gekennzeichnete Struktur entsteht in diesem Fall durch die Verwendung eines speziellen Polarisationsfilters auf dem Objektiv der Kamera, auf dessen Funktion nicht genauer eingegangen werden muss. Filtrert man im Amplitudenspektrum die markierten Bereiche heraus und wendet die inverse Fourier-Transformation an, erhält man ein Bild, indem die beiden störenden Strukturen nicht mehr vorhanden sind. Das Ergebnisbild wird durch ein geeignetes Werkzeug [22] berechnet und in Abbildung 3.19 dargestellt.

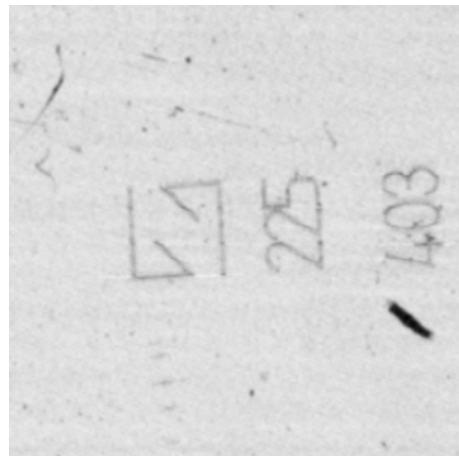


Abbildung 3.19: Angewandtes frequenzselektives Filter nach Abbildung 3.18. Erstellt mit dem Online-Werkzeug „Fourifier“ von © 2020 Ejectamenta.[22]<sup>1</sup>

Mit dem vorgestellten deflektometrischen Verfahren wurden Oberflächendefekte wie z. B. Kratzer, Eingravierungen oder Partikel auf transparenten und spiegelnden Prüfobjekten sichtbar gemacht. Das erzeugte Gesamtbild dieses Verfahrens kann nun durch anschließende Bildverarbeitung analysiert und geprüft werden. In dem konkreten Fall aus Abbildung 3.19 würden sich z. B. Kratzer detektieren oder die eingravierten Zeichen auslesen lassen.

Dieses Verfahren kann je nach Parametrisierung mit unterschiedlicher Empfindlichkeit Abweichungen, die die Lichtreflexionen beeinflussen, in der Oberfläche sichtbar machen. Dadurch eignet es sich besonders für Brillengläser und transparente Objekte. Für spiegelnde Objekte mit einem angepasstem Aufbau konnten ähnliche Ergebnisse erzielt werden, allerdings treten nochmal größere Schwankungen in den Streifenbreiten auf. Diese müssen durch eine größere Anzahl an Bilddaten kompensiert werden. Das Verfahren ist außerdem auf Kratzer und Eingravierungen optimiert. Für spiegelnde Objekte empfiehlt sich aus dem Grund ein anderes Verfahren, das im Kapitel 4 beschrieben wird.

---

<sup>1</sup>Anmerkungen: Das Bild musste aufgrund der Anforderungen des verwendeten Online-Werkzeugs zugeschnitten werden. Außerdem wurden die Frequenzkomponenten „händisch“ entfernt, weshalb das Bild fehlerbehaftet ist. Das Bild konnte auch nicht auf Korrektheit geprüft werden und dient nur der Veranschaulichung. Die Nutzungsrechte unterliegen der Lizenz von © 2020 Ejectamenta. Für weitere Informationen zu Geschäfts- und Nutzungsbedingungen siehe: <https://ejectamenta.com/about/terms-of-service/>

## Kapitel 4

# Deflektometrische Registrierung

Nachdem ein Verfahren aufgezeigt wurde, womit die abweichende Lichtstreuung an Oberflächendefekten erkannt werden kann, behandelt das folgende Kapitel die Reflexion von Lichtstrahlen an der Oberfläche im Detail. Aus dem Wissen über die Reflexion an dem Objekt können Aussagen über die Oberflächenkrümmung getroffen werden. Der Aufbau für dieses Verfahren sieht vor, die Spiegelung einer Szene auf einer spiegelnden Oberfläche zu beobachten (vgl. Abschnitt 2.2). Für transparente Objekte eignet sich ein solcher Aufbau nicht, da der Effekt der Rückseitenreflexion dieses Verfahren behindert (siehe Abschnitt 2.1). Für transparente Objekte besteht aber die Möglichkeit einen Aufbau analog zu Abschnitt 3.1 zu verwenden. Es gilt hierfür allerdings zu beachten, dass sich damit auch die berechnete Information im Vergleich zum vorgesehenen Aufbau unterscheidet und deshalb nicht vergleichbar ist mit der Reflexionsinformation der Oberfläche.

In diesem Rahmen soll auch ein Ansatz zur Auswertung der Reflexionsinformation in Form der deflektometrischen Registrierung einer spiegelnden Oberfläche aufgezeigt werden. Im Mittelpunkt steht hierbei die Krümmung der Oberfläche analysieren zu können.

### Definition 4.1: Deflektometrische Registrierung

Die *deflektometrische Registrierung*  $l_r$  beschreibt die Abbildung von Kamerabildpunkten zu Bildschirmpunkten des mustererzeugenden Monitors [18] (siehe Abbildung 4.1):

$$l_r : A_{Cam} \rightarrow L \cup \emptyset, \quad P_B \rightarrow P_L$$

$A_{Cam} \subset \mathbb{R}^2$  bezeichnet die Menge der Kamerabildpunkte bzw. der Kamerapixel.  $L \subset \mathbb{R}^2$  bezeichnet die Menge der Bildschirmpunkte bzw. der Monitorpixel. In Koordinatenschreibweise lässt sich die Abbildung somit darstellen als:

$$l_r : \mathbb{R}^2 \supset A_{Cam} \rightarrow \mathbb{R}^2, \quad (x_B, y_B) \mapsto (x_L, y_L)$$

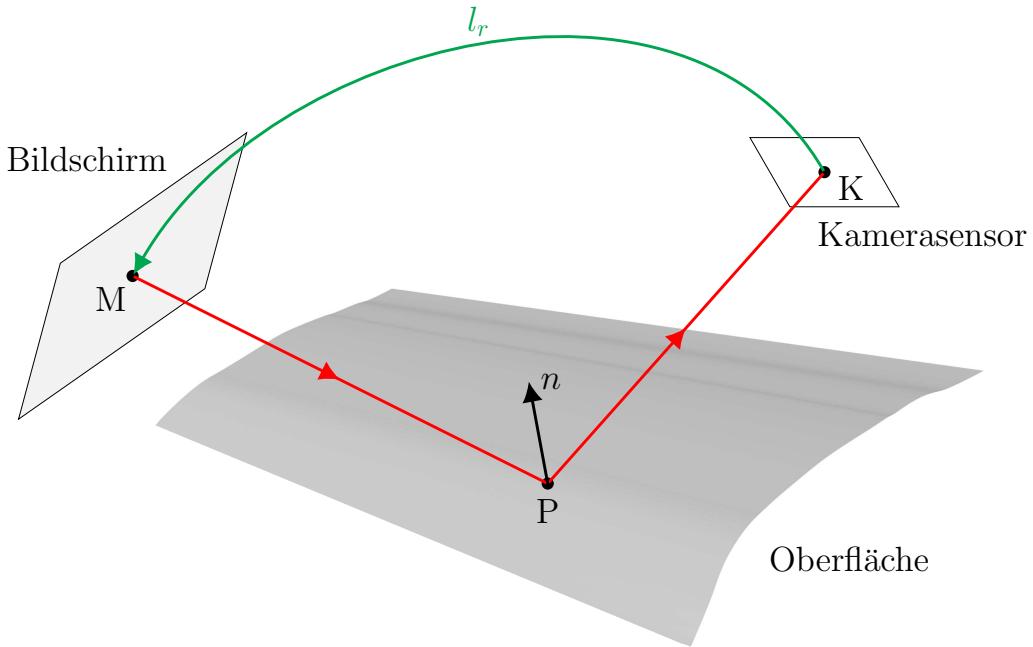


Abbildung 4.1: Abbildungssystem einer spiegelnden Oberfläche.  $M \subset L$  entspricht dem Bildschirmpunkt, von dem der Lichtstrahl ausgeht,  $P$  dem Objektpunkt an dem dieser auftrifft und  $K \subset A_{Cam}$  dem Punkt des Kamerasensors bzw. dem Kamerabildpunkt der diesen aufnimmt.  $n$  entspricht dem Normalenvektor der Oberfläche. Die deflektometrische Registrierung  $l_r$  bildet  $K$  auf  $M$  ab.

**Satz 4.1: Separierbarkeit der deflektometrischen Registrierung**

Die *deflektometrische Registrierung*  $l_r$  kann in zwei Abbildungen von Bildpunkten zu den Spalten- und Zeilenpositionen der Schirmpunkte separiert werden:

$$l_{r,x} : \mathbb{R}^2 \supset A_{Cam} \rightarrow \mathbb{R}, \quad (x_B, y_B) \mapsto x_L$$

$$l_{r,y} : \mathbb{R}^2 \supset A_{Cam} \rightarrow \mathbb{R}, \quad (x_B, y_B) \mapsto y_L$$

Zur Aufstellung der deflektometrischen Registrierung muss die Oberfläche über den Bildschirm kodiert werden, anschließend durch die Kamera aufgenommen und zum Schluss das aufgenommene Bild dekodiert werden (siehe Abschnitt 2.2). Aus der deflektometrischen Registrierung können dann Krümmungsmerkmale der spiegelnden Oberfläche bestimmt werden. Durch die Kalibrierung der Positionen der Systemkomponenten können mittels der deflektometrischen Registrierung auch Höheninformationen über die Oberfläche gewonnen werden (siehe Abschnitt 2.2.4).

## 4.1 Bestimmung der deflektometrischen Registrierung

Die Bestimmung der deflektometrischen Registrierung nach Definition 4.1 bedeutet die Zuordnung von Kamerapixeln zu Monitorpixeln. Es soll jeder Lichtstrahl, der vom Bildschirm über das Prüfobjekt in die Kamera reflektiert wird, im Kamerabild eindeutig identifiziert und dem passenden Kamerapixel zugeordnet werden. Eine einfache Möglichkeit, eine solche Zuordnung zu erreichen, bekommt man, indem man die Pixel des Monitors einzeln einschaltet und dabei die Veränderung im Kamerabild betrachtet. Bei kleinen Bildern ist dies noch umsetzbar, allerdings wird die Anzahl von Pixeln mit zunehmender Auflösung schnell sehr groß und unübersichtlich, sodass dieser Ansatz nicht praktikabel ist. Aus dem Grund ist es effektiver, Bilder auf dem Monitor anzuzeigen, die Positionen visuell codieren können. Durch die visuelle Erfassung des Spiegelbilds können somit die zugehörigen Positionen auf dem Monitor berechnet werden.

Ein herkömmliches Kodierverfahren für solche Prozesse ist das Phasenschiebeverfahren. Der Ansatz bei dem Verfahren ist es, die Zeilen- und Spaltenpositionen des Monitors durch periodische Muster zu kodieren. Die Grauwerte von periodischen Mustern nehmen dabei Werte an, die über die periodische Funktion bestimmt wurden. Die hier verwendeten Funktionen sind Kosinusfunktionen. Damit können die Pixel des Musters Phaseninformationen eines lokalen Orts übertragen. Durch die Periodizität der Funktionen kann aus der reinen Phaseninformation noch nicht die genaue Monitorposition bestimmt werden. Die Lösung dieses Problems wird als Phasenentfaltung bezeichnet (siehe Definition 4.2). Hierzu stellt Werling in seiner Arbeit [18] ein mehrstufiges Phasenschiebeverfahren vor, das Muster mit unterschiedlichen Perioden verwendet.

### Definition 4.2: Phasenentfaltung

Die *Phasenentfaltung* bezeichnet den Vorgang zur Auflösung der mehrdeutigen Zuordnung der Phaseninformation zu unterschiedlichen Perioden.

### 4.1.1 Deflektometrische Registrierung ohne Phasenentfaltung

Ohne eine Phasenentfaltung bekommt man eventuell eine mehrdeutige Zuordnung aufgrund der Periodizität der Kosinusfunktion. Soll eine eindeutige Zuordnung über das Phasenschiebeverfahren ohne Phasenentfaltung erfolgen, darf es demnach nur eine einzige Musterperiode auf der Monitorbreite bzw. Monitorhöhe geben. Damit lassen sich die Monitorkoordinaten  $(x_L, y_L)$  durch die Phasen  $(\phi_x, \phi_y)$  folgendermaßen kodieren:

$$\phi_x(x_L) := \frac{2\pi}{L_{height}} x_L, \quad \phi_y(y_L) := \frac{2\pi}{L_{height}} y_L \quad (4.1)$$

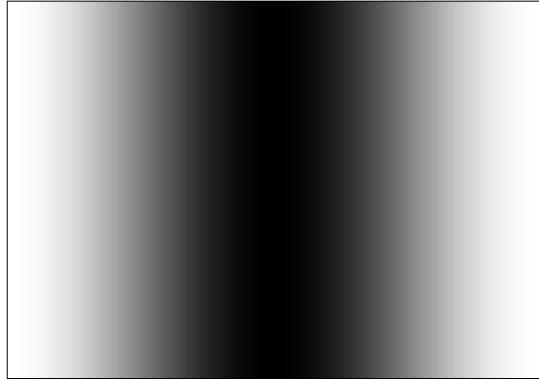
Die Monitorbreite wird dabei mit  $L_{width}$  und die Monitorhöhe mit  $L_{height}$  angegeben.

O.B.d.A. wird unter Verwendung von Satz 4.1 nachfolgend nur die deflektometrische Registrierung der Spaltenpositionen  $l_{r,x}$  ( $x$ -Richtung) betrachtet. Die deflektometrische Registrierung der Zeilenpositionen  $l_{r,y}$  ( $y$ -Richtung) kann analog bestimmt werden. Das  $k$ -te

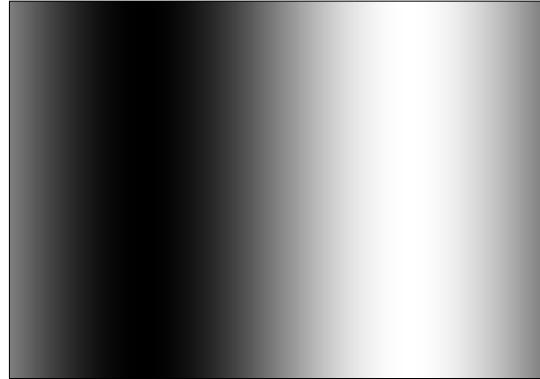
Muster  $m_k$  zur Kodierung der Monitorpunkte wird durch eine Kosinusfunktion aufgebaut und hat die Form:

$$m_k(x_L, y_L) = A_m (1 + C_m \cos(\phi_x(x_L) + \psi_k)), \quad k \in \{1, \dots, N_{shift}\}, \quad \psi_k = (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}} \quad (4.2)$$

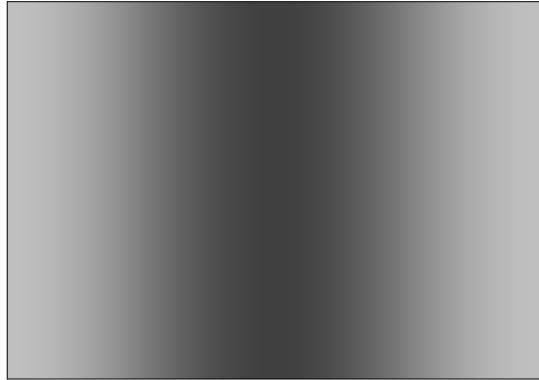
$A_m$  bezeichnet die Amplitude,  $C_m$  den Kontrast,  $\psi_k$  die Phasenverschiebung des  $k$ -ten Musters und  $N_{shift}$  die Anzahl der Muster für das Phasenschiebeverfahren. Abbildung 4.2 zeigt den Einfluss der verschiedenen Parameter aus Gleichung 4.2 auf die erzeugten Muster.



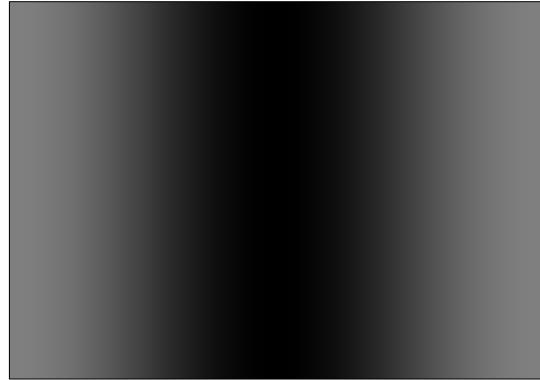
Muster mit  $A_m = 127.5$ ,  $C_m = 1.0$ ,  
 $L_{width} = 384$ ,  $N_{shift} = 4$ ,  $k = 1 \Rightarrow \psi_1 = 0$



Muster mit  $A_m = 127.5$ ,  $C_m = 1.0$ ,  
 $L_{width} = 384$ ,  $N_{shift} = 4$ ,  $k = 2 \Rightarrow \psi_2 = \frac{\pi}{2}$



Muster mit  $A_m = 127.5$ ,  $C_m = 0.5$ ,  
 $L_{width} = 384$ ,  $N_{shift} = 4$ ,  $k = 1 \Rightarrow \psi_1 = 0$



Muster mit  $A_m = 63.75$ ,  $C_m = 1.0$ ,  
 $L_{width} = 384$ ,  $N_{shift} = 4$ ,  $k = 1 \Rightarrow \psi_1 = 0$

Abbildung 4.2: Muster nach Gleichung 4.2 mit unterschiedlichen Parametern für die Amplitude, den Kontrast und die Phasenverschiebung

Die erzeugten Muster werden nacheinander auf dem Monitor angezeigt und über eine spiegelnde Oberfläche durch die Kamera beobachtet. Durch die Reflexion an der Oberfläche trifft der Sichtstrahl ausgehend vom Bildpunkt  $(x_B, y_B)^\top \in A_{Cam}$  den Monitor im Punkt  $(x_L, y_L)^\top \in L \cup \emptyset$ , welcher durch die Abbildung aus Definition 4.1 beschrieben werden kann:

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix} = l_r(x_B, y_B) = \begin{pmatrix} l_{r,x}(x_B, y_B) \\ l_{r,y}(x_B, y_B) \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Dementsprechend lässt sich das  $k$ -te Kamerabild  $g$  am Bildpunkt  $(x_B, y_B)^\top$  beschreiben durch das  $k$ -te Muster am Punkt  $(l_{r,x}(x_B, y_B), l_{r,y}(x_B, y_B))^\top$ :

$$g_k(x_B, y_B) = m_k(l_{r,x}(x_B, y_B), l_{r,y}(x_B, y_B)) \quad (4.4)$$

Aufgrund der Digitalisierung durch die Kamera und der Reflexionseigenschaften der Oberfläche verändert sich das aufgenommene Muster im Vergleich zum ausgesendeten Muster. Unter Berücksichtigung dieser Veränderungen kann man für  $m_k$  die Gleichung 4.2 einsetzen. Man erhält:

$$g_k(x_B, y_B) = A_g(x_B, y_B) (1 + C_g(x_B, y_B) \cos(\phi_x(l_{r,x}(x_B, y_B)) + \psi_k)) \quad (4.5)$$

Dabei sind die Amplitude  $A_g$  und der Kontrast  $C_g$  des Musters im Kamerabild unter Umständen unterschiedlich zu dem angezeigten Muster im Monitorbild. Der Unterschied ist abhängig von dem Oberflächenpunkt, an dem der Sichtstrahl reflektiert wird. Aus dem Grund werden  $A_g$  und  $C_g$  in Abhängigkeit vom Kamerabildpunkt  $(x_B, y_B)^\top$  angegeben.

Durch Einsetzen der Gleichung 4.1 und der deflektometrischen Registrierung  $l_r$ , erhält man die Phase  $\phi_x$  des  $k$ -ten Musters in Abhängigkeit von den Kamerabildpunkten:

$$\phi_x(x_B, y_B) := \frac{2\pi}{L_{width}} l_{r,x}(x_B, y_B) \quad (4.6)$$

Durch Einsetzen der Phase aus Gleichung 4.6 in die Gleichung 4.5 des Kamerabilds erhält man den Zusammenhang zwischen der Phase  $\phi_x$  des  $k$ -ten Musters und dem Kamerabild  $g_k$ :

$$g_k(x_B, y_B) = A_g(x_B, y_B) (1 + C_g(x_B, y_B) \cos(\phi_x(x_B, y_B) + \psi_k)) \quad (4.7)$$

Unter Einbeziehung der  $N_{shift}$ -vielen phasenverschobenen Streifenmuster kann man die Phase  $\phi_x$  durch ein Phasenschiebeverfahren bzw. Carré-Verfahren berechnen [13][18]:

$$\tan(\phi_x) = -\frac{\sum_{k=1}^{N_{shift}} g_k(x_B, y_B) \sin(\psi_k)}{\sum_{k=1}^{N_{shift}} g_k(x_B, y_B) \cos(\psi_k)} \quad (4.8)$$

Aus den Gleichungen 4.1 und 4.8 folgt schließlich:

$$x_L = l_{r,x}(x_B, y_B) = \frac{L_{width}}{2\pi} \arctan \left( -\frac{\sum_{k=1}^{N_{shift}} g_k(x_B, y_B) \sin \left( (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}} \right)}{\sum_{k=1}^{N_{shift}} g_k(x_B, y_B) \cos \left( (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}} \right)} \right) \quad (4.9)$$

Mit der Gleichung 4.9 ist die deflektometrische Registrierung in  $x$ -Richtung angegeben und die Monitorpositionen eindeutig bestimmt. Die deflektometrische Registrierung in  $y$ -Richtung lässt sich analog dazu bestimmen. Die Anzahl der Muster bzw. Phasenverschiebungen  $N_{shift}$  bleibt noch als Parameter festzulegen. Um eine eindeutige Zuordnung zu erhalten, benötigt man aufgrund der drei unbekannten Größen Amplitude  $A_g$ , Kontrast  $C_g$  und Phase  $\phi_x$  in Gleichung 4.7 eine Mindestanzahl von drei Phasenverschiebungen.

Durch die Verwendung des Arkustangens in Gleichung 4.9 könnte man Mehrdeutigkeiten aufgrund des beschränkten Wertebereichs bekommen. Im hier beschriebenen Fall wird dies umgangen, indem man nur eine Periode zur Kodierung verwendet, damit ist Phase und auch die zugeordnete Spaltenposition des Monitors eindeutig bestimmt. D. h. man benötigt keine Phasenentfaltung. Dennoch ist das Phasenschiebeverfahren nach diesem Ansatz eher unpräzise und daher ungeeignet für Praxisanwendungen. Der Grund liegt darin, dass Bildschirme lediglich eine vergleichsweise kleine Anzahl von Helligkeitsstufen darstellen können. Die Anzahl zu kodierender Pixelpositionen sind in der Regel deutlich größer. Hinzu kommt die Limitierung durch die Kamera, welche eine maximale Auflösung und Anzahl Helligkeitsstufen aufnehmen kann. Zusammengenommen ist die Auflösung der Monitorpunkte stark begrenzt durch die Abhängigkeit von der Monitorbreite bzw. -höhe. Eine höhere Ortsauflösung lässt sich erreichen, indem man Muster mit mehreren Perioden über die Monitorbreite bzw. Monitorhöhe verwendet. Damit wird eine Phasenentfaltung als zusätzliche Aufgabe erforderlich.

#### 4.1.2 Deflektometrische Registrierung mit Phasenentfaltung

Die im Folgenden beschriebene Methodik zur Bestimmung der deflektometrischen Registrierung ist ein mehrstufiges Phasenschiebeverfahren. Ein solches Verfahren wird von Kammel in seiner Dissertation [23] vorgestellt. Das Verfahren von Kammel zeigt jedoch in der Praxis Kodierungsartefakte bzw. Phasensprünge insbesondere an den Periodengrenzen. Aus dem Grund stellt Werling darauf aufbauend in seiner Dissertation [18] einen neuen Ansatz eines mehrstufigen Phasenschiebeverfahrens vor, der das Problem mit den Phasensprüngen minimiert. Die Idee des Ansatzes ist dabei, dass man zunächst analog zum Verfahren aus dem vorigen Abschnitt 4.1.1 die  $x$ - bzw.  $y$ -Koordinaten relativ zu den Perioden der Muster bestimmt. Durch mehrere Muster mit unterschiedlichen Perioden erhält man schließlich unterschiedliche relative  $x$ - bzw.  $y$ -Koordinaten. Diese müssen für das finale Ergebnis jeweils den richtigen Perioden zugeordnet werden, indem ein Gleichungssystem aufgestellt wird.

Analog zum Verfahren aus Kapitel 4.1.1 benötigt man  $N_{shift}$ -viele phasenverschobene Muster, um die Phase eines Bildpunkts  $(x_B, y_B)^\top$  zu bestimmen. Zusätzlich betrachtet man mehrere Stufen des Verfahrens. Die Muster auf der Stufe  $i$  haben  $N_p^i$ -viele Perioden über die Monitorbreite  $L_{width}$  bzw. Monitorhöhe  $L_{height}$ . Auf unterschiedlichen Stufen des Verfahrens sollen stets auch die Anzahlen der Perioden der Muster unterschiedlich sein. Auf jeder Stufe des Verfahrens befinden sich  $N_{shift}$ -viele phasenverschobene Muster, welche dieselbe Anzahl an Perioden  $N_p^i$  entlang der Monitorbreite bzw. Monitorhöhe haben. Das heißt, dass die Muster auf der  $i$ -ten Stufe identisch sind, bis auf die Phasenverschiebung. Die Phasen  $\phi_x^i$  und  $\phi_y^i$  der kodierten Monitorpunkte  $(x_L, y_L)^\top$  auf der  $i$ -ten Stufe sehen dann folgendermaßen aus:

$$\phi_x^i = \frac{2\pi N_p^i}{L_{width}} x_L, \quad \phi_y^i = \frac{2\pi N_p^i}{L_{height}} y_L \quad (4.10)$$

O.B.d.A. wird unter Verwendung von Satz 4.1 nachfolgend nur die deflektometrische Registrierung der Spaltenpositionen  $l_{r,x}$  ( $x$ -Richtung) betrachtet. Die deflektometrische Registrierung der Zeilenpositionen  $l_{r,y}$  ( $y$ -Richtung) kann analog bestimmt werden. Auf der Stufe  $i$  hat das  $k$ -te Muster  $m_k^i$  zur Kodierung der Monitorpunkte  $(x_L, y_L)^\top$  somit die Form:

$$m_k^i(x_L, y_L) = A_m^i \left( 1 + C_m^i \cos(\phi_x^i + \psi_k) \right), \quad k \in \{1, \dots, N_{shift}\}, \quad \psi_k = (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}} \quad (4.11)$$

$A_m^i$  bezeichnet die Amplitude und  $C_m^i$  den Kontrast der Muster der  $i$ -ten Stufe. Wie auch in Abschnitt 4.1.1 entspricht  $\psi_k$  der Phasenverschiebung des  $k$ -ten Musters und  $N_{shift}$  der Anzahl der Phasenverschiebungen. Der Einfluss der jeweiligen Parameter ist analog zu Abschnitt 4.1.1 und einsehbar in Abbildung 4.2. Abbildung 4.3 zeigt eine mögliche Musterserie für dieses Verfahren, um das Verständnis zwischen den Mustern und den Stufen aufzuzeigen.

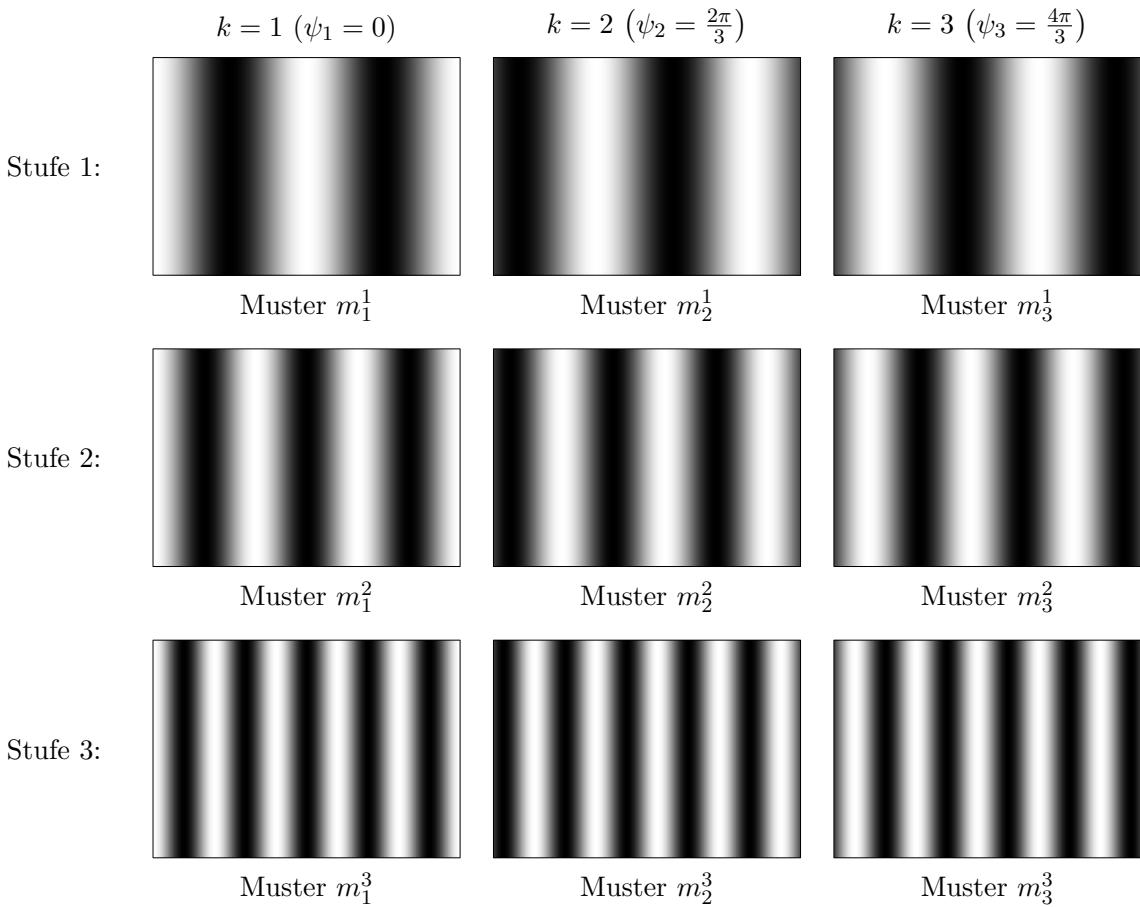


Abbildung 4.3: Musterserie nach Gleichung 4.11 mit  $A_m = 127.5$ ,  $C_m = 1.0$ ,  $N_{shift} = 3$ ,  $L_{width} = 384$ , Anzahlen an Perioden  $N_p^1 = 2$ ,  $N_p^2 = 3$  und  $N_p^3 = 5$

Für jedes Muster jeder Stufe nimmt die Kamera Signale  $g_k^i$  auf:

$$g_k^i(x_B, y_B) = A_g^i(x_B, y_B) \left( 1 + C_g^i(x_B, y_B) \cos \left( \frac{2\pi N_p^i}{L_{width}} l_{r,x}(x_B, y_B) + \psi_k \right) \right) \quad (4.12)$$

Analog zu Kapitel 4.1.1 lässt sich aus den Bildern  $g_k^i$  die Phase der  $i$ -ten Stufe  $\phi_x^i$  berechnen. Vergleichbar mit Gleichung 4.9 kann man in diesem Verfahren aus der Phase die Monitorkoordinaten relativ zum Intervall  $[0, L_{width}/N_p^i)$  bestimmen:

$$x_{L,relativ}^i = \frac{L_{width}}{2\pi N_p^i} \arctan \left( -\frac{\sum_{k=1}^{N_{shift}} g_k^i(x_B, y_B) \sin \left( (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}} \right)}{\sum_{k=1}^{N_{shift}} g_k^i(x_B, y_B) \cos \left( (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}} \right)} \right) \quad (4.13)$$

Die absolute Monitorkoordinate  $x_L^i$  der  $i$ -ten Stufe lässt sich bestimmen, indem man zur Phase  $\phi_x^i$  ein unbekanntes ganzzahliges Vielfaches von  $2\pi$  addiert. In Abhängigkeit von  $x_{L,relativ}^i$  bedeutet das für  $x_L^i$ :

$$x_L^i = x_{L,relativ}^i + n^i \frac{L_{width}}{N_p^i}, \quad (n^i \in \mathbb{N}_0) \quad (4.14)$$

Dabei ist  $n^i$  ein unbekannter ganzzahliger Faktor, der die absolute Auswertung bestimmt. Zur Bestimmung des Faktors  $n^i$  sollen zwei verschiedene Stufen  $i, j$  des Verfahrens mit  $i \neq j$  betrachtet werden. Zur eindeutigen Lösbarkeit des nachfolgenden Gleichungssystems müssen  $N_p^i$  und  $N_p^j$  teilerfremd sein, das heißt es gilt:

$$\text{ggT}(N_p^i, N_p^j) = 1 \quad \forall i \neq j$$

Dadurch erhält man Bilder  $g_k^i$  und  $g_k^j$  von zwei unterschiedlichen Musterserien  $m_k^i$  und  $m_k^j$  ( $i \neq j$ ). Aufgrund der Teilerfremdheit von  $N_p^i$  und  $N_p^j$  der Musterserien erhält man aus Gleichung 4.13 unterschiedliche  $x_{L,relativ}^i$  und das eindeutig lösbare Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} x_L &= x_{L,relativ}^i + n^i \frac{L_{width}}{N_p^i}, \quad n^i \in \{0, \dots, N_p^i - 1\} \subset \mathbb{N}_0 \\ x_L &= x_{L,relativ}^j + n^j \frac{L_{width}}{N_p^j}, \quad n^j \in \{0, \dots, N_p^j - 1\} \subset \mathbb{N}_0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

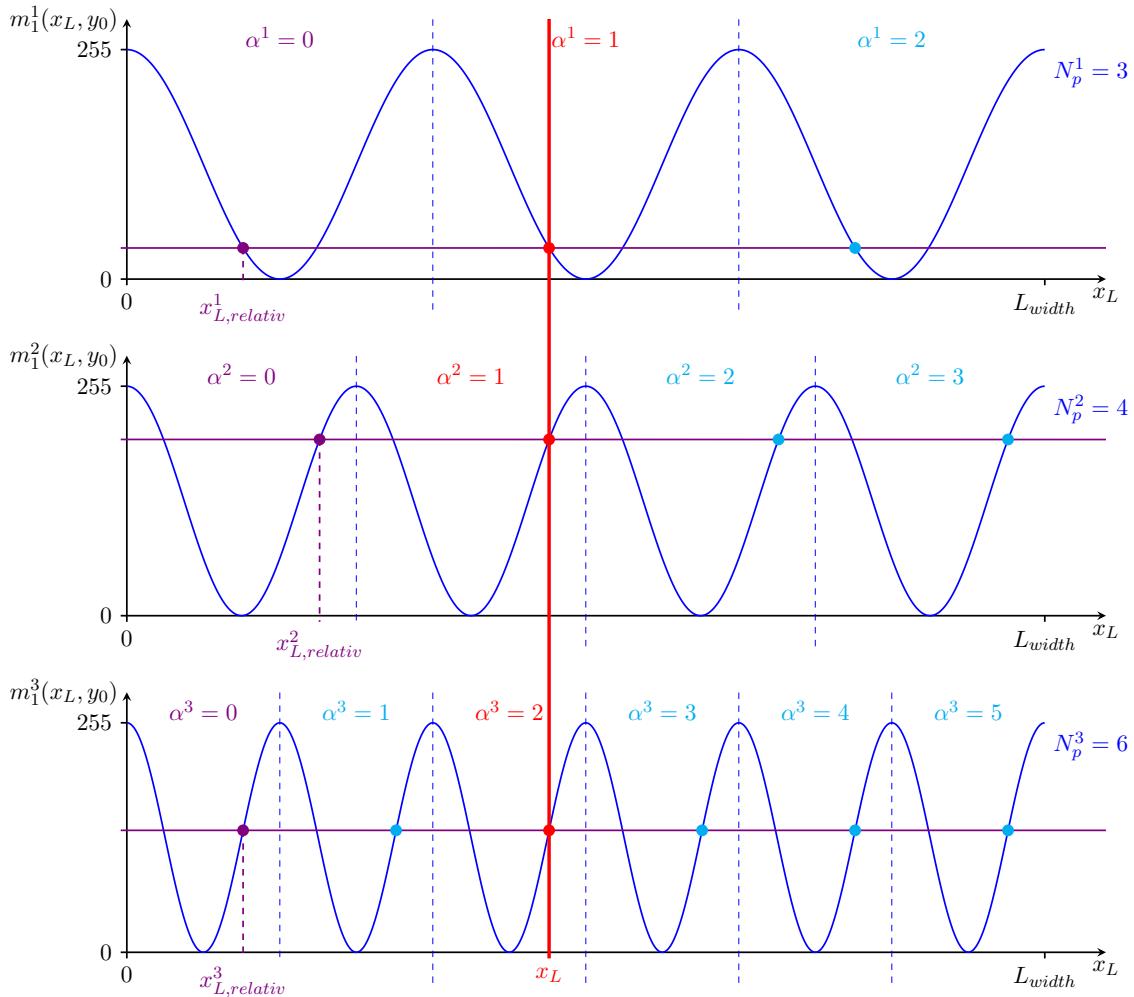


Abbildung 4.4: Bestimmung eindeutiger Spaltenposition  $x_L$  durch Verwendung von unterschiedlichen Perioden bei fester Zeile  $y_0$ .

Die Abbildung 4.4 stellt die graphische Lösung des Gleichungssystems aus Gleichung 4.15 anhand eines Beispiels mit drei Mustern dar. Durch die zuvor erwähnten Schritte des Verfahrens erhält man für ein Kamerapixel die relative Spaltenposition  $x_{L,relativ}^i$  zu den Perioden der  $i$ -ten Muster (siehe violette Punkte in Abb. 4.4). Unter Berücksichtigung der Teilerfremdheit erhält man durch die Bestimmung des minimalen Abstands die eindeutige Zuordnung  $A = (\alpha^1, \dots, \alpha^{N_{step}})$  der relativen Spaltenpositionen zur richtigen Periode (siehe rote Punkte in Abb. 4.4).

In diesem Zusammenhang muss für die Monitorkoordinate  $x_L = x_L^i = x_L^j$  gelten. Diese Gleichheit ist aufgrund von Ungenauigkeiten während des gesamten Bildaufnahmeprozesses nur schwierig zu erreichen, weshalb man aus dem Gleichungssystem ein Optimierungsproblem bildet. Das heißt, gesucht ist folgende Näherungslösung  $(n^i, n^j)$ :

$$(n^i, n^j) = \arg \min_{\alpha, \beta \in \mathbb{N}_0} \left| \left( x_{L,relativ}^i + \alpha \frac{L_{width}}{N_p^i} \right) - \left( x_{L,relativ}^j + \beta \frac{L_{width}}{N_p^j} \right) \right|, \quad (4.16)$$

$$\alpha \in \{0, \dots, N_p^i - 1\}, \quad \beta \in \{0, \dots, N_p^j - 1\}$$

Durch weitere Stufen dieses Verfahrens erhöht sich zunehmend die Genauigkeit der Phasenentfaltung. Das zu betrachtende Optimierungsproblem ergibt schließlich das Tupel  $(n^1, \dots, n^{N_{step}})$  zur Bestimmung der deflektometrischen Registrierung in  $x$ -Richtung:

$$(n^1, \dots, n^{N_{step}}) = \arg \min_A \sum_{i=1}^{N_{step}} \sum_{j=i+1}^{N_{step}} \left| \left( x_{L,relativ}^i + \alpha^i \frac{L_{width}}{N_p^i} \right) - \left( x_{L,relativ}^j + \alpha^j \frac{L_{width}}{N_p^j} \right) \right|,$$

mit  $A = (\alpha^1, \dots, \alpha^{N_{step}})$  und  $\alpha^i \in \{0, \dots, N_p^i - 1\} \subset \mathbb{N}_0$

(4.17)

Mit der Zuordnung aus Gleichung 4.17 lässt sich die absolute Monitorkoordinate in den Spalten  $x_L^i$  berechnen. Durch die Berechnung eines Mittelwerts der  $x_L^i$  erhält man die beste Annäherung an die tatsächliche Spaltenposition.

$$\begin{aligned} x_L &= l_{r,x}(x_B, y_B) \\ &= \frac{1}{N_{step}} \sum_{i=1}^{N_{step}} x_{L,relativ}^i + n^i \frac{L_{width}}{N_p^i} \\ &= \frac{1}{N_{step}} \sum_{i=1}^{N_{step}} \frac{L_{width}}{2\pi N_p^i} \arctan \left( -\frac{\sum_{k=1}^{N_{shift}} g_k^i(x_B, y_B) \sin \left( (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}} \right)}{\sum_{k=1}^{N_{shift}} g_k^i(x_B, y_B) \cos \left( (k-1) \frac{2\pi}{N_{shift}} \right)} \right) + n^i \frac{L_{width}}{N_p^i} \end{aligned}$$
(4.18)

Durch Gleichung 4.18 ist die deflektometrische Registrierung der Spaltenpositionen  $l_{r,x}$  nach der Phasenentfaltung angegeben. Analog lässt sich dieses Verfahren auch für die deflektometrische Registrierung der Zeilenpositionen  $l_{r,y}$  anwenden.

Für die eindeutige Lösbarkeit des Gleichungssystems aus 4.15 ist die Wahl der Anzahl der Perioden im Muster  $N_p^i$  entscheidend. Da der Zusammenhang

$$ggT(N_p^1, \dots, N_p^{N_{step}}) = 1$$

gelten soll, sind geeignete Werte für die Anzahl der Perioden  $N_p^i$  die Elemente aus der Menge der Primzahlen  $\mathbb{P} = \{2, 3, 5, 7, 11, \dots\}$ . Die festzulegenden Parameter  $N_{shift}$  und  $N_{step}$  haben zunächst keine großen Auswirkungen auf die Lösbarkeit des Verfahrens, dennoch empfiehlt es sich, eine genügend hohe Anzahl von Phasenverschiebungen und Mustern mit unterschiedlichen Perioden zu wählen, um die Genauigkeit des Verfahrens anzuheben. Für die erfolgreiche Zuordnung der Phase zu einer relativen Spaltenposition  $x_{L,relativ}^i$  ist eine Mindestanzahl von drei Phasenverschiebungen notwendig ( $N_{shift} \geq 3$ , vgl. Kapitel 4.1.1).

Das beschriebene Verfahren zur Bestimmung der deflektometrischen Registrierung  $l_r$  wird nachfolgend im Algorithmus 1 zusammengefasst.

**Algorithmus 1** Bestimmung der deflektometrischen Registrierung mit Phasenentfaltung

**Eingabe:**  $N_{shift} \geq 3$ ,  $N_{step} \geq 1$ ,  $N_\lambda^i \geq 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, N_{step}\}$

**Ausgabe:** Deflektometrische Registrierung der Spalten  $l_{r,x}$

```

1: procedure BILDAUFNAHME( $N_{step}$ ,  $N_{shift}$ ,  $N_\lambda^i$ ,  $L_{width}$ )
2:   for Alle Stufen  $i \leftarrow 1$  to  $N_{step}$  do
3:     for Alle Phasenverschiebungen  $k \leftarrow 1$  to  $N_{shift}$  do
4:       Erzeugung des Musters  $m_k^i$  nach Gleichung 4.11
5:       Anzeige des Musters  $m_k^i$  auf geeignetem Bildschirm
6:       Aufnahme des Bildes mit Kamera  $\rightarrow g_k^i$  nach Gleichung 4.12
7:     end for
8:   end for
9:   return Musterbilder  $g_k^i$ 
10: end procedure

11: procedure DEFLEKTOMETRISCHEREGISTRIERUNG( $N_{step}$ ,  $N_{shift}$ ,  $N_\lambda^i$ ,  $L_{width}$ ,  $g_k^i$ )
12:   // Überprüfung ob eindeutige Berechnung möglich ist:
13:   if  $ggT(N_\lambda^1, \dots, N_\lambda^{N_{step}}) = 1$  then
14:     // Deflektometrische Registrierung ist eindeutig zu berechnen
15:     for Alle Kamerapixel  $(x_B, y_B) \in \mathbb{D}(g_k^i)$  do
16:       for Alle Stufen  $i \leftarrow 1$  to  $N_{step}$  do
17:         Berechnung von  $x_{L,relativ}^i$  nach Gleichung 4.13
18:       end for
19:       Lösung des Optimierungsproblems aus Gleichung 4.17  $\rightarrow (n^1, \dots, n^{N_{step}})$ 
20:       Berechnung von  $x_L$  nach Gleichung 4.18  $\rightarrow l_{r,x}(x_B, y_B)$ 
21:     end for
22:     return Deflektometrische Registrierung der Spalten  $l_{r,x}$ 
23:   else
24:     // Deflektometrische Registrierung ist nicht eindeutig zu berechnen
25:     return
26:   end if
27: end procedure

```

---

Der Algorithmus beschreibt die Berechnung der deflektometrischen Registrierung der Spaltenpositionen  $l_{r,x}$ . Analog lässt sich auch die deflektometrische Registrierung der Zeilenpositionen  $l_{r,y}$  bestimmen. Nach Satz 4.1 kann schließlich aus den separierten deflektometrischen Registrierungen der Spalten- und Zeilenpositionen  $l_{r,x}$  und  $l_{r,y}$  die deflektometrische Registrierung  $l_r$  des Prüfsystems gebildet werden.

## 4.2 Auswertung der deflektometrischen Registrierung

Die deflektometrische Registrierung  $l_r$  kann nicht ohne Weiteres direkt ausgewertet werden. Deshalb wird im Folgenden die Weiterverarbeitung der deflektometrischen Registrierung beschrieben, sodass bekannte Methoden aus dem Gebiet der Bildverarbeitung angewendet werden können.

Die graphische Darstellung der deflektometrischen Registrierung  $l_r$  stellt sich zunächst als schwierig heraus, da man mit einer Abbildung der Form  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  arbeitet. Aus dem Grund wird die Separierbarkeit der deflektometrischen Registrierung aus Satz 4.1 angewendet. Daraus erhält man die beiden Abbildungen der Form  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ :

$$l_{r,x} : \mathbb{R}^2 \supset A_{Cam} \rightarrow \mathbb{R}, \quad (x_B, y_B) \mapsto x_L$$

$$l_{r,y} : \mathbb{R}^2 \supset A_{Cam} \rightarrow \mathbb{R}, \quad (x_B, y_B) \mapsto y_L$$

In der Form lässt sich die Analogie zu der mathematischen Beschreibung eines Graubildes  $f$  erkennen:

$$f : \mathbb{R}^2 \supseteq [x_{min}, x_{max}] \times [y_{min}, y_{max}] \rightarrow [I_{min}, I_{max}] \subseteq \mathbb{R}, \quad (x, y) \mapsto f(x, y)$$

Für die Darstellung als Bilder sind somit lediglich geeignete Transformationen der Wertemengen der deflektometrischen Registrierungen  $l_{r,x}$  und  $l_{r,y}$  nötig.

### Definition 4.3: Darstellung der Deflektometrischen Registrierung

Die deflektometrischen Registrierung  $l_r$  kann als zwei einzelne Graubilder  $f_{r,x}$  und  $f_{r,y}$  dargestellt werden.

$$f_{r,x} : \mathbb{R}^2 \supset \mathbb{D}(l_{r,x}) \rightarrow [I_{min}, I_{max}] \subseteq \mathbb{R}$$

$$f_{r,y} : \mathbb{R}^2 \supset \mathbb{D}(l_{r,y}) \rightarrow [I_{min}, I_{max}] \subseteq \mathbb{R}$$

Die Bilder  $f_{r,x}$  und  $f_{r,y}$  sind definiert durch:

$$f_{r,x}(x, y) := t_x(l_{r,x}(x, y))$$

$$f_{r,y}(x, y) := t_y(l_{r,y}(x, y))$$

Mit  $\mathbb{D}(f_{r,x}) = \mathbb{D}(l_{r,x})$  und  $\mathbb{D}(f_{r,y}) = \mathbb{D}(l_{r,y})$  und

$$t_x : \mathbb{R} \supset \mathbb{W}(l_{r,y}) \rightarrow [I_{min}, I_{max}] \subseteq \mathbb{R}$$

$$t_y : \mathbb{R} \supset \mathbb{W}(l_{r,y}) \rightarrow [I_{min}, I_{max}] \subseteq \mathbb{R}$$

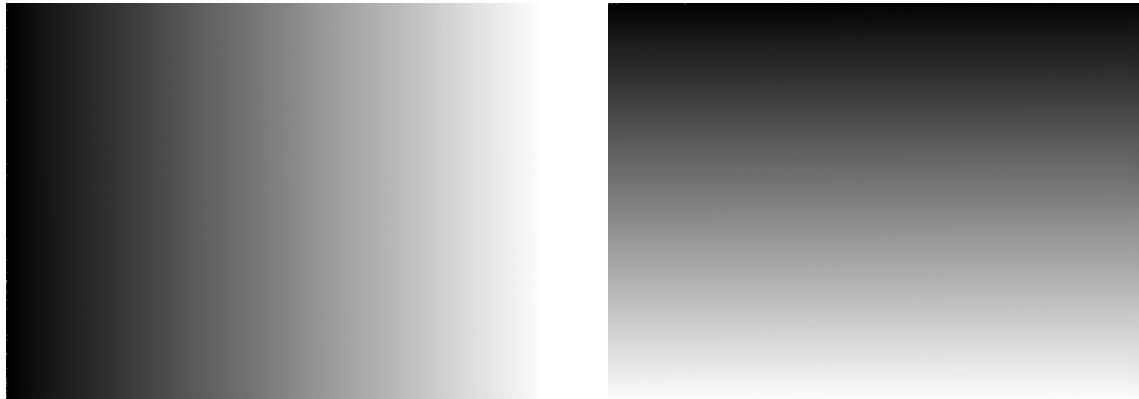
Die Transformationen  $t_x$  und  $t_y$  sind definiert als:

$$t_x(x) := \left( \frac{x}{L_{width}} (I_{max} - I_{min}) \right) + I_{min}$$

$$t_y(y) := \left( \frac{y}{L_{height}} (I_{max} - I_{min}) \right) + I_{min}$$

Die Abbildungen  $t_x$  und  $t_y$  sind dabei lineare Transformationen der Wertemengen der deflektometrischen Abbildungen in Spalten und Zeilen zu den zulässigen Intensitäten für die Bilder  $f_{r,x}$  und  $f_{r,y}$ , angegeben durch das Intervall  $[I_{min}, I_{max}]$ .

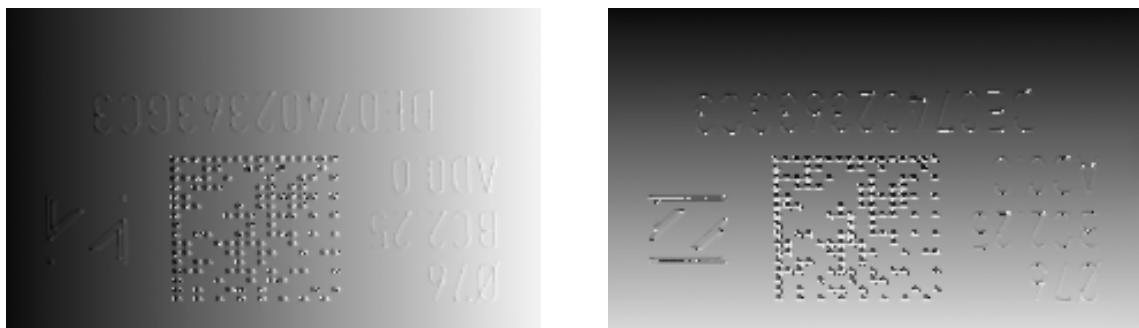
Erstellt man aus der berechneten deflektometrischen Registrierung  $l_r$  einer ungekrümmten Fläche die zugehörigen Bilder  $f_{r,x}$  und  $f_{r,y}$  nach Definition 4.3, erhält man Darstellungen wie in Abbildung 4.5:



Graubild der Spaltenzuordnung  $f_{r,x}(x, y)$       Graubild der Zeilenzuordnung  $f_{r,y}(x, y)$

Abbildung 4.5: Darstellung der Spalten- und Zeilenregistrierung als Bilder in Graustufen mit  $I_{min} = 0$  und  $I_{max} = 255$ . Je dunkler ein Pixel ist, desto weiter links bzw. oben befindet sich die zugeordnete Spalten- bzw. Zeilenposition.

In Abbildung 4.5 wird direkt das Muster auf dem Monitor betrachtet. Aus dem Grund lässt sich erkennen, dass die Zuordnung von Monitor- und Kamerapixeln in den Spalten und Zeilen linear verläuft. Werden nun die Streifen durch besondere Oberflächeneigenschaften gekrümmt oder verzerrt, dann werden an diesen Stellen in den Bildern der deflektometrischen Registrierung Abweichungen vom linearen Grauwerteverlauf sichtbar.



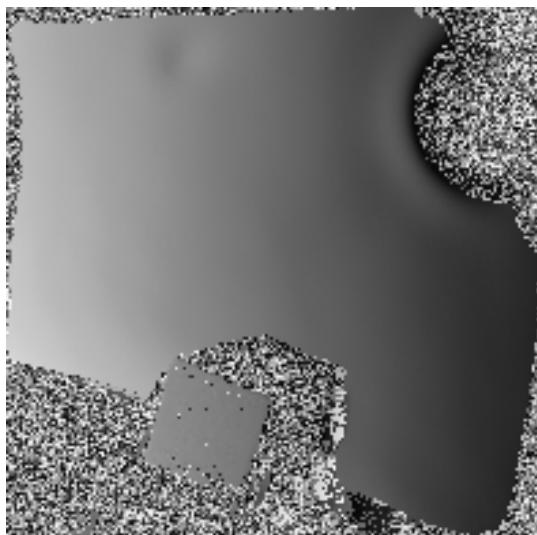
Graubild der Spaltenzuordnung  $f_{r,x}(x, y)$       Graubild der Zeilenzuordnung  $f_{r,y}(x, y)$

Abbildung 4.6: Darstellung von Spalten- und Zeilenregistrierung als Bilder. Abweichungen vom linearen Verlauf entstehen durch tiefe Eingravierungen im Glas. Das Muster wurde als Durchlicht direkt über der Kamera beobachtet.

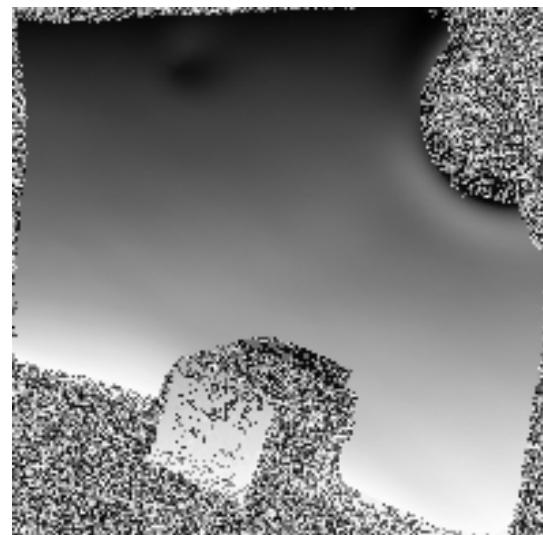
Die deflektometrische Registrierung macht bestimmte Fehlstellen als Abweichung vom stetigen linearen Grauwertverlauf kenntlich (siehe Abbildung 4.6). Diese Fehlstellen sind allerdings nur tiefe Eingravierungen, durch welche die Phase des Streifenmusters lokal deformiert wird. Normale Kratzer beeinflussen besonders den durch die Kamera gemessenen Grauwert. Die zugeordnete Monitorposition hingegen wird durch solche Kratzer nur geringfügig verändert, weshalb diese im Bild der deflektometrischen Registrierung kaum erkennbar sind. Besser funktioniert die Fehlstellenerkennung, indem man die Reflexionen bzw. die Spiegelbilder der Muster aufnimmt. So ist es möglich Dellen und Beulen auf spiegelnden Oberflächen, wie z. B. einem Keramikbruchstück (siehe Abbildung 4.7), durch die deflektometrische Registrierung deutlich hervorzuheben (siehe Abbildung 4.8).



Abbildung 4.7: Spiegelndes Keramikbruchstück mit Delle.



Graubild der Spaltenzuordnung  $f_{r,x}(x, y)$

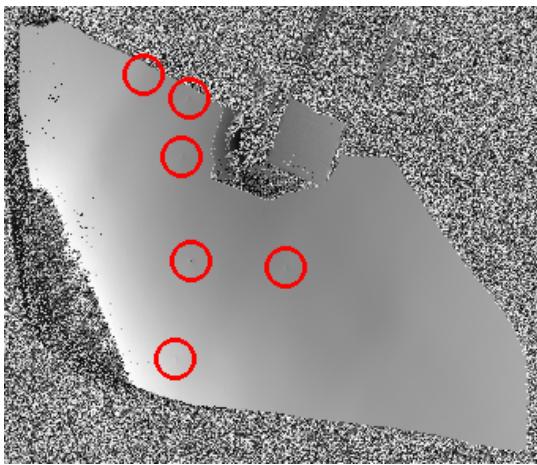


Graubild der Zeilenzuordnung  $f_{r,y}(x, y)$

Abbildung 4.8: Deflektometrische Registrierung des spiegelnden Keramikobjekts aus Abbildung 4.7.

In Abbildung 4.8 entsteht im Hintergrund um das Objekt herum eine Störumgebung. Der Grund dafür ist die fehlende Reflexion des Musters und somit ähnliche Grauwerte in den phasenverschobenen Bildern. Dies führt dazu, dass in der Bestimmung der Phase  $\phi$  für solche Pixel numerisch instabile Ausdrücke und somit schwankende Werte vorkommen.

Die resultierenden Bilder können durch herkömmliche Verfahren aus der Bildverarbeitung weiterverarbeitet und analysiert werden. Durch die stetigen Grauwertverläufe in den Bildern  $f_{r,x}$  und  $f_{r,y}$  an gleichmäßig gekrümmten Oberflächen, lassen sich diese effizient über ihre Ableitungen analysieren (siehe Abbildung 4.9). Abrupte Änderungen der Grauwerte innerhalb des spiegelnden Objekts führen zu einem höheren Ableitungswert als in der Umgebung. Fehlstellen wie z. B. Dellen oder Pickel lassen sich damit gut detektieren. Aus demselben Grund erweisen sich auch Hochpassfilterungen als hilfreich [18].



Graubild der Spaltenzuordnung  $f_{r,x}(x, y)$

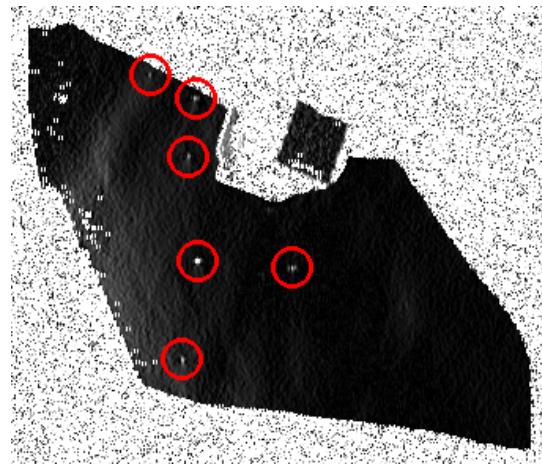


Bild der Ableitung von  $f_{r,x}(x, y)$   
in  $x$ -Richtung

Abbildung 4.9: Deflektometrische Spaltenregistrierung eines spiegelnden Keramikobjekts und das zugehörige Bild der Ableitung. In den rot markierten Stellen lassen sich kleine Abweichungen von einem stetigen Grauwertverlauf erkennen, die in der Ableitung einen Ausschlag haben. Auf dem Prüfobjekt befinden sich an den Stellen kleine Pickel auf der Oberfläche.

Abbildung 4.9 zeigt, wie durch die deflektometrische Registrierung kleine Fehlstellen, wie z. B. Pickel auf einer spiegelnden Oberfläche, sichtbar gemacht werden können, die ohne eine spezielle Beleuchtung nicht zu erkennen sind. Das untersuchte Objekt aus Abbildung 4.9 weist am linken Rand vereinzelt matte Stellen auf. Dadurch treten im Bild der deflektometrischen Registrierung  $f_{r,x}$  einzelne dunkle Punkte bzw. Artefakte am linken Rand auf. Diese erkennt man somit auch im Ableitungsbild von  $f_{r,x}$  als Fehlstellen.

In dem Bild der Ableitung von  $f_{r,x}$  in  $x$ -Richtung aus Abbildung 4.9 lassen sich Aussagen über die Krümmung der Oberfläche entlang der  $x$ -Richtung treffen. Allgemein betrachtet man zunächst eine feste Gerade in der Kameraebene, bezeichnet als Bildkurve. Die Bildkurve entsteht durch die Spiegelung einer bestimmten Monitorkurve auf einer Oberfläche.

Von der Kurve in der Monitorebene schneiden die ausgehenden Lichtstrahlen die Oberfläche entlang einer Oberflächenkurve. Über den Zusammenhang der Spiegelabbildung von Geraden und Kurven an gekrümmten Oberflächen lässt sich zeigen, dass die Änderung der Monitorkurve vom linearen Verlauf proportional zur Änderung der Flächennormalen entlang der Oberflächenkurve ist [18]. Deutlich wird dies nochmals, wenn man beachtet, dass Geraden bei der Spiegelung nur auf Geraden abgebildet werden können, wenn die Spiegeloberfläche an den Reflexionspunkten einer Ebene entspricht. Das heißt, dass lokale Änderungen der Tangenten an der Monitorkurve lokalen Abweichungen der Spiegeloberfläche vom ebenen Verlauf entsprechen. Bekanntlich stellt die deflektometrische Registrierung  $l_r$  den Zusammenhang zwischen der Bildebene und der Monitorebene dar. Demzufolge lässt sich durch das Ableiten der deflektometrischen Registrierung  $l_r$  in eine bestimmte Richtung direkt die Abweichung der Flächennormalen, also die wahrgenommene Krümmung der Oberfläche, entlang der Richtung bestimmen. Die wahrgenommene Krümmung steht in direktem Zusammenhang mit der zweiten Ableitung der Objektoberfläche [18].

In Abbildung 4.9 erhält man durch die Faltung des Bildes  $f_{r,x}$  mit Filter für die Ableitung in  $x$ -Richtung (z. B. Sobel) ein Bild, das in direkter Beziehung zu der Ableitung der deflektometrischen Registrierung  $l_r$  in  $x$ -Richtung steht. Somit steht dieses Bild auch im Verhältnis mit der Krümmung der Oberfläche in  $x$ -Richtung. Analog lässt sich auch die Krümmung in  $y$ -Richtung auswerten.

Die deflektometrische Registrierung hat im Vergleich zur Rekonstruktion der Oberfläche essenzielle Vorteile. Zum einen kann zur Oberflächenprüfung auf die aufwendige Systemkalibrierung verzichtet werden. Außerdem ermöglichen die Separierbarkeit und die Darstellung als Bilder den Einsatz von effizienten Methoden aus dem Bereich der Bildverarbeitung. Das ermöglicht den Einsatz dieser Verfahren für die Erkennung von verschiedenen Fehlstellen auf spiegelnden Oberflächen. Die Verwendung für transparente Objekte, die Licht durchlassen, ist nur eingeschränkt möglich, da die meiste Information in der Krümmung der Streifenmuster liegt. Nutzt man also den Monitor als Durchlichtbeleuchtung, ist die Zuordnung trotz vorhandener Fehlstellen überwiegend linear. Dies kann allerdings auch zum Vorteil genutzt werden, wenn nur diese speziellen Informationen gesucht werden.

# Kapitel 5

## Ergebnisse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse und der Bewertung von den eingeführten Verfahren aus den Kapiteln 3 und 4 zur Auswertung von Oberflächeninformationen spiegelnder Prüfobjekte. Im Anschluss an die Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Verfahren soll eine Diskussion und ein Vergleich der Ergebnisse erfolgen.

Die angegebenen Ergebnisse in diesem Abschnitt wurden auf einem Computer mit Intel(R) Core(TM) i5-7400 CPU @3.00GHz, 4 Kerne, 8GB Arbeitsspeicher, Intel(R) HD Graphics 630 und Microsoft Windows 10 Pro (10.0, Build 19044) erreicht. Die Implementierung der Verfahren erfolgte als Plug-in für die Software NeuroCheck (Version 6.2) in der Programmiersprache C#. NeuroCheck ist ein Bildverarbeitungssystem zur Erstellung von Prüfprogrammen für die optische Qualitätssicherung. Nach einem Baukastenprinzip lassen sich Lösungen für individuelle Problemstellungen in den Bereichen der industriellen Bildverarbeitung entwickeln. Über das Plug-in Interface von NeuroCheck können selbst entworfene Funktionen in die Software integriert und mit einer großen Auswahl von angebotenen Methoden weiterverarbeitet werden.



Durchlichtauswertung



Spiegelbildauswertung

Abbildung 5.1: Verwendete Aufbauten für die Verfahren. Links: Objektiv mit Brennweite  $f = 50$  mm. Rechts: Objektiv mit Brennweite  $f = 6$  mm.

Abbildung 5.1 zeigt die verwendeten Aufbauten zur Erzeugung von Bildern für die Verfahren. Die Durchlichtauswertung eignet sich nur für transparente Prüfobjekte, während die Spiegelbildauswertung allgemein auf spiegelnde Prüfobjekte, also auch auf transparente Prüfobjekte, anwendbar ist. Die verwendeten Kamerabilder haben eine Auflösung von 500 x 370 Pixeln und umfassen nur die Helligkeitsstufen. Das heißt, es werden nur Graubilder verarbeitet. Bei den folgenden Aufnahmen gilt zu berücksichtigen, dass ein spezieller Polfilter fest auf der verwendeten Kamera angebracht ist. In den Aufnahmen ergibt sich dadurch stets eine Struktur aus Streifen mit diagonaler Ausbreitungsrichtung von oben links nach unten rechts. Die Objektive wurden an die jeweilige Szene angepasst, um geeignete Bilder aufnehmen zu können. Zur Verbesserung der Ergebnisse werden die verwendeten Aufbauten noch durch geeignete Abschirmungen vor Fremdlicht geschützt.

## 5.1 Sichtprüfung durch Lichtstreuung

Das Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ wurde in Kapitel 3 eingeführt und lässt insbesondere kleine Defekte auf spiegelnden Oberflächen sichtbar werden. Die Parameter zur Erzeugung der Muster nach Gleichung 3.5 können in Tabelle 5.1 abgelesen werden.

Tabelle 5.1: Parameter der Streifenmuster für das Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“.

Beschreibung	Name	Wert
Tastgrad (beeinflusst die Streifenbreiten)	$D$	$\frac{2}{5}$
Amplitude (beeinflusst die Helligkeit)	$A_m$	127.5
Kontrast	$C_m$	1.0
Anzahl Perioden des Musters	$N_p$	60
Anzahl Phasenverschiebungen	$N_{shift}$	16
Bildschirmbreite (in Pixel)	$L_{width}$	1920
Bildschirmhöhe (in Pixel)	$L_{height}$	1080

Durch diese Parameter erhält man eine Sequenz aus 16 Mustern, die auf einem LCD-Bildschirm angezeigt und anschließend durch eine Kamera aufgenommen werden können. Zur Kodierung der Oberfläche werden insgesamt 256 Helligkeitsstufen auf die Oberfläche abgebildet.

### 5.1.1 Durchlichtauswertung

Zunächst wird für dieses Verfahren die Analyse mit der Durchlichtauswertung durchgeführt. Aus dem Grund werden nur transparente Prüfobjekte untersucht. In Abbildung 5.2 werden einzelne Aufnahmen der Brillengläser bei Verwendung des Aufbaus aus dem linken Teilbild aus Abbildung 5.1 dargestellt. Dabei wurden die Brillengläser auf eine dunkle Halterung gelegt, welche im linken Teilbild aus Abbildung 5.1 über dem Bildschirm zu erkennen ist.



Abbildung 5.2: Aufnahmen der Brillengläser bei der Durchlichtauswertung mit Streifenmustern

Durch Anwendung des Verfahrens „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ erhält man für die drei Brillengläser folgende Bilder:



Abbildung 5.3: Ergebnisbilder des Verfahrens „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ bei der Durchlichtauswertung

Um die Bilder aus Abbildung 5.3 zu erzeugen, wurde als Verknüpfungsmethode des Verfahrens die betragsmäßige Differenz gewählt. Somit kann man einen hohen Kontrast zwischen der Halterung und dem sichtbaren Bereich des Brillenglases schaffen. Durch Anwendung einer Kontrastverbesserung in lokalen Bereichen des Bildes und geeigneter Kennlinientransformationen können die Bilder nachbearbeitet werden, um die Kratzer und Eingravierungen in der Oberfläche besser zu erkennen:

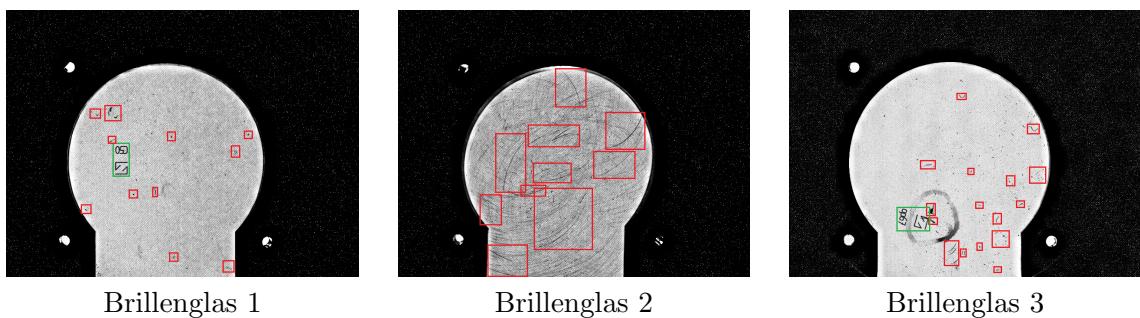


Abbildung 5.4: Verbesserung der Ergebnisbilder. In Grün: Gravur der Brillenglaskennzeichnung. In Rot: Kratzer und ähnliche Beschädigungen der Oberfläche.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Es wurde nur eine Auswahl von Fehlstellen markiert, um die Übersicht beizubehalten.

In den einzelnen Teilbildern aus Abbildung 5.4 kann man in den markierten Bereichen Fehlstellen bzw. Gravuren als dunkle Formen erkennen. Dadurch werden für das Brillenglas 1 und das Brillenglas 3 aus Abbildung 5.4 die eingravierten Markenzeichen auf den Oberflächen sichtbar. In Brillenglas 2 erkennt man viele Kratzspuren, die auf eine fehlerhafte Polierung hindeuten.

### 5.1.2 Spiegelbildauswertung

Nachdem das Verfahren für die Durchlichtauswertung Fehlstellen auf transparenten Objekten sichtbar machen konnte, stellt man sich die Frage, ob ähnliche Ergebnisse auch für nicht-transparente spiegelnde Objekte erzielt werden können. Für diese Objekte wird das Verfahren mit der Spiegelbildauswertung angewandt. Hierfür wählt man den Aufbau aus dem rechten Teilbild aus Abbildung 5.1.

Für einen Vergleich der Spiegelbildauswertung zur Durchlichtauswertung für transparente Prüfobjekte wird das Brillenglas 1 (siehe linkes Teilbild aus Abbildung 5.2) untersucht, da es ein polarisierendes Sonnenbrillenglas ist. Das bedeutet, dass das Brillenglas das auftreffende Licht je nach Polarisation des Lichts deutlich stärker reflektiert. Somit gelangt nahezu nur noch Licht mit einer speziellen Polarisation<sup>2</sup> durch das Glas. Diese Eigenschaft kann man für die Spiegelbildauswertung nutzen, um den Rückseitenreflex (vgl. Abschnitt 2.1) zu minimieren. Die weiteren Objekte sind spiegelnde Keramikbruchstücke. Die Prüfobjekte werden mittels eines Gelenkarms über dem Bildschirm positioniert und durch die Kamera aufgenommen (siehe Abbildung 5.5).



Brillenglas 1



Keramikobjekt 1



Keramikobjekt 2

Abbildung 5.5: Aufnahmen der Streifenmuster bei der Spiegelbildauswertung

Durch Anwendung des Verfahrens „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ erhält man für die drei Prüfobjekte folgende Bilder:

<sup>2</sup>Die Polarisation beschreibt die Schwingungsrichtung der Lichtwellen. Für den weiteren Verlauf sind die Details irrelevant, weshalb nicht konkreter darauf eingegangen werden muss.



Abbildung 5.6: Ergebnisbilder des Verfahrens „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ bei der Spiegelbildauswertung

Es wurde als Verknüpfungsmethode des Verfahrens die betragsmäßige Differenz gewählt, um die Bilder aus Abbildung 5.6 zu erzeugen. Wie auch im vorigen Abschnitt 5.1.1 ist der Grund dafür der höhere Kontrast zwischen den Prüfobjekten und dem Hintergrund. In einem weiterem Schritt wurden die Bilder durch lokale Kontrastverbesserungen und geeignete Kennlinientransformationen nachbearbeitet, um die Fehlstellen besser zu erkennen:

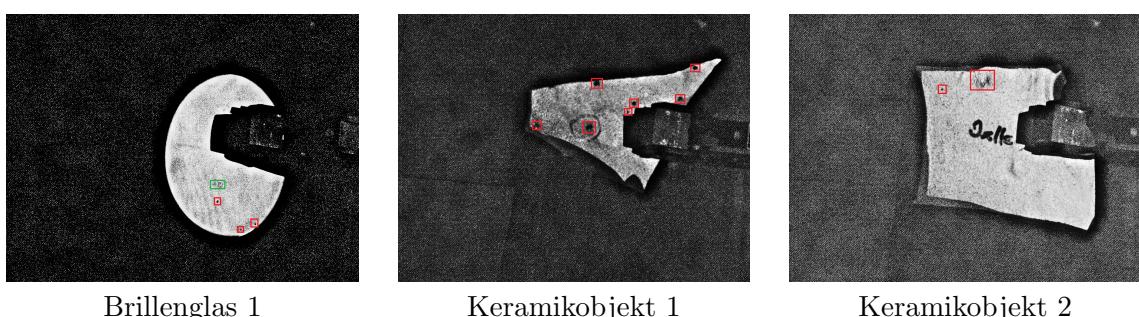


Abbildung 5.7: Verbesserung der Ergebnisbilder. In Grün (bei Brillenglas 1): Gravur der Brillenglaskennzeichnung. In Rot: Kratzer, Pickel und ähnliche Beschädigungen der Oberfläche.

In Abbildung 5.7 sind die Fehlstellen in Rot markiert. Analog wie auch im vorherigen Abschnitt 5.1.1 erkennt man für Brillenglas 1 im grünen Rechteck eine Gravur des Markenzeichens auf der Oberfläche. Für das Keramikobjekt 1 fallen einige dunkle Punkte im Objektbereich auf, welche durch sogenannte „Pickel“ auf der Oberfläche entstehen. Auf dem Keramikobjekt 2 befindet sich eine Delle, die im größeren roten Rechteck zu sehen ist.

## 5.2 Deflektometrische Registrierung

Das Verfahren zur Bestimmung der deflektometrischen Registrierung wurde in Kapitel 4 eingeführt und bestimmt eine Zuordnung zwischen Bildschirm- und Kamerapunkten. Nach Abschnitt 4.2 lässt sich diese Zuordnung durch zwei Bilder darstellen und mittels Methoden aus der Bildverarbeitung auswerten. Die Parameter zur Erzeugung der Muster nach Gleichung 4.11 können in Tabelle 5.1 abgelesen werden.

Tabelle 5.2: Parameter der Streifenmuster für das Verfahren „Bestimmung der deflektometrischen Registrierung“.

Beschreibung	Name	Wert
Amplitude (beeinflusst die Helligkeit)	$A_m$	127.5
Kontrast	$C_m$	1.0
Anzahl Perioden des ersten Muster	$N_p^1$	3
Anzahl Perioden des zweiten Muster	$N_p^2$	5
Anzahl Perioden des dritten Muster	$N_p^3$	7
Anzahl Phasenverschiebungen jedes Musters	$N_{shift}$	4
Bildschirmbreite (in Pixel)	$L_{width}$	1920
Bildschirmhöhe (in Pixel)	$L_{height}$	1080

Durch diese Parameter erhält man eine Sequenz aus 12 Mustern, die auf einem LCD-Bildschirm angezeigt und anschließend durch eine Kamera aufgenommen werden können. Zur Kodierung der Oberfläche werden insgesamt 256 Helligkeitsstufen auf die Oberfläche abgebildet.

Im Folgenden wird nur die deflektometrische Registrierung der Zeilen untersucht. Die Ergebnisse der deflektometrischen Registrierung der Spalten liefert für die Auswertung ähnliche Ergebnisse, weshalb darauf verzichtet wird.

### 5.2.1 Durchlichtauswertung

Wie auch im Abschnitt 5.1 soll das Verfahren zunächst mit der Durchlichtauswertung auf transparente Prüfobjekte angewandt werden. Für einen nachfolgenden Vergleich zum Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ sollen mit diesem Verfahren auch die Brillengläser 1 und 2 aus Abbildung 5.2 ausgewertet werden. Zusätzlich zu den beiden Objekten wird ein weiteres Brillenglas mit diesem Verfahren untersucht. Es wird der Aufbau aus dem linken Teilbild aus Abbildung 5.1 verwendet und die Brillengläser auf die dunkle Halterung positioniert. Die Brillengläser werden zur Demonstration bei der Anzeige eines einzelnen Streifenmusters nach den Parametern aus Tabelle 5.2 aufgenommen:

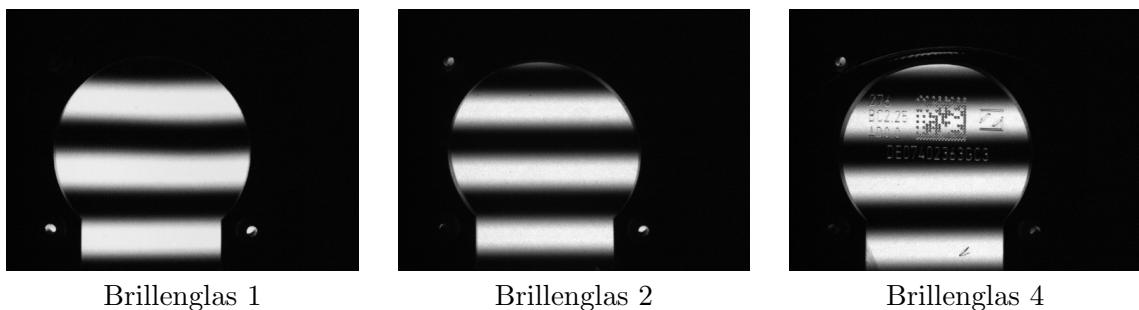


Abbildung 5.8: Aufnahmen der Brillengläser bei der Durchlichtauswertung mit sinusoidalen Streifenmustern

Nach der Bestimmung der deflektometrischen Registrierungen der Brillengläser können daraus Bilder erstellt werden (siehe Definition 4.3):

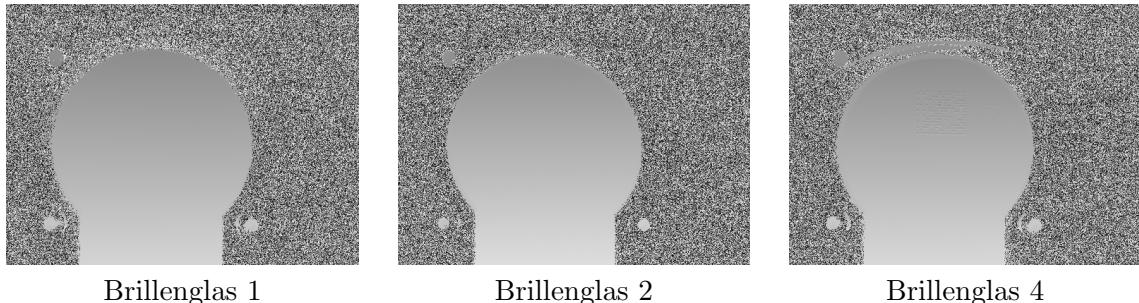


Abbildung 5.9: Bilder der deflektometrischen Registrierung der Zeilen bei der Durchlichtauswertung.

Zur Verdeutlichung der Ergebnisse des Verfahrens ist es sinnvoll, die Ableitung der Bilder in Richtung der Zeilen zu bilden (siehe Abschnitt 4.2). Nach einer Kontrastverbesserung innerhalb des Objekts erhält man folgende Bilder:

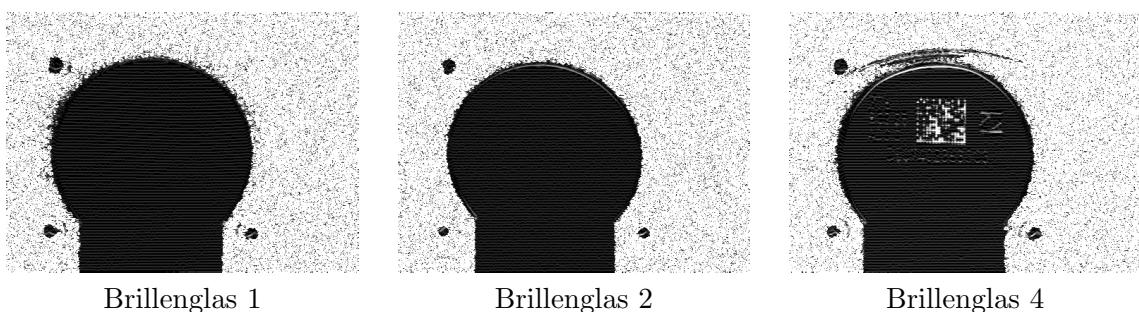


Abbildung 5.10: Ableitung der deflektometrischen Registrierung der Zeilen bei der Durchlichtauswertung.

Für die Brillengläser 1 und 2 lassen sich in Abbildung 5.10 keine auffällige Stellen entdecken, obwohl Kratzer und Gravuren vorhanden sind (vgl. Abbildung 5.4). Für alle Brillengläser erkennt man aber horizontale hellere Streifen in den Ableitungsbildern. Diese entstehen durch die gleichmäßige Krümmung der Brillengläser in Richtung der Zeilen. Man erfasst durch die Anwendung der deflektometrischen Zeilenregistrierung besonders die Krümmungsabweichungen in der Zeilenrichtung. Deshalb werden die horizontalen Krümmungsabweichungen deutlicher. Im Ableitungsbild von Brillenglas 3 in Abbildung 5.10 sind Auffälligkeiten erkennbar. Dabei sieht man das eingravierte Markenkennzeichen und einen Data-Matrix-Code zur Codierung von Informationen für den Brillenglashersteller.

### 5.2.2 Spiegelbildauswertung

Das Verfahren zur Bestimmung der deflektometrischen Registrierung konnte bestimmte Fehlstellen auch bei der Durchlichtauswertung sichtbar machen. Allerdings sind schwächere Kratzer und Gravuren untergegangen. Aus dem Grund wird zum Vergleich das Brillenglas

1 untersucht und durch den Aufbau für die Spiegelbildauswertung (siehe rechtes Teilbild aus Abbildung 5.1) geprüft, ob bessere Ergebnisse erzielt werden können. Wie auch im Abschnitt 5.1.2 kann für Brillenglas 1 der Rückseitenreflex durch den Polarisationsfilter und der Färbung nahezu vollständig vermieden werden. Die Spiegelbildauswertung ermöglicht auch die Anwendung des Verfahrens für nicht-transparente spiegelnde Objekte, weshalb die Keramikobjekte 1 und 2 aus Abbildung 5.5 zur Prüfung herangezogen werden.

In Abbildung 5.11 werden die Prüfobjekte unter der Spiegelung eines sinusoidalen Streifenmusters nach den Parametern aus Tabelle 5.2 dargestellt.



Abbildung 5.11: Aufnahmen der Prüfobjekte unter Spiegelung der sinusoidalen Streifenmuster

Nach der Bestimmung der deflektometrischen Registrierungen der Prüfobjekte können daraus Bilder erstellt werden (siehe Definition 4.3):

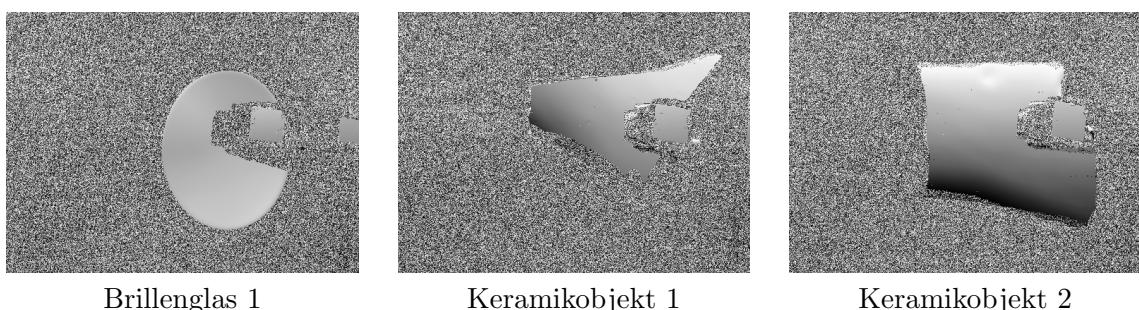


Abbildung 5.12: Bilder der deflektometrischen Registrierung der Zeilen bei der Spiegelbildauswertung.

In den Bildern der deflektometrischen Zeilenregistrierung tauchen in den zu untersuchenden Objekten einzelne Bildpunkte auf, deren Grauwerte nicht zu der Umgebung passen. Diese Ausreißer haben für die Oberflächenform keine größere Bedeutung und entstehen z. B. durch Messfehler, Fremdlicht oder die angestrahlte Abschirmung, die von innen Licht auf das Prüfobjekt reflektiert. Durch Anwendung des Medianfilters zur Glättung des Bildes, kann man diese Störungen weitgehend entfernen. Anschließend kann auch für diese Objekte zur Auswertung der deflektometrischen Registrierung die Ableitung der geglätteten Bilder in Richtung der Zeilen gebildet werden:



Abbildung 5.13: Ableitung der Bilder der deflektometrischen Registrierung der Zeilen bei der Spiegelbildauswertung.

Genau wie bei der Durchlichtauswertung durch dieses Verfahren, lassen sich bei dem Brillenglas 1 in Abbildung 5.13 keine größeren Auffälligkeiten feststellen. Es lassen sich demnach nicht wie im Abschnitt 5.1.2 Fehlstellen oder die Gravur der Brillenkennzeichnung erkennen. Auf den Keramikobjekten 1 und 2 erkennt man Abweichungen von den Krümmungsverläufen der Oberfläche. In Abbildung 5.13 sind diese Auffälligkeiten durch rote Rechtecke markiert. Beim Keramikobjekt 1 handelt es sich hierbei um sogenannte „Pickel“ auf der Oberfläche. Auf der Oberfläche des Keramikobjekts 2 befindet sich im roten Rechteck eine Delle bzw. Wölbung.

Als Alternative zur Auswertung der deflektometrischen Registrierung über die Ableitung, wird eine Auswertung über die Krümmungsberechnung durch den sogenannten „Mexican Hat“-Operator durchgeführt (siehe Abbildung 5.14). Die Filterung durch den „Mexican Hat“-Operator kann umgesetzt werden, indem im ersten Schritt eine Glättung des Bildes durch den Gauß-Filter  $g_\sigma$  realisiert und im Anschluss der Laplace-Operator  $\Delta$  angewandt wird [24]. Damit erhält man für die Filterung eines Bildes  $f$  im kontinuierlichen Fall mit dem „Mexican Hat“-Operator:

$$\begin{aligned} h(x, y) &= (f * \Delta g_\sigma)(x, y) \\ &= (f * \frac{\partial^2}{\partial x^2} g_\sigma)(x, y) + (f * \frac{\partial^2}{\partial y^2} g_\sigma)(x, y) \end{aligned}$$

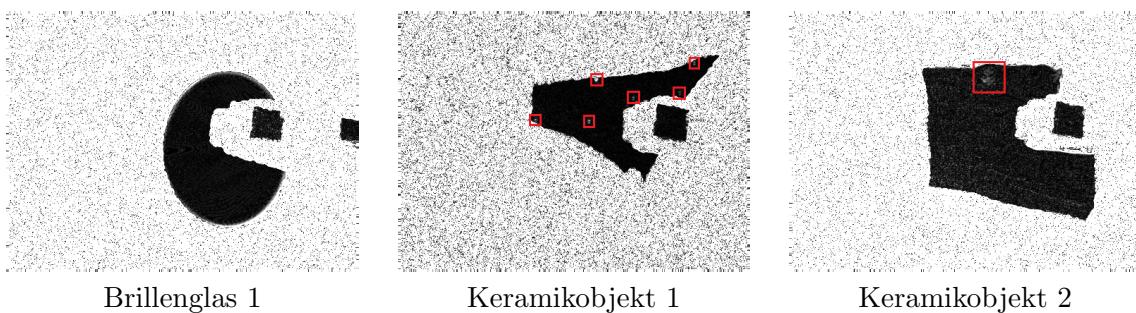


Abbildung 5.14: Mexican Hat-Filter angewandt auf die Bilder der deflektometrischen Registrierung der Zeilen.

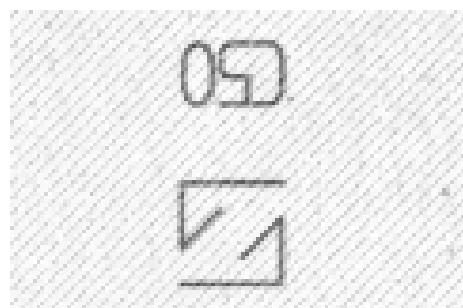
Auch in Abbildung 5.14 erkennt man im Brillenglas keine Abweichungen der Oberflächenkrümmung. Auf den Keramikobjekten 1 und 2 erkennt man an den in Abbildung 5.13

markierten Fehlstellen auch Auffälligkeiten in Abbildung 5.14.

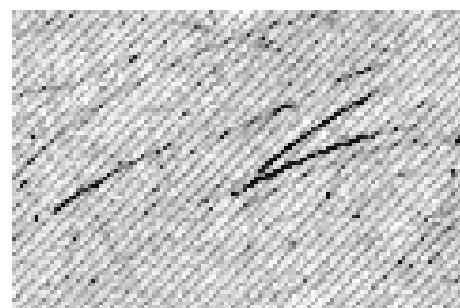
### 5.3 Diskussion

Im Folgenden sollen die beschriebenen Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten 5.1 und 5.2 aufgegriffen und bewertet werden. Das Ziel ist es, abhängig vom Anwendungsfall ein passendes Verfahren vorzuschlagen und die Schwächen und Stärken der Verfahren darzulegen.

Für das Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ fällt im Abschnitt 5.1 auf, dass es sich besonders gut für die Durchlichtauswertung von transparenten Prüfobjekten eignet. Es ist möglich bereits sehr kleine Defekte, wie z. B. leichte Kratzer oder Laser-Gravuren auf den Objektoberflächen zu erkennen (siehe Abbildung 5.15).



Ausschnitt von Brillenglas 1  
aus Abbildung 5.4



Ausschnitt von Brillenglas 2  
aus Abbildung 5.4

Abbildung 5.15: Erkennbare kleine Defekte oder Laser-Gravuren durch Durchlichtauswertung mit Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ (siehe Kapitel 3).

Linkes Teilbild: Erkennbare Lasergravur, Rechtes Teilbild: Leichte Kratzer durch Fehler bei der Polierung

Außerdem ist es möglich, für transparente Objekte durch die Durchlichtauswertung auch Defekte im Inneren des Objekts, wie z. B. Lufteinschlüsse in Gläsern, festzustellen. Dies konnte allerdings nicht nachgeprüft werden, da solche Defekte in den zur Verfügung stehenden Prüfobjekten nicht vorhanden waren.

Für nicht-transparente Prüfobjekte kann das Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ durch eine Spiegelbildauswertung ebenfalls geeignete Bilder erzeugen, um Defekte zu detektieren, allerdings gibt es hierbei schon erste Probleme. Eine große Schwäche des Verfahrens ist die Abhängigkeit von Oberflächenbeschriftungen oder -aufdrucken. Da stets Grauwerte der Kamerabilder verknüpft werden, beeinflussen unterschiedliche Farben auf der Oberfläche das Ergebnis (siehe Abbildung 5.16). Das gleiche Phänomen lässt sich auch beobachten, wenn das Objekt abhängig von der Position unterschiedlich stark reflektierend ist.



Abbildung 5.16: Sichtbare Beschriftung „Delle“ nach Anwendung des Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ auf Keramikobjekt 2. Ausschnitt aus Abbildung 5.7

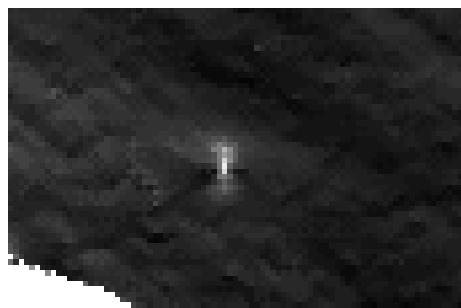
Dieser Einfluss kann zu Fehlern in der nachfolgenden Auswertung des Ergebnisbilds durch herkömmliche Bildverarbeitungsalgorithmen führen. Für dieses Verfahren ist es also notwendig, dass das Prüfobjekt einfarbig und ohne Beschriftungen vorliegt. Außerdem sollte das Prüfobjekt an allen zu untersuchenden Stellen das Licht gleich stark reflektieren. Damit können kleinere Defekte, wie z. B. Oberflächenpickel oder Kratzer in Brillengläsern, effizient detektiert werden. Größere Defekte, wie z. B. die Delle auf der Oberfläche des Keramikobjekts 2 (siehe Abbildung 5.7), sind hingegen schwerer zu identifizieren. Dieselben Effekte in den Ergebnisbildern wie bei Dellen können auch bei stärker gekrümmten Objekten oder an matten Stellen auftreten.

Die deflektometrische Registrierung erzeugt lediglich die Zuordnungsinformation, die durch spezielle Algorithmen weiterverarbeitet werden muss, um Untersuchungen der Oberfläche zu treffen. In dem Abschnitt 5.2 musste zunächst ein Bild aus der deflektometrischen Registrierung der Zeilen erzeugt werden, damit sich Bildverarbeitungsalgorithmen anwenden lassen. Die Bildverarbeitung konnte damit bestimmte Auffälligkeiten der Oberflächen hervorheben. Allerdings verliert man nach dem vorgestellten Ansatz eventuell Informationen über sehr kleine Defekte, da bei der Bilderzeugung je nach verwendeter Farbtiefe<sup>3</sup> mehrere Zeilenpositionen demselben Grauwert zugeordnet werden. Zur Erzeugung der Ergebnisse in Abschnitt 5.2 werden 256 verschiedene Grauwerte unterschieden. Da aber die Monitorhöhe mehr Positionen als die 256 zu vergebenden Grauwerte hat, fallen verschiedene Zeilen auf denselben Grauwert. Man verliert Detailinformationen der deflektometrischen Registrierung. Das macht es schwieriger, sehr kleine Abweichungen der Reflexionen, wie z. B. Kratzer oder Laser-Gravuren, zu erkennen. Die tatsächlichen Reflexionsabweichungen sind bei der Durchlichtauswertung kleiner als im Spiegelbild. Es lässt sich auch in Abbildung 5.10 erkennen, dass sich die deflektometrische Registrierung für die Durchlichtauswertung von Brillengläsern nur begrenzt eignet. Auch die Auswertung des Spiegelbilds von Brillenglas 1 zeigt keine Auffälligkeiten, da die Kratzer und Laser-Gravuren die Reflexion des Lichts nur minimal beeinflussen (siehe Abbildung 5.13). Eine mögliche Begründung

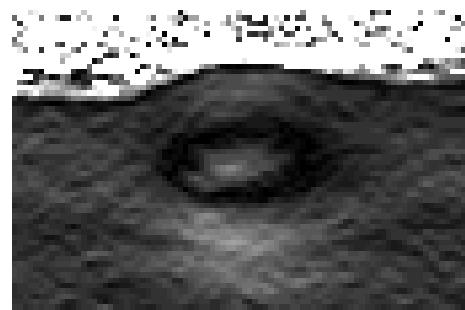
<sup>3</sup>Die Farbtiefe eines Bildes bestimmt die Anzahl differenzierbarer Helligkeitsstufen pro Bildpunkt. Herkömmlich werden 256 Helligkeitsabstufungen bzw. 8-Bit verwendet. Mit einer Farbtiefe von 16-Bit hat man bereits 65536 Helligkeitsabstufungen, aber der Speicherbedarf steigt stark an.

könnte deshalb die zu geringe Farbtiefe der erzeugten Bilder aus der deflektometrischen Registrierung sein. Allerdings konnte dies nicht nachgeprüft werden, weshalb die Verbesserung durch eine höhere Farbtiefe in den Ausblick verschoben wird.

Für die Spiegelbildauswertung durch die Bestimmung der deflektometrischen Registrierung der Zeilen sind für die untersuchten Keramikobjekte bessere Ergebnisse zu erkennen (siehe Abbildung 5.17).



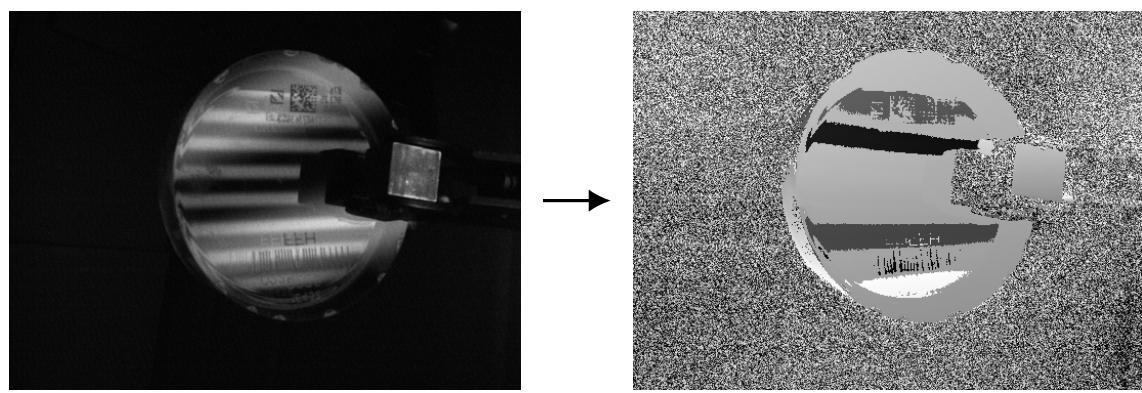
Ausschnitt von Keramikobjekt 1  
aus Abbildung 5.13



Ausschnitt von Keramikobjekt 2  
aus Abbildung 5.13

Abbildung 5.17: Erkennbare Oberflächendefekte durch Ableitung der deflektometrischen Registrierung. Linkes Teilbild: Oberflächenpickel, Rechtes Teilbild: Delle in der Oberfläche

Ein großer Vorteil der Auswertung über die deflektometrische Registrierung ist die Unabhängigkeit von Oberflächenbeschriftungen oder -aufdrucken. Es ist also möglich, ein Objekt mit verschiedenen Farben oder Lackierungen zu prüfen. Außerdem erhält man durch das Verfahren tatsächliche Krümmungsinformationen der Objektoberfläche, die ausgewertet werden können. Eine Schwäche der deflektometrischen Registrierung ist die Empfindlichkeit gegenüber Fremdlichteinwirkungen oder störenden Reflexionen, wie z. B. dem Rückseitenreflex bei spiegelnden Oberflächen (siehe Abbildung 5.18).



Aufnahme des sinusoidalen Streifenmusters mit Rückseitenreflex

Bild der deflektometrischen Zeilenregistrierung

Abbildung 5.18: Auswirkungen des Rückseitenreflexes bei der deflektometrischen Registrierung. Es entstehen Phasensprünge trotz gleichmäßiger Krümmung.

Durch die Überlagerung der Reflexionen im Kamerabild ist es nicht länger möglich, die Dekodierung korrekt durchzuführen. Es kommt an manchen Stellen zu Fehlern und Phasensprüngen. Dadurch wird auch die Auswertung des Bildes keine nützlichen Ergebnisse mehr erbringen können.

Die Problematik des Rückseitenreflexes trifft auch auf das Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ zu. Durch die überlagerten Streifenmuster kann es passieren, dass fehlerhafte Strukturen durch das Verfahren entstehen (siehe Abbildung 5.19).

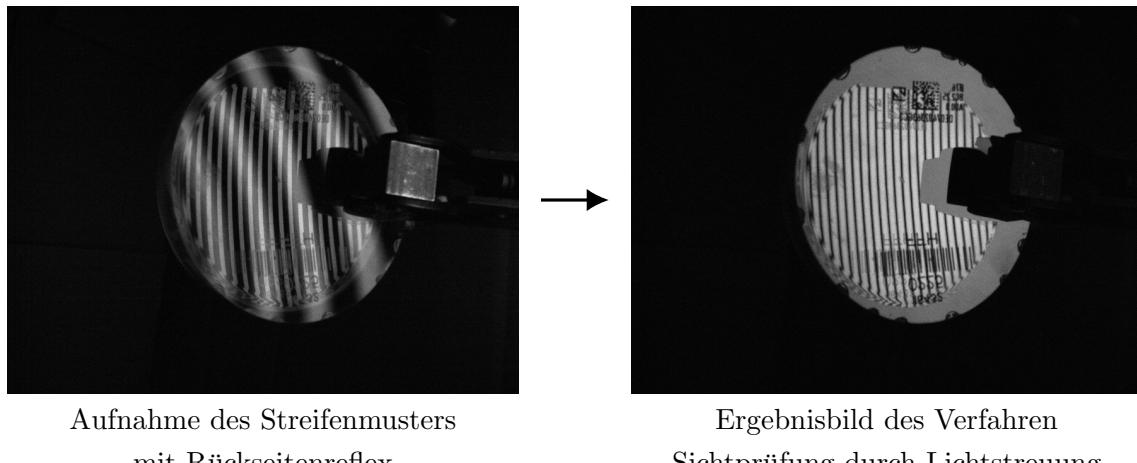


Abbildung 5.19: Auswirkungen des Rückseitenreflexes bei „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“. Es entstehen vertikale Streifen auf der Rückseite des Brillenglasses.

Durch die bisherigen Ausführungen lassen sich in den vorgestellten Verfahren Stärken und Schwächen erkennen. Ausgehend davon soll die Eignung der Verfahren für spezielle Anwendungen vermittelt werden. Aus Abbildungen 5.18 und 5.19 lässt sich schließen, dass transparente Objekte durch den Rückseitenreflex nicht für die Spiegelbildauswertung mit den vorgestellten Verfahren geeignet sind. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit bei der Durchlichtauswertung bietet sich deshalb besonders das Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ an, wenn die qualitative Sichtprüfung des transparenten Objekts ausreichend ist. Sobald weitere Informationen, wie z. B. die Oberflächenkrümmung erforderlich sind, sollte für die Objekte die deflektometrische Registrierung des Spiegelbilds bestimmt werden. Dabei muss dann auch das Problem des Rückseitenreflexes behandelt werden.

Es wird ersichtlich, dass das Verfahren zur Auswertung der deflektometrischen Registrierung bessere Ergebnisse für nicht-transparente spiegelnde Objekte bei der Spiegelbildanalyse erzielen kann. Im Vergleich zum Verfahren „Sichtprüfung durch Lichtstreuung“ ist die deflektometrische Registrierung besser geeignet für stärker gekrümmte oder lackierte Objekte. Die deflektometrische Registrierung kann durch weitere Verarbeitungen auch genutzt werden, um die Oberfläche des Prüfobjekts zu rekonstruieren. Diese Möglichkeiten machen die deflektometrische Registrierung zu einer nützlichen Information über Oberflächen zur Erfassung von Oberflächendefekten spiegelnder Objekte.

# Kapitel 6

## Abschlussbemerkungen

### 6.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, allgemein anwendbare Methoden zur Analyse von spiegelnden und transparenten Oberflächen zu untersuchen, auszuarbeiten und anschließend anzuwenden. Hierzu wurden zu Beginn der vorliegenden Arbeit die theoretischen Grundlagen der Deflektometrie betrachtet.

Innerhalb der Betrachtungen wurden die Ansätze und Möglichkeiten der Deflektometrie aufgezeigt. Im Zentrum stand dabei, dass spiegelnde Oberflächen stets über ihre Umgebung wahrgenommen werden müssen und durch Spiegelungen geeigneter Szenen Informationen über die Krümmung gewonnen werden können. Es wurden dabei konkrete Mustersequenzen erklärt, die auf dem heutigen Stand der Technik eingesetzt werden, um die Informationen aus der Szene kodiert in den Bildkanal zu übertragen.

Nachdem die deflektometrischen Verfahren zur Rekonstruktion der Objektoberfläche mit ihren Schwierigkeiten und Problemen behandelt wurden, sollten Verfahren zur qualitativen Sichtprüfung dargestellt werden. Diese Verfahren sind aufgrund weniger zu berücksichtigender Parameter und Einschränkungen besser geeignet für die allgemeine Anwendung. Durch das bessere Verständnis der Grundlagen konnten im Anschluss Ansätze aufgestellt und Verfahren entwickelt werden, mit denen die Problemstellungen aus der Einführung bewältigt werden können. Es wurden zwei Verfahren im Detail beschrieben, um sowohl transparente Objekte und spiegelnde Oberflächen zu untersuchen:

- Das erste Verfahren wurde in Kapitel 3 beschrieben. Es werden Streifenmuster verwendet, um die abweichende Lichtstreuung an Oberflächendefekten zu nutzen. Im Vergleich zur spiegelnden Oberfläche sind diese Stellen nicht spekular reflektierend. Durch bestimmte Verknüpfungsregeln von Bildern ist es damit möglich, die Stellen mit abweichender Lichtstreuung hervorzuheben und Fehlstellen zu erfassen.
- Das zweite Verfahren wurde in Kapitel 4 beschrieben. Es wird hierbei der Ansatz der Kodierung der Objektoberfläche mithilfe von sinusoidalen Streifenmustern verfolgt (vgl. Abschnitt 2.2.1). Durch bestimmte Methoden ist es mithilfe von speziellen Mustersequenzen möglich, eine eindeutige Zuordnung von Kamerapunkten

und Punkten auf einem Bildschirm bzw. der Szene anzugeben. Die Zuordnung wurde als deflektometrische Registrierung bezeichnet. Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, herkömmliche Bildverarbeitungsalgorithmen anzuwenden, um Fehlstellen aus der deflektometrischen Registrierung zu erfassen (siehe Abschnitt 4.2).

Diese beiden Verfahren sind zur Anwendung für die Bildverarbeitungssoftware NeuroCheck implementiert worden. Im Anschluss wurden die Ergebnisse der Arbeit an der Implementierung getestet. Die Tests sollten dazu dienen, die Funktionalität der Verfahren und der Implementierung zu prüfen. Außerdem sollten im Rahmen der Präsentation der Ergebnisse auch die beiden Verfahren für die Anwendung auf spiegelnde und transparente Oberflächen verglichen werden. Bei den Anwendungen wurden zwei verschiedene Aufbauten gegeneinander getestet (siehe Abbildung 5.1).

- Der erste Aufbau ermöglicht die Auswertung der Bilder durch eine Durchlichtszene. Dies ist nur für transparente Prüfobjekte umsetzbar, da das Objekt zwischen den Szenen (Bild eines LCD-Bildschirm) und der Kamera liegt. Die Szenen werden direkt durch das Prüfobjekt hindurch beobachtet und in der Kameraaufnahme durch die Objektkrümmungen verzerrt aufgenommen.
- Der zweite Aufbau ermöglicht die Auswertung der Bilder durch eine Spiegelbildszene. Dies lässt sich sowohl für spiegelnde, aber auch für transparente Prüfobjekte anwenden. Die Szene wird über die Spiegelung auf der Objektoberfläche beobachtet und in der Kameraaufnahme durch die Oberflächenkrümmungen verzerrt.

Bei den Tests ist deutlich geworden, dass sich das erste Verfahren (Sichtprüfung durch Lichtstreuung) für transparente Objekte gut eignet. Der Rückseitenreflex der transparenten Objekte konnte verhindert werden, indem der Durchlichtaufbau verwendet wurde. Mit der Spiegelbildungsauswertung für spiegelnde Oberflächen zeigte dieses Verfahren Schwächen bei stärkeren Krümmungen und unterschiedlichen Farben bzw. Beschriftungen auf den Objekten. Für spiegelnde Objekte ließ sich feststellen, dass das zweite Verfahren (Deflektometrische Registrierung) präzisere Ergebnisse liefert hinsichtlich größerer Krümmungen oder unterschiedlichen Farben oder Beschriftungen auf einer Oberfläche. Außerdem wird es durch die Ergebnisse des Verfahrens möglich, tatsächliche Krümmungen der Oberfläche mit einer bestimmten Genauigkeit zu erkennen. Hierfür wurden die Richtungsableitung der deflektometrischen Registrierung hinzugezogen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass für spiegelnde Objekte durch die Beobachtung von Spiegelbildern zuverlässig kleinere und größere Oberflächendefekte erfasst werden können. Für transparente Objekte ist dies auch möglich, allerdings muss das Problem des Rückseitenreflexes dafür gelöst werden. Dies wurde durch die Verwendung des Durchlichtaufbaus erreicht, wodurch auch kleinere und größere Defekte in transparenten Objekten zuverlässig erfasst werden konnten.

## 6.2 Ausblick

Im Ausblick dieser Arbeit stehen mögliche Verbesserungen, die an den beschriebenen Verfahren vorgenommen werden können.

Ein wichtiger Punkt für die Anwendbarkeit im industriellen Umfeld ist die Laufzeit der Verfahren. Im Rahmen der Tests ist aufgefallen, dass der Aufnahmeprozess mit der Mustererzeugung, der Bildschirm- und der Kameraansteuerung ein zeitintensiver Vorgang während der Prüfung ist. Betrachtet man die Anzahl nötiger Bildaufnahmen zur Bestimmung der deflektometrischen Registrierung, bemerkt man, dass dabei Optimierungsbedarf besteht. Für die Ergebnisse der deflektometrischen Registrierung aus Kapitel 5 wurden stets 12 Bildaufnahmen verwendet. Dabei wurde aber nur die deflektometrische Registrierung der Zeilen betrachtet. Würde man die vollständige deflektometrische Registrierung bestimmen, wären 24 Bildaufnahmen nötig gewesen. Für präzisere Messergebnisse könnten noch weitere Bildaufnahmen hinzugezogen werden. Zur Optimierung der Anzahl nötiger Bildaufnahmen könnte man eine Überlagerung der sinusoidalen Streifenmuster in  $x$ - und in  $y$ -Richtung durchführen. Durch die Fourier-Analyse wäre es möglich, die überlagerten Muster im Kamerabild zu trennen und somit die Anzahl der benötigten Bildaufnahmen für eine vollständige deflektometrische Registrierung um die Hälfte zu reduzieren (vgl. [25]).

In Kapitel 5 konnte erkannt werden, dass kleine Kratzer oder Laser-Gravuren nicht durch das Bild der deflektometrischen Registrierung sichtbar wurden. Dies könnte sich durch Ungenauigkeiten bei der Bilderzeugung aus der deflektometrische Registrierung begründen lassen. Die Darstellung der Zuordnung als Bild bewirkt, dass eventuell manche Zuordnungen auf denselben Grauwert fallen. Das liegt an der mangelnden Anzahl an zu vergebenden Grauwerten. Durch eine höhere Anzahl an differenzierbaren Grauwerten könnte es möglich sein, kleinere Oberflächendefekte zu erkennen. Dies könnte z. B. durch die Verwendung einer Farbtiefe von 16-Bit erreicht werden.

Die Deflektometrie bietet eine große Menge an Verfahren und wird durch stetige Weiterentwicklung immer genauer und performanter. Aus dem Grund lassen sich in den beschriebenen Verfahren auch durchaus weitere Optimierungsmöglichkeiten finden. Abschließend lässt sich sagen, dass die deflektometrischen Verfahren vielversprechende Perspektiven bereitstellen, um automatisiert spiegelnde oder transparente Oberflächen vollständig zu erfassen und zu prüfen.

# Quellenverzeichnis

- [1] Headout UK Ltd. *Versailler Schloss: Geschichte*. URL: <https://www.versailles-palace-tickets.com/de/discover-palace-of-versailles/> (Letzter Zugriff: 27.06.2022).
- [2] Tara Simms Richard G. Coss Saralyn Ruff. „All That Glistens: II. The Effects of Reflective Surface Finishes on the Mouthing Activity of Infants and Toddlers“. In: *Ecological Psychology* 15.3 (2003), S. 197–213. DOI: 10.1207/S15326969EC01503\_1. URL: [https://doi.org/10.1207/S15326969EC01503\\_1](https://doi.org/10.1207/S15326969EC01503_1) (Letzter Zugriff: 22.06.2022).
- [3] Richard G. Coss. „All that Glistens: Water Connotations in Surface Finishes“. In: *Ecological Psychology* 2.4 (1990), S. 367–380. DOI: 10.1207/s15326969eco0204\_3. URL: [https://doi.org/10.1207/s15326969eco0204\\_3](https://doi.org/10.1207/s15326969eco0204_3) (Letzter Zugriff: 22.06.2022).
- [4] Statista GmbH. *Pkw-Produktion in Deutschland bis 2021*. 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/75210/umfrage/produktion-von-pkw-in-deutschland-seit-1990/> (Letzter Zugriff: 04.04.2022).
- [5] Kurt Häusler. „Automatisierte Inspektion spiegelnder Oberflächen“. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* (2018). DOI: 10.1007/s35144-018-0319-z. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s35144-018-0319-z> (Letzter Zugriff: 20.06.2022).
- [6] NeuroCheck GmbH. *NeuroCheck Firmenlogo*. URL: <https://www.neurocheck.com/ncwp-content/uploads/neurocheck-logo-1.svg> (Letzter Zugriff: 28.11.2021).
- [7] Michael Heizmann. *Deflektometrie zur Inspektion spiegelnder Oberflächen*. Fraunhofer-Institut für Optronik. URL: <https://www.vision.fraunhofer.de/de/technologien-anwendungen/technologien/oberflaecheninspektion/deflektometrie-spiegelnder-oberflaechen.html> (Letzter Zugriff: 01.03.2022).
- [8] Bob Parker. *The Chicago Bean*. URL: <https://mergx.wordpress.com/2011/07/10/the-chicago-bean/> (Letzter Zugriff: 29.05.2022).
- [9] Christian Faber. „Fortschritte in der Deflektometrie: Neue Mess- und Kodierungsverfahren“. In: 492. JENAer Optikkolloquium. OptoNet e.V. 19. Mai 2022.

- [10] Stephanie Aprojanz. *Untersuchung zur Objektivierung der visuellen Beurteilung von Frontscheiben durch deflektometrische Messtechnik*. Springer Wiesbaden, 2018. ISBN: 978-3-658-24369-2. DOI: 10.1007/978-3-658-24370-8. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-24370-8> (Letzter Zugriff: 12.06.2022).
- [11] Wolfgang Berggold. „Von Brillen und Spiegeln“. In: *inVISION News* (2013). URL: <https://invision-news.de/allgemein/von-brillen-und-spiegeln/> (Letzter Zugriff: 12.06.2022).
- [12] Hyug-Gyo Rhee Manh The Nguyen Young-Sik Ghim. *Aufbau einer Deflektometrie-Prüfstation*. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-39514-6/figures/1> (Letzter Zugriff: 25.02.2022).
- [13] P Carré. „Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures“. In: *Metrologia* (1966). DOI: 10.1088/0026-1394/2/1/005. URL: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/1/005>.
- [14] Christian Faber Hanning Liang Tomas Sauer. „Using wavelet transform to evaluate single-shot phase measuring deflectometry data“. In: *Applications of Digital Image Processing XLIII*. Hrsg. von Andrew G. Tescher und Touradj Ebrahimi. Bd. 11510. International Society for Optics und Photonics. SPIE, 2020, S. 404–410. DOI: 10.1117/12.2567301. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2567301>.
- [15] J. W. Goodman. „Some fundamental properties of speckle“. In: (1976). DOI: 10.1364/JOSA.66.001145. URL: <http://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=josa-66-11-1145>.
- [16] Michael Heizmann David Uhlig. „Multi-Stereo-Deflektometrie mit einer Lichtfeldkamera“. In: *tm - Technisches Messen* 85.s1 (2018), s59–s65. DOI: doi:10.1515/teme-2018-0042. URL: <https://doi.org/10.1515/teme-2018-0042> (Letzter Zugriff: 01.06.2022).
- [17] Jonathan Balzer. *Regularisierung des Deflektometrieproblems - Grundlagen und Anwendung*. 2008. ISBN: 978-3-86644-230-6. DOI: 10.5445/KSP/1000007844. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000007844> (Letzter Zugriff: 01.06.2022).
- [18] Stefan Bruno Werling. *Deflektometrie zur automatischen Sichtprüfung und Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen*. 2011. ISBN: 9783866446878. DOI: 10.5445/IR/1000023290. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000023290> (Letzter Zugriff: 02.03.2022).
- [19] Eric W. Weissstein. *Square Wave*. MathWorld - A Wolfram Web Resource. URL: <https://mathworld.wolfram.com/SquareWave.html> (Letzter Zugriff: 26.05.2022).
- [20] Evan Sitt et al. „Implementation of Digital Synthesis in Functional Programming“. In: 21st International Symposium on Trends in Functional Programming. Krakau, Polen, 2020. URL: [http://www.cse.chalmers.se/~rjmh/tfp/proceedings/TFP\\_2020\\_paper\\_21.pdf](http://www.cse.chalmers.se/~rjmh/tfp/proceedings/TFP_2020_paper_21.pdf) (Letzter Zugriff: 26.05.2022).

- [21] Eric W. Weissstein. *Square Wave*. MathWorld - A Wolfram Web Resource. URL: <https://mathworld.wolfram.com/SquareWave.html> (Letzter Zugriff: 26.05.2022).
- [22] Ejectamenta. *Ejectamenta Fourifier*. 2020. URL: <https://ejectamenta.com/imaging-experiments/fourifier/> (Letzter Zugriff: 14.03.2022).
- [23] Sören Kammel. *Deflektometrische Untersuchung spiegelnd reflektierender Freiformflächen*. 2005. ISBN: 3937300287. DOI: 10.5445/KSP/1000002980. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000002980> (Letzter Zugriff: 28.04.2022).
- [24] Ellen Hildreth David Marr. „Theory of edge detection“. In: *The Royal Society* 207.1167 (1980), S. 187–217. DOI: 10.1098/rspb.1980.0020. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspb.1980.0020> (Letzter Zugriff: 23.06.2022).
- [25] Hyug-Gyo Rhee Manh The Nguyen Young-Sik Ghim. „Single-shot deflectometry for dynamic 3D surface profile measurement by modified spatial-carrier frequency phase-shifting method“. In: *Scientific Reports* (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-39514-6. URL: [www.nature.com/articles/s41598-019-39514-6](http://www.nature.com/articles/s41598-019-39514-6) (Letzter Zugriff: 21.06.2022).