
Sebastian Höfer

Untersuchung diffus spiegelnder Oberflächen mittels Infrarotdeflektometrie

Schriftenreihe Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung | Band 12

Sebastian Höfer

**Untersuchung diffus
spiegelnder Oberflächen
mittels Infrarotdeflektometrie**

Schriftenreihe Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung
Band 12

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer

Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme
am Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik
und Bildauswertung IOSB

Untersuchung diffus spiegelnder Oberflächen mittels Infrarotdeflektometrie

von
Sebastian Höfer

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Informatik

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Februar 2016
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer
Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2017 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1866-5934
ISBN 978-3-7315-0711-6
DOI 10.5445/KSP/1000073141

Kurzzusammenfassung

Bei der Deflektometrie handelt es sich um ein optisches Inspektionsverfahren für spiegelnde Oberflächen. Es bietet eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Neigungsänderungen der Oberfläche und erlaubt darüber hinaus einen objektiven Vergleich mit der menschlichen Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen. Da die spiegelnde Reflexion eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist, können im sichtbaren Spektrum nur ausreichend glatte (z. B. polierte, lackierte, glasierte usw.) Oberflächen untersucht werden. Diffus spiegelnde Oberflächen sind bisher von der Inspektion mittels Deflektometrie ausgeschlossen. Hier bietet sich die Inspektion mittels Infrarotdeflektometrie an. Viele technische Oberflächen, die im sichtbaren Spektrum diffus erscheinen, weisen im langwelligen, thermischen Infrarotspektrum eine spiegelnde Reflexion auf, sodass hier Deflektometrie wieder anwendbar ist. Bisher stellt sich dabei das Problem, dass es im thermischen Infrarotspektrum keine verwendbare Technologie zur Anzeige der nötigen Codemustern gibt.

Genau hier setzen die Beiträge aus dieser Arbeit an, bei denen drei verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung flächiger Codemuster im thermischen Infrarot umgesetzt wurden. Einerseits wird die Darstellung thermischer Muster mit Hilfe eines spektralen Konverters gezeigt, der die Anzeige eines herkömmlichen Monitors in ein Wärmebild umwandelt. Außerdem wird die Mustererzeugung durch die Absorption von Laserlicht demonstriert, wobei ein leistungsstarker Laser die flexible Generierung von Mustern auf einer Projektionsfläche ermöglicht. Als dritter Ansatz werden einfache lineare Muster verwendet, die in Kombination mit einem Industrieroboter zur Erzeugung flächiger Codemuster, oder zur Inspektion im Durchlauf eingesetzt werden. Bei den Ansätzen wer-

den zur Positionscodierung existierende Verfahren an die Mustererzeugung angepasst und zusätzlich neue Verfahren präsentiert.

Der Inhalt dieser Arbeit umfasst die deflektometrische Messung von Mustererzeugung bis zu Decodierung, sodass etablierte Verfahren zur Auswertung der gewonnen deflektometrischen Daten angewendet werden können. Alle vorgestellten Ansätze wurden als Versuchsaufbau umgesetzt und die Ergebnisse werden anhand realer Aufnahmen demonstriert.

Schlagworte: Infrarotdeflektometrie, Deflektometrie, Infrarot Spektrum, Automatische Sichtprüfung, diffus spiegelnde Oberflächen, thermische Muster

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	i
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele	2
1.3 Beiträge	3
1.4 Gliederung	4
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Oberflächeninspektion im thermischen Infrarot	5
2.2 Mustergeneratoren für das thermische Infrarot	7
2.2.1 Statische Muster	7
2.2.2 Dynamische Infrarotprojektoren	8
3 Grundlagen	13
3.1 Grundlagen der Deflektometrie	13
3.1.1 Verfahren zur Positionscodierung	15
3.1.2 Auswertung	18
3.2 Bilderzeugung mit Wärmestrahlung	19
3.2.1 Wärmestrahlung	19
3.2.2 Absorption, Reflexion und Transmission	21
3.2.3 Emission	22
3.2.4 Ansätze zur Mustererzeugung	23
3.3 Reflektanz diffuser Oberflächen	25
3.4 Wärmebildkameratechnik	29
3.4.1 Sensortechnologien	30

3.4.2 Anmerkungen zur verwendeten Kamera	32
4 Spektraler Konverter als Mustergenerator	35
4.1 Aufbau des Konverters	36
4.1.1 Prototyp als Platine	36
4.1.2 Widerstände als thermische Strahler	37
4.1.3 Heizelemente mit photosensitivem Konverter	43
4.1.4 Ansteuerung des Mustergenerators	45
4.2 Ergebnisse	47
4.2.1 Positionscodierung am Widerstandsarray	49
4.2.2 Thermisches Verhalten des Mustergenerators	51
4.3 Ausblick	55
4.3.1 Kühlung des Konverters	55
4.3.2 Ansteuerung der Heizelemente	56
4.3.3 Design der Heizelemente	59
4.4 Zusammenfassung	61
5 Dynamische Mustererzeugung mittels Laserlicht	63
5.1 Versuchsaufbau	64
5.1.1 Laser und Steuerung	64
5.1.2 Kamera	66
5.1.3 Arbeitsfläche des Lasers	69
5.1.4 Mustererzeugung mit dem Laser	70
5.1.5 Einschränkungen durch den Aufbau	70
5.2 Registrierung durch Synchronisation	73
5.2.1 Verknüpfen von Bildindex und Laserposition	73
5.2.2 Registrierung von Sensorpixeln zu Musterposition	74
5.2.3 Ergebnisse der Registrierung durch Synchronisation	75
5.3 Positionscodierung über das thermische Profil	77
5.3.1 Modell für das thermische Muster	77
5.3.2 Positionsbestimmung im Einzelbild	82
5.3.3 Ergebnisse und Bewertung	86
5.4 Positionscodierung mittels Phasenschiebeverfahren	93
5.4.1 Grundlagen der Phasenschiebecodierung	93
5.4.2 Anpassung der Musterparameter	95
5.4.3 Phasenschiebecodierung mit dem thermischen Muster	96
5.4.4 Phasenentfaltung der Decodierung	99
5.4.5 Bewertung der Ergebnisse zur Phasenschiebecodierung	103

5.5 Ergebnisse	110
5.5.1 Untersuchungen am Beispiel	110
5.5.2 Vergleich der Verfahren	116
5.6 Ausblick	119
5.6.1 Ansätze für weitere Codierverfahren	119
5.6.2 Anpassungen des Aufbaus	123
5.7 Zusammenfassung	127
6 Statische Muster bei linearer Bewegung	129
6.1 Versuchsaufbau	130
6.1.1 Draht als Mustererzeuger	130
6.1.2 Kamera	132
6.1.3 Aktorik des Aufbaus	134
6.2 Positionscodierung aus der Bewegung	137
6.2.1 Relativbewegung des Musters	138
6.2.2 Relativbewegung des Prüfobjekts	140
6.3 Auswertung der Muster	148
6.3.1 Position durch Ermittlung des Schwerpunktes	148
6.3.2 Auswertung mittels Krümmungstensor	150
6.4 Ergebnisse	159
6.4.1 Prüfteil aus Rohblech	159
6.4.2 Vergleich der Auflösung	161
6.4.3 Untersuchung großflächiger Prüfteile	164
6.4.4 Bewertung der Verfahren	170
6.5 Ausblick	171
6.5.1 Mustererzeugung	171
6.5.2 Auswertung der Muster	173
6.5.3 Interaktive Inspektion	175
6.6 Zusammenfassung	176
7 Zusammenfassung und Ausblick	179
Symbolverzeichnis	183
Literaturverzeichnis	189

1

Einleitung

1.1 Motivation

Bei der Deflektometrie handelt es sich um ein optisches Inspektionsverfahren für spiegelnde Oberflächen. Es bietet eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Neigungsänderungen der Oberfläche und erlaubt darüber hinaus einen objektiven Vergleich mit der menschlichen Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen. Ein Deflektometriesensor besteht grundsätzlich aus einer Kamera und einem Mustergenerator, in der Regel einem Monitor, wobei die Kamera über die zu inspizierende Oberfläche die Reflexion des Monitors beobachtet (siehe Abbildung 1.1). Der Monitor zeigt eine Abfolge von Codemustern an, die eine Registrierung zwischen Monitor- und Kamerapixeln ermöglicht, was die Grundlage für weitere Auswertungen ist. Durch die Notwendigkeit einer spiegelnden Reflexion ist das Verfahren im sichtbaren Spektrum bisher auf ausreichend glatte (z. B. polierte, lackierte, glasierte usw.) Oberflächen beschränkt und erlaubt keine Inspektion rauer, diffus spiegelnder Oberflächen.

Hier soll diese Arbeit ansetzen, indem das Inspektionsverfahren der Deflektometrie auf eben solchen diffus reflektierenden Oberflächen angewendet werden soll. Dazu wird sich zu Nutze gemacht, dass mit steigender Wellenlänge des reflektierten Lichts auch der Anteil der spiegelnden Reflexion an solchen Oberflächen zunimmt.



Abbildung 1.1: Beispiel einer deflektometrischen Messung. Die Kamera beobachtet die Reflexion des strukturierten Musters im Hintergrund auf der zu untersuchenden Oberfläche.

1.2 Ziele

Ziel dieser Arbeit ist es, die Deflektometrie als optisches Inspektionsverfahren ins thermische Infrarotspektrum zu übertragen. Viele technische Oberflächen, die im sichtbaren Spektrum diffus erscheinen, weisen im langwelligen, thermischen Infrarotspektrum eine spiegelnde Reflexion auf, sodass hier Deflektometrie wieder anwendbar ist. Während Kameras für dieses Spektrum verfügbar sind, besteht die Herausforderung darin, den für einen deflektometrischen Sensor benötigten Mustergenerator zu konzipieren und die verwendeten Verfahren zur Positionscodierung entsprechend den Gegebenheiten des Aufbaus und des thermischen Infrarotspektrums anzupassen.

Letztendlich soll gezeigt werden, dass durch die hier entwickelten Verfahren die deflektometrische Oberflächeninspektion einer Reihe von Materialien ermöglicht wird, die der Deflektometrie im sichtbaren Spektrum bisher unzugänglich waren. Dabei sollen sich die bereits existierenden Verfahren zur Auswertung deflektometrischer Messungen auf die hier gewonnen Messdaten anwenden lassen.

1.3 Beiträge

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Ansätze zur Erzeugung der notwendigen thermischen Codemuster entwickelt, praktisch umgesetzt und entsprechende Verfahren zur Auswertung der Bildfolgen und Realisierung der notwendigen Positionscodierung erarbeitet.

Spektraler Konverter

Ein spektraler Konverter, welcher das Bild eines herkömmlichen Monitors in ein gröber aufgelöstes Wärmebild umwandelt, wurde im ersten Ansatz realisiert. Vor einem Monitor angebracht, werden einzelne resistive Heizelemente über die Helligkeit des Monitors angesteuert. Mit diesem Konverter kann ein herkömmlicher Deflektometriesensor auf einfache Weise umgerüstet und bestehende Codierv Verfahren verwendet werden. Die verschiedenen Kriterien zum Aufbau eines solchen Konverters werden diskutiert und die Umsetzung dieses Konzepts für die Anwendung in der Deflektometrie anhand eines Prototypen demonstriert.

Absorption von Laserstrahlung

Die Absorption von Laserstrahlung wird im zweiten Ansatz dazu verwendet, großflächige Codemuster auf einer Projektionsfläche zu erzeugen. Ein Codemuster wird mit einem leistungsstarken Laser auf eine Projektionsfläche thermisch eingebracht. Es werden drei Strategien zur Auswertung dieser Muster vorgestellt, die eine Positionscodierung als Grundlage einer deflektometrischen Messung realisieren. Die Verfahren werden mit einem Laboraufbau anhand von Messungen an Prüfteilen demonstriert und die Fehlerquellen beim Einsatz als Messverfahren werden dargelegt.

Scannende lineare Muster

Im dritten Ansatz werden scannende lineare Muster zur Realisierung einer Positionscodierung benutzt. Einerseits werden mehrere Möglichkeiten vorgestellt diese Muster robotergeführt zu benutzen, um flächige Codemuster zu erzeugen. Darüber hinaus kann dieser Ansatz als scannender Sensor umgesetzt werden, indem die Relativbewegung von Kamera und Muster gegenüber der zu untersuchenden Oberfläche ausgenutzt wird. Dies ermöglicht zwar nur eine

vereinfachte Codierung der Position, dafür kann die Messung jedoch quasi endlos erfolgen, ohne durch die Größe eines Mustergenerators eingeschränkt zu sein. Hier wird für die Auswertung ein neuartiges Verfahren für die Positionscodierung vorgestellt, das eine subpixelgenaue Registrierung der Musterposition umsetzt. Die vorgestellten Verfahren wurden im Labor mit einem Roboter realisiert und anhand von Aufnahmen an praxisnahen Prüfteilen evaluiert.

1.4 Gliederung

Nach der Einführung in diesem Kapitel, beginnt Kapitel 2 mit einem Überblick zum Stand der Technik und Forschung im Bereich der thermischen Infrarotdeflektometrie und der Erzeugung thermischer Muster im Allgemeinen. Kapitel 3 bietet eine Einführung in die nötigen Grundlagen zum Verständnis der in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren. Dazu gehören die Grundlagen der Deflektometrie, der Reflektanz an Oberflächen und der Wärmebildkameratechnik. In den folgenden Kapiteln werden drei Verfahren vorgestellt, die auf unterschiedliche Weise eine deflektometrische Inspektion im thermischen Infrarot realisieren. Kapitel 4 beschreibt den Aufbau eines Mustergenerators, der mittels eines Rasters von Heizelementen einen thermischen Bildschirm realisiert. In Kapitel 5 wird ein Verfahren beschrieben, das mittels eines Lasers die notwendigen thermischen Codemuster für die Infrarotdeflektometrie erzeugt. In Kapitel 6 werden Verfahren vorgestellt, die mit eindimensionalen, robotergeführten Mustern die Codierung realisieren. Schließlich wird in Kapitel 7 eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen in diesem Gebiet gegeben.

2

Stand der Forschung und Technik

Deflektometrie im thermischen IR (Infrarot) wurde bisher in der Literatur nur in kleinem Umfang getestet, beziehungsweise nur theoretisch diskutiert. Im Folgenden werden diese ersten Ansätze zur IR-Deflektometrie vorgestellt. Darüber hinaus wird auch auf verwandte Verfahren eingegangen, die zur Überprüfung der Oberflächengeometrie die Eigenschaften des thermischen IR-Spektrums ausnutzen. Abschließend wird der Stand der Technik zur Generierung statischer und dynamischer IR-Muster vorgestellt.

2.1 Oberflächeninspektion im thermischen Infrarot

Deflektometrie

Die erste Erwähnung des thermischen IR-Spektrums im Zusammenhang mit der Deflektometrie findet sich in [SKH04], wo ein generischer Deflektometrieaufbau beschrieben wird, bei dem der Mustergenerator auch als IR-Quelle ausgeführt sein kann. Die gleichen Autoren zeigen auch die konkrete Anwendung auf rohen Karosserieblechen mittels eines linear bewegten Wärmemusters [HK05; Hor07].

Gleichzeitig wird auch in dem japanischen Patent [Mas+04] ein Inspektionsverfahren vorgestellt, bei dem Rohstahlbleche auf Unebenheiten hin untersucht werden, indem auf der Oberfläche die Reflexion einer linearen IR-Lichtquelle beobachtet wird. In dem Patent [Lam07] wird ein ähnlicher Ansatz zur Inspektion vorgestellt, wobei hier die Anwendung die Inspektion transparenter Oberflächen mittels Deflektometrie ist.

Eine praktische Untersuchung der Reflektanz von Metalloberflächen im IR-Spektrum wird in [Sár+10a] durchgeführt und ergänzend die Anwendbarkeit zur deflektometrischen Inspektion untersucht [Sár+10b; Sár+10c].

In [Su+11; Su14] wird ein auf die Inspektion von Teleskopspiegeln spezialisierter Ansatz vorgestellt, der zum ersten Mal eine vollständige, deflektometrische Messung im thermischen IR ermöglicht. Hier wird als Mustergenerator im thermischen IR ein mechanisch bewegter Draht benutzt. Der Aufbau ermöglicht in der beschriebenen Konfiguration jedoch nur die Inspektion von konkaven Spiegeln.

Der Einfluss der wellenlängenabhängigen Reflektanz der Oberfläche auf die Deflektometrische Messung wird neben [HK05; Hor07] auch in [Wer11] und [Fab12] diskutiert.

Strukturierte Beleuchtung

Neben der deflektometrischen Inspektion lassen sich auch verwandte Verfahren wie die strukturierte Beleuchtung in das IR-Spektrum übertragen, um die vom sichtbaren Spektrum abweichenden optischen Eigenschaften auszunutzen. Dabei setzen die Verfahren zur strukturierten Beleuchtung im thermischen IR darauf, dass die emittierte Wärmestrahlung in der Regel isotrop abgestrahlt wird und damit einem *Lambert'schen Strahler* entspricht. Das Codemuster entsteht hierbei durch die Erwärmung der Oberfläche und nicht durch Reflexion infraroter Strahlung. Mit diesem Ansatz werden in [Baj+12] spiegelnde und diffuse Metalloberflächen vermessen. Wenn auch der niedrige Emissionsgrad von Metall hier für eine geringe Effizienz sorgt, wird die prinzipielle Anwendbarkeit auf Metalloberflächen gezeigt. Das gleiche Konzept wird in [Ere+09] bei der Anwendung auf Glasoberflächen verwendet, wobei hier wiederum ausgenutzt wird, dass Glas im thermischen IR-Spektrum opak erscheint und somit Mehrfachreflexe durch die Transparenz vermieden werden. Eine Umsetzung

des Konzepts als Produkt bietet die Firma *Aimess* als Streifenprojektionssystem [WT13] an, bei dem mit einem CO₂-Laser die zu vermessende Oberfläche erwärmt wird und dadurch die Vermessung matter und transparenter Oberflächen ermöglicht wird.

2.2 Mustergeneratoren für das thermische Infrarot

Obwohl sich nur wenige Arbeiten mit der Deflektometrie im thermischen IR beschäftigt haben, gibt es einige Arbeiten, die sich mit dem grundlegenden Problem der Mustererzeugung im IR-Spektrum beschäftigen. Allerdings liegt hier meist der Fokus darauf Testumgebungen für IR-Sensoren zu schaffen.

2.2.1 Statische Muster

Der erste dokumentierte Ansatz zur Erzeugung von Mustern im thermischen IR waren statische Muster. Die Realisierung einer Positionscodierung, wie sie für die Deflektometrie im Allgemeinen notwendig ist, erfordert dabei jedoch zusätzlich eine mechanische Bewegung des Musters, wie es auch in [HK05; Su+11; Höf+11] umgesetzt wurde. In [Sár+10c] wurde auch bereits die Auswertung unbewegter, statischer Muster für die Infrarotdeflektometrie untersucht.

Auch der in Kapitel 6 vorgestellte Ansatz fällt in die Kategorie der statischen Muster in Kombination mit einem mechanischen Aktor.

Variabler Emissions- und Transmissionsgrad

Durch die räumliche Variation des Emissions- oder Transmissionsgrades lassen sich einfach statische Muster erzeugen (siehe Kapitel 3.2). Da eine graduelle Abstufung der optischen Eigenschaften vergleichsweise aufwendig zu realisieren ist, nutzt man hier meist Halbton-Druckverfahren, um scheinbar unterschiedliche Intensitätswerte zu erzeugen. Zur Mustererzeugung in der Transmission werden im IR transparente Materialien, wie beispielsweise Polyethylen, mit dem Negativ bedruckt und rückseitig mit einer IR-Lichtquelle beleuchtet [Wil98]. Alternativ können die Muster auch in dünne Metallplatten geätzt werden, die

wiederum als positive Maske vor einer IR-Lichtquelle dient [Gio76; Vro76]. Da die meisten Metalle die Eigenschaft haben, dass sie nahezu keine Strahlung im IR emittieren, kann man sie auch dazu benutzen, Muster mit wechselndem Emmissionsgrad zu erstellen, beispielsweise durch Bedrucken der Metalloberfläche [WW83]. Wird das Metall erwärmt, zeigt sich das Muster durch den höheren Emissionsgrad der bedruckten Stellen als Positivbild.

Diffraktive optische Elemente

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung statischer IR-Muster sind sogenannte diffraktive optische Elemente (DOE) [Gro05; STG05], die aus lithografischen Mikrostrukturen aufgebaut sind. Mit ihnen lässt sich ein Laserstrahl gezielt formen [Hüg09] oder ein Strahl in mehrere zerlegen. Gängige Anwendungen für DOEs sind Aufsätze für Laserpointer, mit denen sich mit einem Laser gleich ganze Raster, oder Logos projizieren lassen. Mit einem einzelnen IR-Laser ließe sich so ein zweidimensionales Muster auf eine Projektionsfläche anzeigen, oder eine absorbierende Fläche erwärmen. In der Literatur wird kein System genannt, dass ein solches Konzept zur Erzeugung großflächiger Muster umsetzt, es ist jedoch naheliegend, dass es das zugrundeliegende Verfahren des Streifenprojektionssystems aus [WT13] ist.

2.2.2 Dynamische Infrarotprojektoren

Am weitesten fortgeschritten ist die Technologie zur Erzeugung dynamischer thermischer Muster auf dem Gebiet der Projektoren zur Simulation von Infrarotszenen (IRSP, engl.: *IR scene projection*). Schon seit 1970 wird hier die Entwicklung vorwiegend von militärischen Anwendungen vorangetrieben [Wil98; BS07]. Haupteinsatzgebiet ist hierbei der Aufbau von Testumgebungen für Wärmebildgeräte und zielsuchende Waffen im thermischen Infrarot, sodass solche Geräte unter Laborbedingungen getestet werden können. Die Anforderung an eine IRSP ist, eine Simulationsumgebung zu schaffen, die den zu testenden Geräten, bezüglich ihrer radiometrischen Eigenschaften und der lateralen und zeitlichen Auflösung der gelieferten Bilder, eine reale Szene vortäuscht.

Von den Anschaffungskosten solcher Systeme einmal abgesehen, eignen sich IRSP-Systeme im Allgemeinen nicht für die Anwendung in der Deflektometrie. Da solche Systeme für den Einsatz in Testständen konzipiert sind, wird der

IR-Projektor mittels einer kollimierenden Optik an die zu testende IR-Sensorik gekoppelt. Flächige Mustergeneratoren sind bei den eingesetzten Systemen nur wenige Quadratzentimeter groß und projizierende Systeme arbeiten aufgrund der direkten Kopplung nur mit sehr niedriger Intensität. Die Arbeitsweise eines Deflektometriesensors, wie er in Kapitel 3.1 vorgestellt wird, setzt jedoch eine flächige Musteranzeige in der Größenordnung eines Monitors oder größer voraus.

Im Folgenden wird nur auf die Ansätze eingegangen, die so oder in abgewandelter Form für den Einsatz in einem Deflektometriesystem in Frage kommen. Die Nachfrage nach leistungsfähiger IRSP für militärische Testsysteme förderte die Entwicklung unterschiedlichster Ansätze, von denen viele getestet und wieder verworfen wurden. Für einen vollständigen Überblick über Entwicklungen in diesem Bereich empfiehlt sich die Zusammenfassung in [Wil98].

Spektrale Konverter

Zu den ersten Ansätzen dynamischer IRSP zählen Systeme, die ein Bildsignal aus dem sichtbaren Spektrum in das thermische IR umwandelt. Vorreiter war hier die sogenannte Bly Zelle [Bly82], die aus einem dünnen Polymersubstrat besteht, das einseitig schwarz beschichtet wurde. Das Substrat wird in einer Vakuumkammer zwischen zwei Sichtfenstern gelagert, die für Licht des sichtbaren und IR-Spektrums transparent sind. Das sichtbare Bild wird auf die beschichtete Seite des Substrats projiziert, das sich durch Absorption lokal erwärmt und rückseitig als Wärmebild zeigt. Problematisch ist bei diesem Ansatz die benötigte Lichtleistung, um ein hinreichend leuchtstarkes Wärmebild zu erzeugen. Dadurch ist die maximal darstellbare Temperatur und der Dynamikumfang des Bildes vorwiegend durch die verfügbare Projektortechnik begrenzt.

Eine Erweiterung dieses Ansatzes findet sich als Patent [MJ89], bei dem eine photosensitive Schicht auf das Substrat aufgebracht wird, das zwischen zwei Schichten mit einem elektrischen Potentialdifferenz liegt. Wird auf diese Schicht ein Bild projiziert, werden die beleuchteten Stellen leitend und der Stromfluss führt zu einer lokalen Erwärmung. In der Literatur findet sich jedoch kein Hinweis auf eine tatsächliche Umsetzung eines solchen Konverters.

Während die beiden zuvor beschriebenen Ansätze für den Einsatz in einem IRSP konzipiert sind und damit nur eine sehr kleine Anzeigefläche bieten, wird in [BHW09] ein *spektraler Konverter* beschrieben. Dieser soll das Bild eines

herkömmlichen Anzeigegerätes, beispielsweise eines Monitors, in das thermische IR-Spektrum konvertieren und so eine großflächige IR-Musteranzeige ermöglichen. Ein solcher Ansatz wird in Kapitel 4.1.3 verfolgt.

Mikrowiderstandarrays

Die derzeit verbreitetste Technologie in IRSP-Systemen sind Mikrowiderstandarrays. Dabei wird die IR-Strahlung durch die elektrische Verlustleistung an einzelnen Widerständen erzeugt, die als Matrix angeordnet sind. Um die nötige Heiz- und Kühlleistung möglichst gering zu halten, werden solche Arrays in Chipgröße mit lithografischen Verfahren gefertigt.

Erste Vertreter dieser Technologie waren Arrays aus Dünnschichtwiderständen, bei denen der Widerstand als dünner Film auf einen Isolator aufgebracht wurde [Har87]. Wenngleich solche Systeme IR-Bilder mit hoher Bildrate wiedergeben konnten, litten sie jedoch an Ausfällen durch thermischen Stress und geringer Effizienz [Wil92b]. Die nächste Generation von Mikrowiderstandarrays nutzte Widerstandsbrücken, bei denen die Widerstände nur an zwei Enden gelagert wurden und damit thermisch besser isoliert waren [Dae87]. Solche Arrays lieferten deutlich bessere Ergebnisse, ermöglichten jedoch nur eine geringe Füllichte der Elemente auf dem Chip. Aktuelle Systeme nutzen Arrays aus freistehenden Mikromembranen [Wil05]. Jeder Widerstand des Arrays sitzt unter einer dünnen Membran und ist nur mit zwei feinen Kontakten mit dem Trägersubstrat verbunden. Der Aufbau entspricht dem der Mikrobolometersensoren für Wärmebildkameras, nur dass hier der Widerstand eines Pixels nicht zum Messen, sondern zum Heizen verwendet wird [BSJ06]. Durch den mikromechanischen Aufbau wird eine hohe Füllichte und eine gute thermische Isolierung ermöglicht, wobei Frameraten bis 200Hz bei HDTV (engl.: *high definition television*) Auflösung erreicht werden [BS07; Spa+08].

Mikrospiegelprojektoren

Projektoren auf Basis von Mikrospiegel-Modulatoren (*DMD, engl.: digital mirror device*) [Hor90; Hor98] sind eine etablierte Technologie für Projektoren im sichtbaren Spektrum. Sie basieren auf einem mikromechanischen Array von Spiegeln, mit dem für jedes Pixel der Strahlenverlauf zwischen zwei Positionen umgeschaltet werden kann. Dies geschieht mit einer Frequenz von mehreren

Kilohertz, sodass über zeitliche Modulation unterschiedliche mittlere Intensitätswerte generiert werden können. DMDs werden erfolgreich für die IRSP vor allem im MWIR (engl.: *mid wave infrared*) Spektrum eingesetzt [Bea+01; Ren+09].

Der Einsatz von DMDs im Infrarot ist jedoch mit einigen Einschränkungen verbunden, sodass dieser Ansatz im Rahmen dieser Arbeit nicht verfolgt wurde. Zum einen ist das Schutzglas, das die Mikromechanik des Chips schützt, nur für Wellenlängen bis in das nahe Infrarot (SWIR, engl.: *short wave infrared*) Spektrum durchlässig, sodass für Anwendungen im MWIR und LWIR (engl.: *long wave infrared*) Spektrum dieses Glas ausgetauscht werden muss [Bea+01; Ins12]. Darüber hinaus entstehen Beugungseffekte an den Mikrostrukturen des DMDs, da die Strukturgröße der Mikrospiegel nahe der Wellenlänge des IR-Spektrums liegt [Ins08]. Dies führt zu einem Kontrastverlust mit steigender Wellenlänge. Neuartige DMDs auf Basis von schaltbaren, diffraktiven Gittern könnten hier für die Anwendung im IR besser geeignet sein [BK04].

Laserprojektoren

Verglichen mit den zuvor vorgestellten IRSP Technologien, bei denen die IR-Strahlung durch die Emission an einer Wärmequelle erzeugt wird, werden bei Laserprojektoren Laserlichtquellen für das MWIR- oder LWIR-Spektrum eingesetzt. Mittels akustooptischer Modulatoren und Spiegelscannern wird so aus dem Laserstrahl ein Bild generiert [Kir94]. Dabei können auch mehrere Laser unterschiedlicher Wellenlänge kombiniert werden [BS98]. Der Einsatz von Lasern erfordert eine vorsichtige Dosierung der Strahlintensität, um die zu testende IR-Sensorik nicht zu beschädigen. IRSP auf Basis von Laserprojektoren wurde nur in einzelnen Prototypen umgesetzt [Wil98; BS07], haben jedoch keine weite Verbreitung gefunden.

In dieser Arbeit wird in Kapitel 5 ein Ansatz vorgestellt, bei dem ein scannender Laser ein thermisches Muster generiert. Im Gegensatz zu den laserbasierten IRSP wird die Laserstrahlung dabei jedoch nur indirekt zur Mustererzeugung verwendet.

3

Grundlagen

Dieses Kapitel liefert die Grundlagen zum Verständnis der in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren. Neben der Deflektometrie als Messverfahren, werden die Eigenschaften des infraroten Lichtspektrums und die damit verbundenen Vorteile für die Inspektion diffuser Oberflächen erläutert.

3.1 Grundlagen der Deflektometrie

Der Aufbau eines deflektometrischen Sensor besteht grundsätzlich aus drei Komponenten: einem Anzeigegerät zur Darstellung strukturierter Muster, dem Prüfobjekt und einer Kamera. Dabei beobachtet die Kamera die Reflexion der strukturierten Muster auf der Oberfläche des Prüfobjekts. Dieses Prinzip der Oberflächeninspektion basiert auf dem gleichen Effekt, den auch ein Mensch sich bei der Betrachtung spiegelnder Oberflächen zu Nutze macht: Anstatt die Oberfläche direkt zu betrachten, nutzt er die Reflexion von Strukturen in der Umgebung, um durch Verzerrungen im Spiegelbild auf die Form der Oberfläche zu schließen. Die Deflektometrie ist die Umsetzung dieses Prinzips in einem Messverfahren. Gemessen wird hierbei die Oberflächenneigung anhand der Verschiebung der beobachteten Musterkoordinaten. Abbildung 3.1 veranschaulicht die Messung für den Sichtstrahl eines einzelnen Pixels (x, y) der Kamera. Der erste Schritt einer deflektometrischen Messung ist, für jedes Pixel

die korrespondierende Musterkoordinate (u, v) zu ermitteln. Dazu werden in der Deflektometrie Codemustersequenzen eingesetzt, auf die in Kapitel 3.1.1 tiefer eingegangen wird. Danach bieten sich eine Reihe von Verfahren zur weiteren Auswertung an, die von einer einfachen Detektion von Defekten bis hin zur vollständigen Rekonstruktion der Oberfläche reichen (siehe Abbildung 3.2). Kapitel 3.1.2 gibt hierzu einen Überblick.

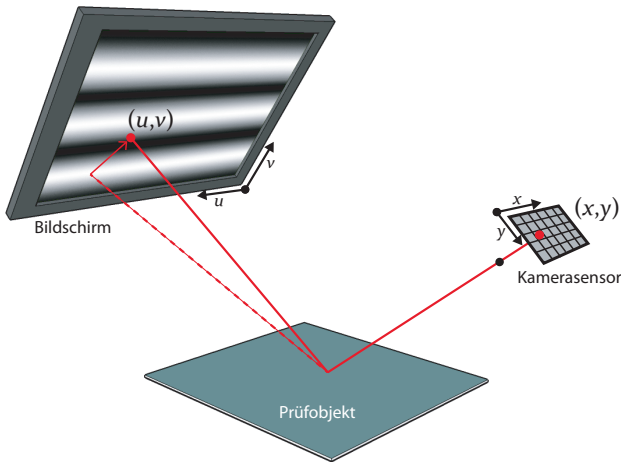


Abbildung 3.1: Aufbau eines deflektometrischen Sensors mit einem Sichtstrahl als Beispiel. Änderungen der Oberflächenneigung äußern sich in einer Verschiebung des Sichtstrahls auf der Bildschirmfläche. Die Anzeige von Mustern zur Positionscodierung ermöglicht eine Zuordnung von Kamerapixeln (x, y) zu Musterkoordinaten (u, v) .

Für die Deflektometrie im sichtbaren Spektrum kann der Aufbau des Sensors mit Standardkomponenten realisiert werden. Neben Industriekameras kommen dafür herkömmliche Monitore oder Projektoren zum Einsatz, die einen einfachen Weg bieten, um flächige Muster anzuzeigen. Bei der Infrarotdeflektometrie sind solche Standardkomponenten jedoch nicht verfügbar. Während mit Wärmebildkameras ein Ersatz für die Kamera des deflektometrischen Aufbaus erhältlich ist, gibt es im thermischen Infrarotspektrum keine verwendbare Technologie zur Anzeige von Mustern. Genau hier setzen die Beiträge aus dieser Arbeit an. Einerseits werden verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung flächiger Codemuster im thermischen Infrarot entwickelt. Da manche dieser Mustererzeuger keine Darstellung in Form einzelner Pixeln bieten, werden zur Positionscodierung entweder existierende Verfahren an die Mustererzeu-

gung angepasst oder neue Verfahren präsentiert. In Bezug auf Abbildung 3.2 umfasst der Inhalt dieser Arbeit den Ablauf von Mustererzeugung bis zu Decodierung, sodass etablierte Verfahren zur Auswertung (siehe Kapitel 3.1.2) auf die gewonnenen Daten angewendet werden können.

3.1.1 Verfahren zur Positionscodierung

Grundlage einer deflektometrischen Aufnahme ist die Registrierung von Kamerapixeln (x, y) zu Musterkoordinaten (u, v) auf der Anzeigefläche. Dazu wird eine Zuordnung $D_{u,v}$ gesucht, die jedem Pixel eine entsprechende Position in absoluten Koordinaten zuweist:

$$D_{u,v} : (x, y) \mapsto (u, v). \quad (3.1)$$

In einem ersten Schritt wird auch häufig zunächst eine relative Musterposition (\tilde{u}, \tilde{v}) ermittelt, die vom verwendeten Anzeigegerät und Codiervorgang abhängig ist:

$$D_{\tilde{u},\tilde{v}} : (x, y) \mapsto (\tilde{u}, \tilde{v}), \quad (3.2)$$

beispielsweise Pixelkoordinaten auf einem LCD-Monitor.

Der Anspruch an ein Codiervorgang ist hierbei, dass die gesuchte Registrierung $D_{u,v}$, beziehungsweise $D_{\tilde{u},\tilde{v}}$, eindeutig aus einer Reihe von Kamerabildern $I(x, y, n)$ bestimmbar ist. Hierbei ist n der Index für ein Einzelbild aus der Sequenz. Die Kamerabilder geben die in der Reflexion beobachteten Codemuster wieder. Dabei soll die Fläche als Ganzes, mit so wenig Aufnahmen wie möglich codiert werden. Generell kommen hierzu alle Verfahren in Frage, die auf Basis von direkter, räumlicher, oder zeitlicher Codierung eine Lokalisierung auf der Anzeigefläche ermöglichen [SPB04]. In einem deflektometrischen Aufbau muss jedoch beachtet werden, dass die zu untersuchende Oberfläche unbekannter Geometrie, Teil des optischen Systems ist, sodass strukturierte Muster eine nicht vorhersehbare Verzerrung erfahren. Daher sind hier räumliche Codemuster ungeeignet. Ebenso ungeeignet sind direkte Codiervorgänge, welche die Position durch Grauwerte oder Farben codieren, da man davon ausgehen muss, dass die Reflektanzeigenschaften des Prüfobjekts unbekannt sind. Für eine Anwendung in der Deflektometrie sind *Zeitmultiplexverfahren* am besten geeignet, also Verfahren die eine zeitlich nacheinander angezeigte Serie von

Codemustern verwenden. Hierzu kommen meist Positionscodierverfahren auf Basis von Streifencodesequenzen zum Einsatz.

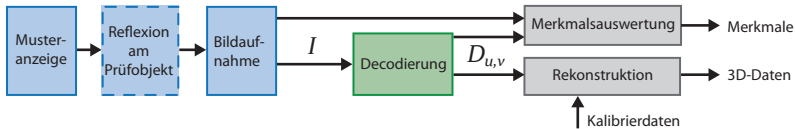


Abbildung 3.2: Ablauf einer deflektometrischen Messung und Auswertung. Die Reflexion der angezeigten Muster wird von der Kamera aufgenommen. Die Positionsdecodierung liefert aus den Bilddaten I die Registrierung $D_{u,v}$ von Kamerapixeln zu Musterkoordinaten. Eine anschließende Merkmalsextraktion kann zur Defektdetektion eingesetzt werden oder eine Rekonstruktion kann die 3D-Geometrie der Oberfläche liefern.

Binäre Codiervverfahren

Bei den ersten Verfahren der heutigen Deflektometrie kamen binäre Codiervverfahren zum Einsatz, bei denen mittels sogenannter »Rasterreflexion« spiegelnde Oberflächen vermessen wurden [BP97; Pér01; Pet06]. Dabei wird zur Codierung der Positionen auf der Anzeigefläche eine Streifencodesequenz angezeigt, die jedem Punkt eine eindeutige Bitsequenz zuordnet. Streifencodes ermöglichen hierbei gleich ganze Zeilen zu codieren, sodass sich mit jeweils einer Sequenz in horizontaler und vertikaler Ausrichtung die Anzeigefläche vollständig codieren lässt. Als Codierung haben sich dabei dazu *Graycodes* durchgesetzt [Gra53], die sich zuvor auch schon bei den Rasterprojektionsverfahren bewährt haben [Wah84]. Benachbarte Codes in einer Graycode-Sequenz haben immer einen *Hamming-Abstand* von eins, sodass sie sich jeweils nur in einem Bit unterscheiden. Dadurch werden die Auswirkungen von Fehlzuweisungen gering gehalten. Darüber hinaus enthalten die dabei verwendeten Muster verglichen mit anderen Binärcodes weniger hochfrequente Anteile, was sie bei einer Abbildung über ein optisches System robuster macht [Kam04].

Für binäre Codes ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl von Codebildern q und der Anzahl der damit codierbaren Positionen N gegeben durch:

$$N = 2^q. \quad (3.3)$$

Jedoch kann die Ortsauflösung nur so lange erhöht werden, wie die Ortsfrequenz des Streifenmusters aufgelöst werden kann. Idealer Weise müsste dazu

die Kamera auf die Anzeigefläche fokussiert werden, wobei die höchste Winkelauflösung für die Oberflächenneigung erzielt wird, jedoch die zu untersuchende Oberfläche nur mit geringer lateraler Auflösung erfasst werden kann. Eine Fokussierung auf die Oberfläche hingegen erzielt eine hohe laterale Auflösung, allerdings bei einer unscharfen Abbildung der Musteranzeige, was sich vor allem bei einer binären Positionscodierung ungünstig auswirkt. Dennoch bieten sich binäre Codiervverfahren an, wenn nur binäre Intensitätswerte angezeigt werden können. In Kapitel 4.2.1 darauf aufbauend ein Verfahren vorgestellt.

Phasenschiebungsverfahren

Das in der Deflektometrie aktuell vorherrschende Verfahren zur Positionscodierung sind Phasenschiebungsverfahren. Sie verwenden periodische Streifenmuster die schrittweise verschoben werden, wobei zur Ermittlung der Position die Phaseninformation des Signals ausgewertet wird. Erste Arbeiten zeigten, dass vor allem Muster mit sinusförmigen Intensitätsverlauf entscheidende Vorteile für die Anwendung in der Deflektometrie haben [Pér01; Kam04; PT04]. Die typischerweise unscharfe Abbildung des Codemusters bei der Deflektometrie führt bei Sinusmustern lediglich zu einer Reduzierung der Amplitude des Signals [Hor07]. Die unscharfe Abbildung ist hier sogar vorteilhaft, da dadurch die Darstellung auf einem Anzeigegerät mit diskreten Pixeln und Intensitätswerten geglättet wird. Dies ermöglicht eine subpixelgenaue Codierung der Musterpositionen.

Durch die Periodizität der Sinusmuster ist auch die daraus gewonnene Phaseninformation periodisch in dem Intervall $(-\pi, \pi)$ und liefert die Position relativ zur verwendeten Periodenlänge des Sinusmusters. Um diese Mehrdeutigkeit aufzulösen, ist zusätzlich noch eine *Phasenentfaltung* notwendig. Eine Möglichkeit dafür sind sogenannte *Flood-Fill-Verfahren* (siehe Kapitel 5.4.4), die jedoch nur eine relative Position rekonstruieren können. Gängig sind in der Deflektometrie Verfahren, die mit zwei Aufnahmesequenzen unterschiedlicher Wellenlänge eine Phasenentfaltung realisieren, indem aus den beiden periodischen Phasensignalen mit Hilfe des *chinesischen Restesatzes* [Kam04] die absolute Position rekonstruiert wird.

Darüber hinaus benötigt die Phasenschiebecodierung gegenüber binären Codiervverfahren weniger Codemuster. In [Kna06; Fab12] wird dies auf eine effizientere Ausnutzung des Informationskanals von Monitor zu Kamera, durch die zusätzliche Ausnutzung von Grauwerten zurückgeführt. Während bei binären Verfahren nach (3.3) mit zunehmender Auflösung mehr Codemuster notwendig

sind, ergibt sich bei Phasenschiebungsverfahren die mögliche Auflösung aus der Periodenlänge der Sinusmuster und dem erzielbaren Kontrast. In der Deflektometrie werden üblicherweise vier Aufnahmen eines phasenverschobenen Sinusmusters zur Codierung einer Richtung verwendet und nochmal weitere vier Aufnahmen für die Phasentfaltung der Position. Eine vollständige Codierung in horizontaler und vertikaler Richtung erfordert also insgesamt 16 Aufnahmen. Die ideale Parametrierung von Phasenschiebungsverfahren hinsichtlich der optimalen Periodenlänge der Muster und der Anzahl von Phasenschüben wurde in [Kam04] und [Kna06] tiefgehend untersucht. In dieser Arbeit wird auf die Phasenschiebecodierung und die Entfaltung des Phasensignals in Kapitel 5.4 noch detaillierter eingegangen.

3.1.2 Auswertung

Durch direkte Auswertung der aufgenommenen Bilder lässt sich bereits anhand von Verzerrungen im regelmäßigen Muster auf Oberflächendefekte schließen [Pér01]. Weitergehend lassen sich auch die decodierten Registrierungsdaten auswerten, sodass sich Welligkeiten und Defekte in den rohen Neigungsdaten detektieren und bewerten lassen [Kam04; Wer11].

Neuere Arbeiten in der Deflektometrie beschäftigen sich vor allem mit der Rekonstruktion der Geometrie von Oberflächen anhand der gewonnenen Neigungsinformation. Hierzu ist in der Regel noch eine Kalibrierung des Aufbaus notwendig [HW10; Hor07]. Dabei stellt sich das Problem, dass die Rekonstruktion einer spiegelnden Oberfläche aus nur einer Aufnahme keine eindeutige Lösung hat und eine Regularisierung durch das Einbringen von zusätzlicher Information nötig ist, um die Geometrie der realen Oberfläche zu erhalten [Bal08]. Aktuelle Veröffentlichungen [LHS13; Pak14] zeigen, dass diese Bedingung zwar im Allgemeinen zutrifft, jedoch für die meisten Oberflächen dennoch eine Regularisierung mit nur einer Aufnahme, ohne zusätzliche Information, möglich ist.

In der Literatur wurde eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Regularisierung der Rekonstruktion vorgestellt. Mit zusätzlichem Hardwareaufwand wurden durch mechanische Bewegung [PT04], zusätzliche Kameras [Kna06] oder der Messung der Polarisierung [Hor07] regularisierende Information gewonnen. Ebenso lässt sich durch Annahmen über die lokale Geometrie [SCP05] oder zusätzlicher photometrischer Daten [Bal08] eine Rekonstruktion erzielen. Zur Rekonstruktion großer Flächen haben sich Verfahren bewährt, die mehrere, überlappende

Aufnahmen ausnutzen [Wer11; BHB11]. Gleichzeitig lässt sich durch mehrere Messpositionen auch das Problem der Sichtbarkeit der Musteranzeige bei komplex geformten Prüfobjekten lösen [Bal+14].

3.2 Bilderzeugung mit Wärmestrahlung

In diesem Abschnitt soll kurz auf die Grundlagen der thermischen Infrarotstrahlung und vor allem auf die Definition des in dieser Arbeit verwendeten Spektralbereichs und dessen Eigenschaften eingegangen werden. Für eine tiefer gehende Abhandlung über die radiometrischen Grundlagen sei hier auf [BPF16] und insbesondere für das thermischen Infrarot auf [BG10; Dan10] verwiesen.

3.2.1 Wärmestrahlung

Schwarzer Strahler

Ein *schwarzer Strahler* ist ein theoretisches Modell einer idealen Strahlungsquelle, dessen abgestrahltes Spektrum nur von seiner Temperatur abhängig ist. Da die Ausstrahlung einer realen Strahlungsquelle von ihrem Material und Oberfläche abhängt, ist die reale Ausstrahlung stets kleiner als die eines schwarzen Strahlers. Gleichzeitig absorbiert der schwarze Strahler auch jegliche auf ihn treffende elektromagnetische Strahlung vollständig (siehe auch Kapitel 3.2.3).

Die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{\lambda,S}$ eines schwarzen Strahlers wird durch das *Planck'sche Strahlungsgesetz* beschrieben:

$$M_{\lambda,S}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (3.4)$$

mit h der *Planck'schen Konstante*, k der *Boltzmann Konstante*, c der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, T der Temperatur des Strahlers und der ausgestrahlten Wellenlänge λ . Sein *Emissionsgrad* (siehe Kapitel 3.2.3) ist wellenlängenunabhängig und er besitzt eine richtungsunabhängige Ausstrahlung.

Seine gesamte Ausstrahlung wird durch das *Stefan-Boltzmann-Gesetz* beschrieben, das man durch Integration von (3.4) über das komplette Spektrum erhält:

$$M_S(T) = \sigma T^4, \quad (3.5)$$

darin ist σ die *Stefan-Boltzmann Konstante*.

Aus (3.4) leitet sich auch das *Wien'sche Verschiebungsgesetz* ab, das die Wellenlänge der maximalen Ausstrahlung λ_{peak} des schwarzen Strahlers angibt:

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2898 \text{ K}\mu\text{m}}{T}. \quad (3.6)$$

Das Maximum bewegt sich mit steigender Temperatur hin zu kürzeren Wellenlängen. Dabei steigt die Ausstrahlung nach (3.4) über alle Wellenlängen stetig an, sodass für jede Wellenlänge mit steigender Temperatur sich auch die Ausstrahlung erhöht. In Tabelle 3.1 sind die nach (3.6) berechneten Temperaturen für die gängigen Spektralbereiche angegeben.

Die auftretenden Temperaturen bei den Verfahren in dieser Arbeit liegen vorwiegend nicht weit über der Raumtemperatur. Man kann daraus schließen, dass damit einzig Kameras in Frage kommen, die für das LWIR Spektrum sensitiv sind, da das Spektrum der Ausstrahlung von Körpern bei solch niedrigen Temperaturen nicht bis in das MWIR und SWIR Spektrum reicht.

Atmosphärische Transmissionsfenster

Während für die hier beabsichtigte Anwendung in der Infrarotdeflektometrie der Einsatz von möglichst langwelligem Licht wünschenswert ist (siehe Kapitel 3.3), sind die nutzbaren Teile des Spektrums in der Praxis durch die verfügbare Technologie begrenzt. Die Entwicklung von Sensortechnik für Wärmebildkameras (siehe Kapitel 3.4) orientiert sich dabei an den *atmosphärischen Fenstern*. Durch die Absorption infraroter Strahlung durch Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) in der Luft ergeben sich nur spezifische Wellenlängenbereiche, die sogenannten *atmosphärischen Fenster*, in denen Infrarotstrahlung bei der Transmission durch die Luft keine starke Dämpfung erfährt. In der Thermographie unterscheidet man dabei drei Bereiche: SWIR, MWIR und LWIR, deren Einteilung in Tabelle 3.1 aufgelistet ist.

Spektrum	Bezeichnung	Wellenlängen- bereich in μm	Temperatur- bereich in K
Nahes Infrarot	SWIR	1,2 - 2,4	2.415 - 1.208
Mittleres Infrarot	MWIR	3,2 - 5,2	906 - 557
Fernes Infrarot	LWIR	8 - 14	362 - 223

Tabelle 3.1: Spektrale Bereiche der atmosphärischen Fenster im thermischen Infrarotbereich [BG10]. Die Angaben zum Temperaturbereich geben an, für welche Temperaturen die Maxima der Schwarzkörperstrahlung nach (3.6) in diesen Spektralbereich fallen.

Für den Einsatz in der Infrarotdeflektometrie spielt die atmosphärische Absorption direkt zwar keinen signifikanten Einfluss, jedoch diktiert sie indirekt die maximal nutzbare Wellenlänge durch die verfügbareameratechnik.

3.2.2 Absorption, Reflexion und Transmission

Trifft Strahlungsfluss Φ_0 auf einen Körper, wird ein Teil Φ_r der Strahlung reflektiert, ein Teil Φ_a absorbiert und ein Teil Φ_t transmittiert (siehe auch Abbildung 3.3). Zu welchen Anteilen dies geschieht, ist von den Eigenschaften des Materials und der Wellenlänge abhängig. Die Energieerhaltung erfordert das in jedem Fall gilt:

$$\Phi_0 = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t. \quad (3.7)$$

Teilt man beide Seiten der Gleichung durch Φ_0 , erhält man:

$$1 = \rho + \alpha + \tau, \quad (3.8)$$

mit dem Reflexionsgrad ρ , dem Absorptionsgrad α und Transmissionsgrad τ . Sie geben den Anteil der jeweiligen Strahlung im Verhältnis zur einfallenden Strahlung Φ_0 an. Für undurchsichtige Körper mit $\tau = 0$ gilt demnach:

$$\alpha = 1 - \rho. \quad (3.9)$$

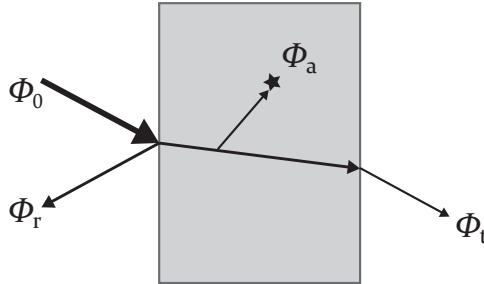


Abbildung 3.3: Absorption, Reflexion und Transmission an einem Körper. Die auf eine Oberfläche treffende Strahlung Φ_0 teilt sich in reflektierte Φ_r , absorbierte Φ_a und transmittierte Φ_t Strahlung auf. (Nach [BG10])

3.2.3 Emission

Der spektrale *Emissionsgrad* eines Körpers ist das Verhältnis seiner spezifischen spektralen Ausstrahlung M_λ zu der eines schwarzen Strahlers $M_{\lambda,S}$ abhängig von seiner Temperatur T und der Wellenlänge λ :

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{M_\lambda(\lambda, T)}{M_{\lambda,S}(\lambda, T)}. \quad (3.10)$$

Die Ausstrahlung eines realen Körpers bei gleicher Temperatur kann nicht größer sein als die eines schwarzen Strahlers als perfekte Strahlungsquelle, weshalb ε auf einen Wert zwischen null und eins beschränkt ist.

Neben dem schwarzen Strahler als theoretischer, perfekter Strahler sind in der Praxis zwei Typen von Strahlern gebräuchlich. Man spricht von einem *grauen Strahler*, wenn sich dessen Emissionsgrad über das Spektrum von einem schwarzen Strahler nur um einen konstanten Faktor unterscheidet. Daneben gibt es *selektive Strahler*, deren Emissionsgrad von der Wellenlänge abhängig ist. Für die Betrachtung in der Thermographie werden Materialien in der Regel als graue Strahler betrachtet und es wird nur der von Wellenlängen und Temperatur unabhängige Emissionsgrad ε angegeben.

Nach dem *Kirchhoff'schen Strahlungsgesetz* ist der Emissionsgrad einer Oberfläche identisch zu deren Absorptionsgrad:

$$\alpha = \varepsilon. \quad (3.11)$$

Gut absorbierende Oberflächen sind also gleichzeitig auch gute Strahler.

Metalle weisen einen niedrigen Emissionsgrad auf, während für nicht-metallische Oberflächen in der Regel ϵ größer 0,8 ist [Dan10]. Der Emissionsgrad eines Materials kann sich abhängig von der Temperatur und vor allem abhängig von den Oberflächeneigenschaften ändern. Bei Metallen kann beispielsweise die Rauigkeit, eine Oxidschicht, oder eine Verschmutzung der Oberfläche zu einem Emissionsgrad führen, der um eine Größenordnung höher liegt.

Für die Anwendung in der Infrarotdeflektometrie bedeuten diese Effekte einerseits, dass bei Verunreinigungen und rauen Oberflächen mit steigendem Emissionsgrad nach (3.9) auch gleichzeitig der Reflexionsgrad, als wichtige Eigenschaft einer Oberfläche bei der Deflektometrie, abnimmt. Dieser Effekt ist aus dem sichtbaren Spektrum bekannt und auch zu erwarten. Gleichzeitig bedeutet ein hoher Emissionsgrad aber auch, dass die Oberfläche selbst abstrahlt und damit quasi selbstleuchtend wird. Dies kann sich vor allem bei Prüfbjekten mit hoher Temperatur störend auswirken. Ebenso ist zu beachten, dass alle warmen Objekte im thermischen Infrarot störende Lichtquellen sind, die bei dem Aufbau eines Sichtprüfsystems zu berücksichtigen sind.

3.2.4 Ansätze zur Mustererzeugung

Aus den Grundlagen der vorherigen Abschnitte lassen sich auch möglich Ansätze zur Erzeugung thermischer Muster ableiten. Die Kamera, ob im infraroten oder sichtbaren Spektrum, misst effektiv den auf den Sensor treffenden Strahlungsfluss Φ_S . Zur Erzeugung eines Muster muss der Strahlungsfluss also räumlich und/oder zeitlich moduliert werden.

Modulation der Temperatur

Ein naheliegender Ansatz zur Generierung thermischer Muster ist die Modulation der Temperatur. Er wird auch in dieser Arbeit in allen Verfahren direkt oder indirekt angewendet. Dabei erhält man ein Muster, indem eine Anzeigefläche lokal unterschiedlich erwärmt wird, sodass direkt durch die variierende Ausstrahlung einzelner Oberflächenpunkte nach (3.4) das Muster entsteht. Wie sich auch später noch zeigen wird, ist hierbei das Problem die Erwärmung der Oberfläche lokal zu begrenzen, da eine Temperaturdifferenz auch stets zu einem Wärmestrom und damit einer Diffusion der Wärme führt. Der Vorteil eines solchen Ansatzes ist, dass eine zeitliche Variation der Temperatur zur

Anzeige verschiedener Muster, verglichen mit den im Folgenden beschriebenen Verfahren, einfach zu realisieren ist.

Modulation des Emissionsgrades

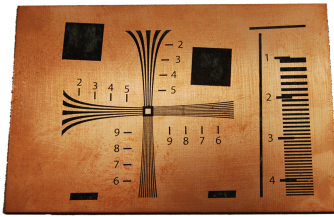
Außerdem bietet die Modulation des Emissionsgrades eine weitere Möglichkeit thermische Muster zu erzeugen. Hierfür eignen sich beispielsweise metallische Oberflächen, die im Infrarotspektrum einen sehr geringen Emissionsgrad besitzen. Diese Eigenschaft ist in der Thermographie bei der Temperaturmessung an Metalloberflächen störend, aber lässt sich hier nutzbringend einsetzen. Durch den geringen Emissionsgrad lassen sie sich erhitzen, ohne dass ihre Temperatur durch Ausstrahlung sichtbar wird. Ändert man den Emissionsgrad der Oberfläche durch Aufbringen eines anderen Materials oder Aufrauen der Oberfläche lassen sich Muster erstellen, die sich beim Erwärmen des Metalls mit der Wärmebildkamera sichtbar werden. Ein solcher Ansatz wurde schon zum Test von Infrarotsensoren und zur IRSP beispielsweise in [WW83] eingesetzt (siehe Kapitel 2.2.1). Bei ersten Versuchen zur Infrarotdeflektometrie kam eine solche Mustererzeugung auch schon in [HK05] zum Einsatz.

In dieser Arbeit wurde auf diese Weise keine Mustererzeugung für eine deflektometrische Registrierung umgesetzt. Allerdings wurde zur Herstellung von Test- und Kalibriermustern auf diese Technik zurückgegriffen. Abbildung 3.4 zeigt ein Auflösungstestmuster auf einer bedruckten Kupferplatte einerseits im sichtbaren und im thermischen Infrarotspektrum. Nach Erwärmung hebt sich das aufgedruckte Muster im Wärmebild deutlich von der blanken Metallfläche ab. Selbst Graustufenbilder können damit erzeugt werden, indem im Halbtönenverfahren durch feine Rasterung lokal Abstufungen des durchschnittlichen Emissionsgrades erzeugt werden.

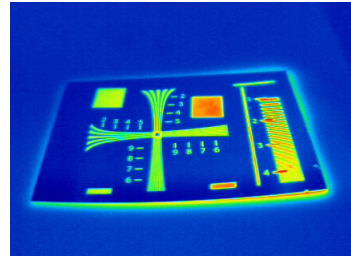
In Kapitel 6 bietet sich eine Einsatzmöglichkeit für statische Muster durch Variation des Emissionsgrades zur Erstellung der dort verwendeten Linienmuster.

Variation des Reflexionsgrades

Ebenso lässt sich, ähnlich wie zuvor der variierte Emissionsgrad, die Variation des Reflexionsgrades zur Mustererzeugung nutzen. Dabei wird das zuvor beschriebene Muster umgekehrt in der Spiegelung benutzt, da nach (3.9) die nicht emittierenden Metallflächen dafür umso besser reflektieren. Hierfür muss die bedruckte Platte so angeordnet werden, dass sie die Reflexion einer homogenen Wärmequelle zeigt. Als Resultat erhält man das negative Bild von



(a) Muster im sichtbaren Spektrum.



(b) Erwärmtes Muster im IR-Spektrum.

Abbildung 3.4: Erzeugung statischer Muster durch variablen Emissionsgrad. Eine Metallfläche strahlt nahezu keine IR-Strahlung ab, sodass sich durch Bedrucken statische Muster mit hoher Auflösung herstellen lassen. Hier ist wurde ein Testmuster auf Kupfer gedruckt.

Abbildung 3.4b, da unbedruckte Stellen die Wärmequelle zeigen, während die bedruckten Stellen dunkel erscheinen. Für die Anwendung in der Deflektometrie gestaltet sich eine solche Mustererzeugung aber schwierig, da das Muster nicht uniform in alle Richtungen abstrahlt und so für die Konfiguration des Aufbaus neben der Reflexion an der Oberfläche des Prüfobjekts auch noch die Reflexion an dem Muster berücksichtigt werden muss.

3.3 Reflektanz diffuser Oberflächen

Neben der durch das Material gegebenen Reflektanz, wie sie in Kapitel 3.2.2 beschrieben wurde, ist die Reflexion an einer Oberfläche auch von deren Rauigkeit abhängig. Als Rauigkeit bezeichnet man hierbei nach DIN Norm [Iso10] den kurzwelligen Anteil des Profils einer Oberfläche, während die langwelligen Anteile die Geometrie des Objekts oder die Welligkeit der Oberfläche beschreiben. Während nach DIN Norm eine Vielzahl an Parametern vorgegeben werden, um das Profil einer Oberfläche zu beschreiben, wird hier die Rauigkeit allein anhand des quadratischen Mittelwerts der Profildordinaten R_q nach [Iso10] charakterisiert. Sie entspricht der in der Literatur üblichen RMS Rauigkeit (RMS, engl.: *root mean square*) als Standardabweichung vom gemittelten Oberflächenprofil. Die Oberflächenrauigkeit hat typischerweise eine Größenordnung von wenigen Mikro- oder hunderten von Nanometern.

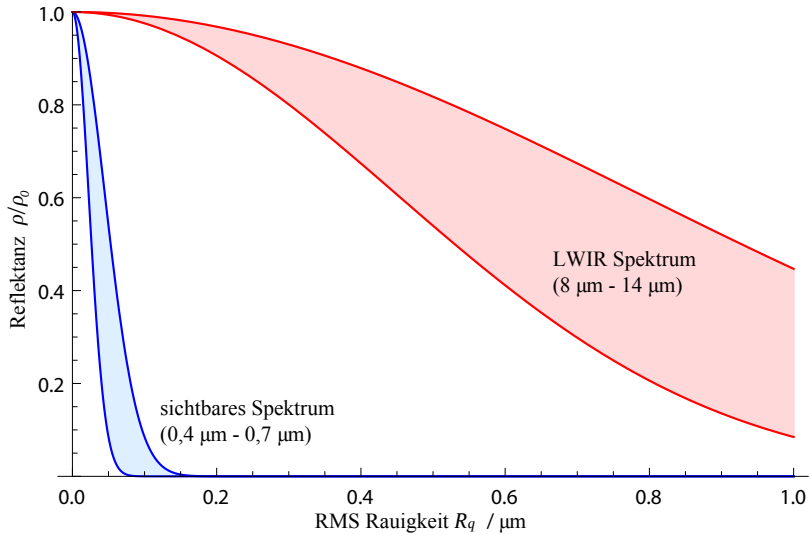
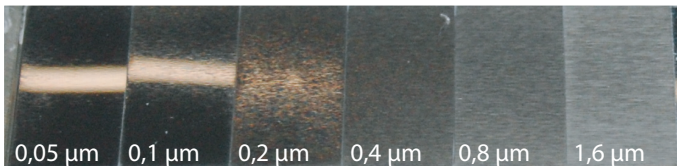
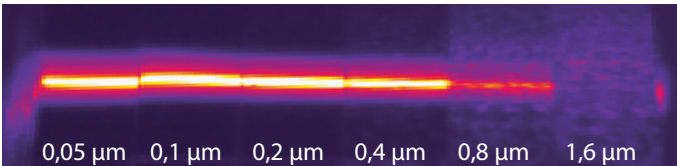


Abbildung 3.5: Reflektanz ρ/ρ_0 einer Oberfläche nach (3.12) abhängig von der Rauigkeit R_q für verschiedene Wellenlängenbereiche. Dargestellt ist jeweils der Bereich zwischen den Werten für die obere und untere Grenze des sichtbaren und des LWIR Spektrums.

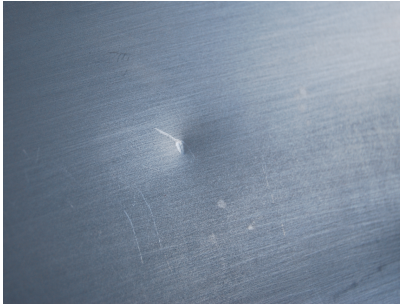


(a) Reflexion einer linienförmigen Lichtquelle im sichtbaren Spektrum.

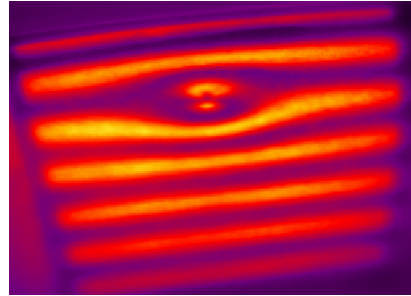


(b) Reflexion einer linienförmigen Lichtquelle im LWIR Spektrum.

Abbildung 3.6: Vergleich der wellenlängenabhängigen Streuung bei verschiedenen Oberflächenrauheiten. In beiden Bildern ist die Reflexion an einem Oberflächenrauheitsmuster zu sehen. In den einzelnen Feldern ist jeweils die RMS Rauigkeit R_q angegeben. Es zeigt sich deutlich, dass im LWIR Spektrum auf raueren Oberflächen noch eine spekulare Reflexion erzielt wird.



(a) Formdefekt in einer rauhen Aluminiumoberfläche im sichtbaren Spektrum.



(b) Verzerrte Reflexion eines thermischen Streifenmusters in der Reflexion im LWIR Spektrum.

Abbildung 3.7: Reflexion an einer gebürsteten Aluminiumoberfläche im sichtbaren und im LWIR Spektrum. In beiden Fällen befindet sich ein Schirm mit einem Streifenmuster über der Oberfläche. Während im sichtbaren Spektrum der Defekt nur anhand der Schattierung der diffus streuenden Oberfläche zu erkennen ist, zeigt sich der Defekt deutlich als Verzerrung in der spiegelnden Reflexion im LWIR Spektrum, sodass hier das Inspektionsverfahren der Deflektometrie angewandt werden kann.

Diese Größenordnung weisen beispielsweise Strukturen auf, wie sie bei maschineller Bearbeitung entstehen. Solche Oberflächen streuen durch ihre Mikrostruktur das auftreffende Licht und führen so zu einer diffusen Reflexion im sichtbaren Spektrum. Dabei wird ein Teil der Strahlung spiegelnd reflektiert, während der übrige Anteil diffus gestreut wird. In welchen Proportionen dies geschieht, wird durch das Verhältnis zwischen Oberflächenrauigkeit und der Wellenlänge λ des reflektierten Lichts bestimmt. Ein gängiges Modell zur Beschreibung dieses Effekts wurde in [BP61] eingeführt, dass bereits in [HK05] zur Charakterisierung rauher Oberflächen benutzt wurde. Dabei wird ein Lichteinfall in Normalenrichtung der Oberfläche und eine Gaußverteilung des Rauigkeitsprofils mit der Standardabweichung R_q angenommen, wobei $R_q < \lambda$ gilt. Auf der Basis eines stochastischen Modells aus [Dav54] zur Streuung elektromagnetischer Strahlung an rauhen Oberflächen wird darin der Zusammenhang zwischen der Reflektanz ρ der rauhen Oberfläche und der Reflektanz einer perfekt glatten Oberfläche des gleichen Materials ρ_0 hergestellt:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = e^{-(4\pi R_q)^2 / \lambda^2} + k_d \frac{R_q^4}{\lambda^4}. \quad (3.12)$$

Hier ist k_d eine Konstante, die den Akzeptanzwinkel des Sensors und die RMS Steigung des Oberflächenprofils enthält. Der erste Summand steht für den spekularen Anteil der Reflexion, während der zweite Summand den diffusen Teil beschreibt. Wird die Messung mit Licht hinreichend großer Wellenlänge im Verhältnis zur Rauigkeit durchgeführt, fällt nur noch der spekulare Anteil der Reflexion ins Gewicht, sodass sich (3.12) reduziert auf:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = e^{-(4\pi R_q)^2 / \lambda^2}. \quad (3.13)$$

Abbildung 3.5 zeigt einen Vergleich des damit berechneten Reflexionsgrades für das sichtbare und das LWIR Spektrum. Man erkennt, dass mit der Wellenlänge auch die Reflektanz der Oberfläche zunimmt und im LWIR Spektrum noch bei Oberflächen eine spekulare Reflexion erzielt wird, die im sichtbaren Spektrum vollkommen diffus reflektieren. Dieser Effekt wird in Abbildung 3.6 anhand der Reflexion an einem Oberflächenrauheitsmuster demonstriert.

Zur Bewertung, wann eine Oberfläche spekulär reflektiert, wird das *Rayleigh-Kriterium* herangezogen, nach dem die Wellenlänge des Lichts mindestens um einen Faktor 8 größer sein muss als die RMS Rauigkeit der Oberfläche:

$$R_q < \frac{\lambda}{8 \cos(\theta)}. \quad (3.14)$$

Hierbei bildet $\cos(\theta)$ den Effekt ab, dass sich bei flachem Einfallswinkel θ der Reflexionsgrad einer Oberfläche erhöht.

Mit Blick auf den Titel der vorliegenden Arbeit, stellt (3.14) das quantitative Kriterium dar, wann eine Oberfläche im sichtbaren Spektrum als »diffus« bezeichnet wird. Die Grundlage der Infrarotdeflektometrie ist, dass sich mit größeren Wellenlängen die Grenzen der diffusen Reflexion hin zu größeren Rauheiten verschiebt, sodass Oberflächen in einem bestimmten Rauheitsbereich, der bei sichtbarem Licht nicht deflektometrisch inspiziert werden kann, dem Verfahren zugänglich werden.

Das oben beschriebene Verhalten der Reflexion an rauen Oberflächen wird hier durch eine stochastische Modellierung auf Basis von wenigen Parametern beschrieben und kann daher den komplexen Prozess einer Reflexion an allen möglichen Oberflächen nicht physikalisch korrekt beschreiben. In [Sár+10a] wurde dieses Reflektanzmodell jedoch durch eine Reihe von Messungen an rauen Metalloberflächen im MWIR Spektrum untersucht und gezeigt, dass damit

die Reflexion an solchen Oberflächen dennoch zufriedenstellend abbilden lässt. Es zeigt sich vor allem, dass der durch (3.14) gegebene Grenzwert der Wellenlänge für eine spekulare Reflexion, sich an vielen Oberflächen auch experimentell nachweisen lässt. Dennoch wird für bessere Vorhersagen des Reflexionsverhaltens empfohlen, auf physikalisch korrekte Modelle zurückzugreifen, wie zum Beispiel [He+91].

3.4 Wärmebildkameratechnik

Die Kameratechnik für das thermische Infrarotspektrum hat in den letzten Jahren immer mehr Verbreitung gefunden. War die Entwicklung der Technologie früher vorwiegend durch militärische Anwendungen geprägt, führten leistungsfähigere und kostengünstigere Sensoren zur Erschließung neuer Anwendungsgebiete in Wissenschaft, Prüftechnik und Überwachung. Der aktuelle Trend der Entwicklung ist die Integration der Sensorik und Auswerteelektronik auf einem einzigen Chip, was Applikationen in Massenmärkten, wie der Nachtsicht zur Gefahrenerkennung in Fahrzeugen oder als zusätzliche Sensorik in Mobilgeräten, ermöglicht. Durch diese Entwicklung ist in naher Zukunft mit einer größeren Verfügbarkeit und geringeren Anschaffungskosten für Wärmebildkameras zu rechnen, sodass die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren für immer mehr Anwendungen in Frage kommen werden.

In diesem Kapitel sollen die grundlegenden Merkmale und die technischen Unterschiede von Wärmebildkameras gegenüber herkömmlichen Kameras für das sichtbare Spektrum herausgestellt werden. Während sie sich vom Aufbau und dem grundsätzlichen, geometrischen Modell nicht von herkömmlichen Kameras unterscheiden, besteht der wesentliche Unterschied in den verwendeten Materialien für die Optik und der Technik des Bildsensors.

Für eine gute Einführung in die physikalischen Grundlagen der Infrarottechnik und der Terminologie sei hier [BG10] empfohlen. Einen detaillierten Überblick zur Sensorik von Wärmebildkameras, bis hin zu technischen Daten von optischen Materialien und Sensoren liefert auch [Dan10].

3.4.1 Sensortechnologien

Die Technologien für bildgebende IR-Sensoren lassen sich grundlegend in zwei Kategorien einteilen: *photonische* und *thermische* Sensoren (siehe Abbildung 3.8). Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass bei thermische Sensoren die IR-Strahlung zunächst absorbiert wird und die dadurch entstehende Temperaturänderung gemessen wird, während bei photonischen IR-Sensoren eine direkte Konvertierung von auftreffenden Photonen in einen Elektronenstrom stattfindet. Um von den Messwerten wiederum auf die absolute Temperatur der Oberfläche schließen zu können, muss zusätzlich der Emissionsgrad (siehe Kapitel 3.2.3) der beobachteten Oberfläche und der Absorptionsgrad (siehe Kapitel 3.2.2) der Atmosphäre bekannt sein. Diese werden in der Regel als konstant angenommen und lassen sich in der Software der Kamera konfigurieren.

Neben der Sensortechnologie ist das Hauptunterscheidungsmerkmal bei IR-Kameras der Sensitivitätsbereich der Kamera, die sich in die drei Bereiche SW-, MW- und LWIR unterteilen (siehe Tabelle 3.1).

Die Temperaturlösung von IR-Sensoren wird anhand der rauschäquivalenten Temperaturdifferenz *NETD* (engl.: *noise equivalent temperature difference*) angegeben. Sie entspricht der Temperaturdifferenz ΔT , die in einem Signal-Rausch-Abstand von eins resultiert [BG10].

Photonensensoren

Wie auch herkömmliche Kameras im sichtbaren Spektrum, basieren IR-Kameras mit Photonensensoren auf dem photoelektrischen Effekt, wobei ein absorbiertes Photon ein Elektron aus seiner Bindung in einem Atom oder Valenzband löst, was in einer messbaren Änderung der elektrischen Eigenschaften resultiert. Da die Photonen der im Vergleich zum sichtbaren Spektrum langwelligen Infrarotstrahlung weniger energiereich sind, können solche Sensoren nicht mehr aus Silizium gefertigt werden. Stattdessen kommen beispielsweise Kristalle aus *Quecksilber-Cadmium-Tellur* (HgCdTe) oder *Indium-Antimon* (InSb) zum Einsatz, mit einer Bandstruktur, beziehungsweise Bandlücke, bei der auch energiearme Photonen noch Ladungsträger erzeugen. Durch die Wahl des Materials werden so Sensoren für das SWIR, MWIR und LWIR-Spektrum gefertigt.

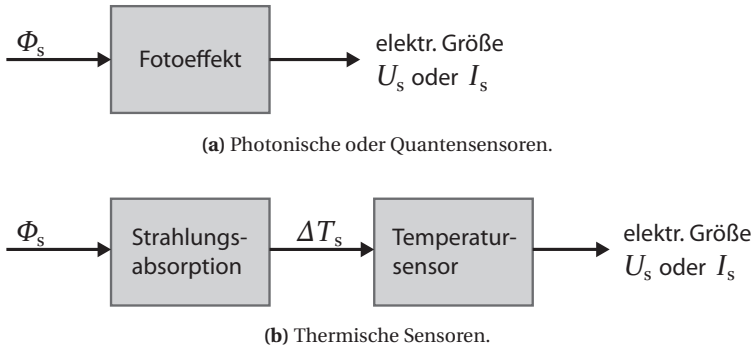


Abbildung 3.8: Arbeitsprinzip der beiden Kategorien von Infrarotsensoren. Während Photonen- oder Quantensensoren die Strahlung direkt messen, wird bei thermischen Sensoren nur indirekt die Erwärmung durch die absorbierte Strahlung gemessen.

Eine alternative Technik sind *Quantensensoren* (*«quantum well infrared photodetectors»*, QWIP), bei denen die Energie eines absorbierten Photons nicht die ganze Bandlücke überwinden muss, sondern die Absorption in kleineren Schritten über sogenannte *«Quantentöpfe»* erfolgt [Dan10]. Dadurch können QWIP-Sensoren auch aus Materialien mit einer größeren Bandlücke hergestellt werden und werden daher vor allem für das LWIR-Spektrum bevorzugt.

Die Vorteile von Photonensensoren gegenüber thermischen Sensoren ist ihr höhere Empfindlichkeit und ihre schnelle Reaktionszeit, die in der Regel nur durch die Ausleseelektronik begrenzt ist. Die Nachteile sind dabei ihre starke Wellenlängenabhängigkeit, da abhängig vom verwendeten Material der Sensor auch spezifisch auf eine Wellenlänge abgestimmt ist. Da allerdings die Kamera bis hin zum Sensor selbst auch Wärme abstrahlt, müssen Photonensensoren kryogenisch gekühlt werden, um den Einfluss der Eigenstrahlung auf die Messung gering zu halten. Die Kühlung erfolgt entweder mit Flüssiggas oder *Stirlingkühlern*, wodurch Kameras mit Photonensensoren in der Regel einen aufwendigeren Aufbau haben.

Thermische Sensoren

Im Gegensatz zu Photonensensoren werden bei den thermischen Sensoren absorbierte Photonen nur indirekt detektiert, indem die Erwärmung des Sen-

sors durch die absorbierten Photonen über die Änderung elektrischer oder mechanischer Eigenschaften gemessen wird. Diese Änderungen können wiederum mit einer externen Schaltung ausgelesen werden. Im Unterschied zu den Photonensensoren ist der thermische Effekt nicht von der Wellenlänge der absorbierten Photonen abhängig, sodass thermische Sensoren für einen breiten Wellenlängenbereich eingesetzt werden können [BG10]. Ihre Begrenzung auf einen Wellenlängenbereich ist hauptsächlich durch die Materialien der verwendeten Optik bestimmt. Daher kommen sie vorwiegend im LWIR-Spektrum zum Einsatz, wo die Verfügbarkeit von Materialien für Photonensensoren begrenzt ist.

Die verbreitetste Technik bei den thermischen Sensoren sind sogenannte Mikrobolometer-Sensoren, bei der einzelne Pixel aus temperaturabhängigen Widerständen aufgebaut sind. Für spezialisierte Anwendungen oder einzelne Temperatursensoren kommen auch *pyroelektrische Sensoren*, *Thermosäulen*, oder *Golay-Zellen* zum Einsatz [Dan10].

Der Nachteil thermischer Sensoren ist ihre durch die Erwärmung und Abkühlung der Sensorelemente bedingte langsame Reaktionszeit. Dennoch erreichen aktuelle (Stand 2015) Kameras mit Mikrobolometersensoren Videobildraten von 50 Bildern pro Sekunde und mehr. Allerdings erfordern Mikrobolometersensoren die regelmäßige Aufnahme eines Referenzbildes, um die unterschiedliche Charakteristik der einzelnen Pixel auszugleichen. Dafür wird ein Shutter vor den Sensor geschlossen, wodurch die Bildaufnahme kurz unterbrochen wird.

Der Vorteil thermischer Sensoren ist, dass sie ungekühlt betrieben werden können, wodurch Kameras mit solchen Sensoren kompakter und kostengünstiger aufgebaut werden können. Dadurch wird diese Sensortechnik für viele Anwendungen den Photonensensoren bevorzugt.

3.4.2 Anmerkungen zur verwendeten Kamera

Zum besseren Verständnis der in dieser Arbeit gezeigten Daten und Bilder, sollen hier die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Kameras zusammengefasst werden. Für alle Aufnahmen im thermischen Infrarotspektrum kamen in dieser Arbeit *Infratec/Jenoptik VarioCAM hr* Kameras mit Mikrobolometersensoren zum Einsatz, deren relevanten Spezifikationen in Tabelle 3.2 aufgelistet sind.

Sensortechnik	Mikrobolometer
Spektralbereich	7,5 - 14 μm (LWIR)
Geometrische Auflösung	640 \times 480 Pixel
Temperaturauflösung (NETD)	30 mK
Bildrate	50 Hz

Tabelle 3.2: Spezifikationen der verwendeten Wärmebildkameras laut Datenblatt. Der tatsächlich gemessene Wert für die NETD beträgt $T_{\text{NETD}} \approx 50 \text{ mK}$.

Eine Besonderheit der Mikrobolometersensoren ist, dass durch ihre Funktionsweise die Integrationszeit des Sensors nicht variabel ist. Es kann also die Belichtungszeit der Bildaufnahme nicht anwendungsspezifisch angepasst werden. Dies führt vor allem für die Auswerteverfahren in Kapitel 5 zu Einschränkungen. Kameras mit Photonensensoren, bei denen die Integrationszeit variabel ist, könnten an dieser Stelle also mehr Möglichkeiten zur Auswertung bieten. Ebenso könnte eine Kamera mit Photonensensoren entsprechend bessere Ergebnisse liefern, falls eine höhere Temperaturauflösung oder Bildrate gefragt ist.

Für den regulären Betrieb zur Temperaturmessung werden die digitalen Rohwerte des Sensors über eine interne, kalibrierte Lookup-Tabelle in Temperaturwerte übersetzt, wobei jedoch bei der verwendeten Software nicht die volle vom Sensor zur Verfügung gestellte Auflösung genutzt wurde. Da bei den Auswerteverfahren in dieser Arbeit die absoluten Temperaturwerte keine Rolle spielen, werden für die Auswertung der Kamerabilder in dieser Arbeit stets die vom Sensor gelieferten digitalen Rohwerte herangezogen, um die maximale Temperaturauflösung zu erzielen. Um hier dennoch einen Anhaltspunkt zum Abschätzen der hier auftretenden Temperaturen zu liefern, kann der Zusammenhang von gemessener Temperatur T und Rohwert I beschrieben werden durch:

$$\Delta I \approx \frac{200}{\text{K}} \Delta T, \quad (3.15)$$

eine Temperaturerhöhung um 1 Kelvin entspricht also etwa einer Erhöhung um 200 Rohwerte¹. Im Folgenden wird das gemessene Intensitätssignal I der

¹ Der genaue Wert variiert je nach Kameramodell und Temperaturbereich, weshalb dies für Temperaturmessungen über die Lookup-Tabelle ausgeglichen wird.

Kamera stets als Einzelbild $I(x,y)$, mit pixelweisen Intensitätswerten oder als eine Bildsequenz $I(x,y,n)$, behandelt.

Spektraler Konverter als Mustergenerator

Ein naheliegendes Design für den Aufbau eines dynamischen Mustergenerators für das IR-Spektrum, ist die Konstruktion eines Infrarot-Monitors. Äquivalent zu der Funktionsweise von Computermonitoren oder Fernsehgeräten im sichtbaren Spektrum ist die Anforderung an einen solchen Monitor eine ebene Anzeigefläche mit einem gleichmäßigen Raster von Pixeln zu bieten, deren Intensität sich einzeln kontrollieren lässt. Ansätze für solche Mustergeneratoren wurden schon in Kapitel 2.2 vorgestellt. Allerdings beschränkt sich deren Umsetzung auf Anwendungen zur IRSP und sie sind damit nur wenige Quadratzentimeter groß. Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, dass ähnlich den thermischen Musterprojektoren aus Kapitel 2.2.2 die Infrarotstrahlung einzelner Pixel über die ohmsche Verlustleistung resistiver Elemente erzeugt. Der Unterschied zu den Musterprojektoren besteht in einer großflächigen Ausführung, sodass sich ein Mustergenerator in der Größe gängiger Monitore konstruieren lässt.

Das Ziel des Ansatzes ist das Konzept eines Mustergenerators, mit dem sich ein deflektometrischer Sensorkopf für das IR-Spektrum möglichst einfach umsetzen lässt, wobei der Aufbau, wie er bisher im sichtbaren Spektrum verwendet wird, beibehalten werden soll. Ein solches Konzept wurde bereits in [BHW09] beschrieben. Für einen typischen Sensor, wie er in 3.1 beschrieben wurde, wird bei diesem Ansatz die Kamera durch eine Wärmebildkamera ersetzt und der

hier vorgestellte Mustergenerator soll den herkömmlichen Monitor entsprechend ersetzen oder erweitern. Einerseits bleibt hierbei die Geometrie des Sensormodells unverändert. Andererseits können die bei der Deflektometrie verwendeten Verfahren zur Positionscodierung hier unverändert zum Einsatz kommen. Bei dem hier vorgestellten Ansatz wird dazu der Prototyp eines *spektralen Konverters* konzipiert, der als Aufsatz für einen Monitor das angezeigte Bild aus dem sichtbaren in das Infrarotspektrum *aktiv* umwandelt. Hierbei bedeutet »aktiv«, dass das Intensitätssignal vom Monitor zur Ansteuerung der resistiven Elemente elektrisch verstärkt wird.

4.1 Aufbau des Konverters

Die Anforderungen an einen Prototypen sind eine flächige Anordnung resistiver Elemente mit optoelektronischer Ansteuerung. Hierbei ist es naheliegend, für die Konstruktion auf gängige Fertigungstechnologie für die Herstellung elektronischer Schaltungen auf Platinen zurückzugreifen, was eine einfache und dennoch präzise Fertigung ermöglicht.

4.1.1 Prototyp als Platine

Der Aufbau der Platine erfolgt in Oberflächenmontage, dementsprechend kommen für den Aufbau nur elektronische Komponenten für die Oberflächenmontage (SMD, engl.: *surface-mount device*) zum Einsatz. Abbildung 4.1 zeigt den Prototypen mit 16 Pixeln Höhe und 16 Pixeln Breite, die im 10 mm Rasterabstand zueinander angeordnet sind. Die einzelnen Pixel werden durch SMD-Widerstände realisiert, deren Verlustleistung in einer Erwärmung des Widerstandes resultiert und somit im LWIR-Spektrum als Lichtquelle fungiert. Durch die flache, flächige Bauform der SMD-Widerstände bilden sie trotz ihrer geringen Größe dennoch gut sichtbare Pixel. Die Möglichkeit ein Raster von Widerständen zur Mustererzeugung zu nutzen, wurde bereits in [Sár+10b] und [Höf+11] diskutiert, jedoch wurde basierend darauf bisher kein Mustergenerator realisiert.

Die zur Verfügung stehenden Parameter zur Auswahl eines SMD-Widerstandes beschränken sich in der Regel auf die Bauform und den Widerstandswert. Bei dem hier beabsichtigten Einsatz sind zusätzlich noch die thermischen

Eigenschaften zu beachten, die im folgenden Abschnitt behandelt werden. Anschließend wird in Abschnitt 4.1.3 der Aufbau einer optoelektronischen Schaltung vorgestellt, um die Ansteuerung der Widerstände zu realisieren.

4.1.2 Widerstände als thermische Strahler

Obwohl die vorgesehene Anwendung von SMD-Widerständen nicht den Betrieb als IR-Lichtquelle beabsichtigt, begünstigt ihr Aufbau dennoch den Einsatz als eben solche. Abbildung 4.2a zeigt die hier verwendeten Widerstände bestehend aus einem quaderförmigen Trägermaterial (meist Aluminiumoxid-Keramiksubstrat), auf dessen Oberseite ein Dünnschichtwiderstand aufgebracht ist. Von Vorteil ist beim Aufbau des Widerstandes, dass die Widerstandsschicht, abgesehen von einer dünnen Lackschicht, direkt sichtbar ist. Damit ähnelt er dem Design der Mikrowiderstandsarrays, wie sie in Kapitel 2.2.2 beschrieben wurden.

Die entstehende Wärmeleistung $\dot{Q}_{\text{th,F}}$ im Widerstandfilm entspricht der ohmschen Verlustleistung $P_{\text{el}} = UI$, bei einer anliegenden Spannung U und dem Strom I , der durch den Widerstand fließt. Mit dem ohmschen Widerstand R_{el} ergibt sich aus dem ohmschen Gesetz $U = R_{\text{el}}I$ die Abhängigkeit der Wärmeleistung von der Stromstärke:

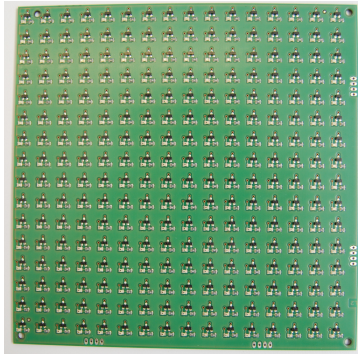
$$\dot{Q}_{\text{th,F}} = P_{\text{el}} = I^2 R_{\text{el}}. \quad (4.1)$$

Die Übertragung des resultierenden Wärmestroms erfolgt entweder durch Kontakt, Konvektion oder Strahlung. Für die Anwendung als Mustergenerator gilt es, die abgestrahlte Wärme zu maximieren. Allerdings ist ihr Beitrag zum Wärmetransport verhältnismäßig gering¹.

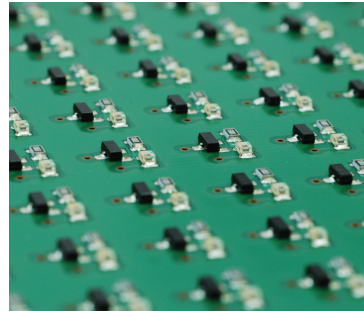
Der durch Strahlung anfallende Wärmestrom lässt sich durch das *Stefan-Boltzmann-Gesetz* beschreiben:

$$\dot{Q}_{\text{th,Rad}} = \varepsilon \sigma A_{\text{a}} T_{\text{F}}^4. \quad (4.2)$$

¹ Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Verhältnis zugunsten der Strahlungswärme, allerdings müsste der Widerstand bis zum Glühen erhitzt werden, damit ihr Anteil signifikant wird.

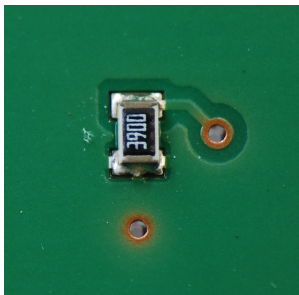


(a) Gesamtansicht der Platine.

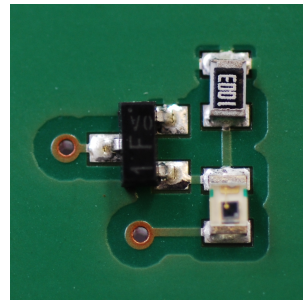


(b) Detailansicht der Ansteuerung.

Abbildung 4.1: Prototyp des spektralen Konverters als Platine mit 16 auf 16 Pixeln. Während auf der abgebildeten Seite die Ansteuerung für jedes Pixel angebracht ist, befindet sich auf der anderen Seite jeweils ein Widerstand als Heizelement. Der Schaltplan ist in Abbildung 4.4 zu sehen.



(a) SMD-Widerstände als IR-Pixel auf der Frontseite des Mustergenerators.



(b) Optoelektronische Schaltung zur Ansteuerung eines einzelnen Pixels auf der dem Monitor zugewandten Seite.

Abbildung 4.2: Detailansicht der Schaltung eines einzelnen Pixels.

Dabei sind A_a und T_F die aktive Fläche und die Temperatur des Widerstandsfilms und σ ist die *Stefan-Boltzmann-Konstante*.

Betrachtet man die Funktion des Widerstandes als »Pixel« in einem Mustergenerator, muss man zusätzlich noch den *Füllfaktor* $a_{\text{ff}} = A_a / A_{\text{Px}}$ berücksichtigen, der den Anteil der aktiven Fläche an der gesamten Pixelfläche A_{Px} beschreibt. Er ist auch ein typisches Bewertungskriterium für die Effizienz von Mikrowiderstandarrays [Wil92a]. Bezogen auf die Fläche eines Pixels ändert sich dadurch die spezifische Ausstrahlung M_{Px} , die sich zusammensetzt aus der spezifischen Ausstrahlung des Widerstandes

$$M_F = \varepsilon_F \sigma T_F^4 \quad (4.3)$$

und der Leiterplatte als Hintergrund

$$M_H = \varepsilon_{\text{Hg}} \sigma T_{\text{Hg}}^4 \quad (4.4)$$

mit den Emissionsgraden ε_F , ε_{Hg} und Temperaturen T_F , T_{Hg} der beiden Flächen. Für einen radiometrischen Sensor, der über die ganze Fläche des Konverterpixels integriert, fällt der effektiv beobachtete Temperaturanstieg eines Pixels dadurch geringer aus als der tatsächliche Temperaturanstieg des Widerstands. Dies ist beispielsweise der Fall bei einzelnen Sensorpixeln einer Wärmebildkamera mit ausreichendem Beobachtungsabstand, sodass die einzelnen Pixel des Mustergenerators nicht mehr aufgelöst werden können. Daraus ergibt sich für die effektive spezifische Ausstrahlung eines Pixels:

$$M_{\text{Px}} = a_{\text{ff}} M_F + (1 - a_{\text{ff}}) M_H. \quad (4.5)$$

Der Füllfaktor kann hier als maßgeblicher Faktor für die Effizienz eines Mustergenerators genommen werden und gleichzeitig führt ein geringer Füllfaktor zu störendem Einfluss durch den sichtbaren Hintergrund.

Vereinfachtes thermisches Modell

Zur Bewertung des thermischen Verhaltens wird auf ein gängiges, vereinfachtes Modell zurückgegriffen, bei dem die Wärmeübertragung analog zum ohmschen Gesetz beschrieben wird. Darin entspricht die Temperatur der Spannung, der Wärmefluss dem Strom und Kapazitäten und Widerstände haben jeweils ein thermisches Pendant. Der Weg des Wärmetransports lässt sich damit als eine

Verkettung von *RC-Gliedern* beschreiben. Abbildung 4.3 zeigt das Modell für einen einzelnen Pixel, bei dem der durch Kontakt übertragene Anteil des Wärmestroms am Widerstandsfilm einer Stromquelle $\dot{Q}_{th,F}$ entspricht. Der SMD-Widerstand als Ganzes wird durch die Kapazität $C_{th,FL}$ dargestellt, die durch den Wärmestrom erhitzt wird, wodurch die Temperatur des Widerstandsfilms T_F steigt. Ebenso wird der thermische Widerstand zwischen Widerstandsfilm und der Leiterplatte $R_{th,FL}$ zusammen modelliert. Äquivalent dazu werden die thermischen Eigenschaften der Leiterplatte durch $C_{th,LA}$ und der thermische Widerstands des Übergangs zur Wärmesenke mit $R_{th,LA}$ angegeben. In dem Modell wird die Wärmesenke als Spannungsquelle dargestellt und steht für die Temperatur T_A der Umgebungsluft oder eines Kühlkörpers, wohin die Wärme letztendlich abgeleitet wird.

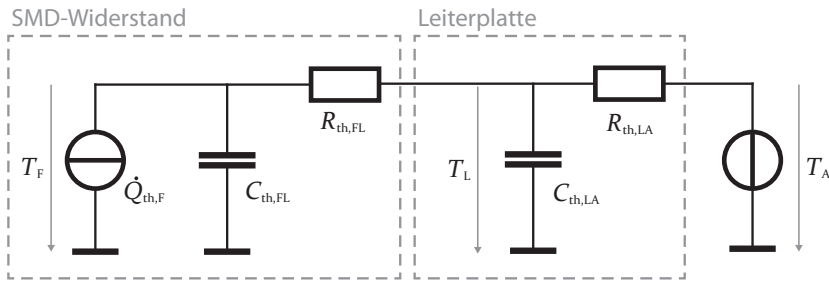


Abbildung 4.3: Temperaturmodell für ein einzelnes Pixel. Das thermische Verhalten lässt sich vereinfacht durch ein Modell aus RC-Gliedern analog zu einer elektrischen Schaltung darstellen. Die Wärmekapazität von Komponenten entsprechen Kapazitäten C_{th} , während die thermischen Übergangswiderstände zwischen Komponenten als Widerstände R_{th} modelliert werden. Die Wärmequelle, hier der Widerstandsfilm, ist als Stromquelle abgebildet, die bei einer Temperatur T_F einen Wärmestrom $\dot{Q}_{th,F}$ erzeugt. Die Wärme wird über die Leiterplatte zur Umgebung abgeleitet, die als Spannungsquelle dargestellt ist.

Typische thermische Materialwerte lassen sich im Falle des Widerstandes aus Datenblättern [Vis11] und Stoffwertetabellen [Ste06] berechnen (siehe Tabelle 4.1) oder experimentell bestimmen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass vor allem die Werte für die thermischen Widerstände durch Bauteiltoleranzen und den Lötprozess bei der Herstellung der Leiterplatte variieren können. Für die Leiterplatte ist auch zu berücksichtigen, dass das Modell ein einzelnes Pixel repräsentiert. Das komplexe Zusammenspiel benachbarter Pixel würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und ist hier nicht explizit modelliert. Allerdings

Bautyp	$R_{th,FL}/KW^{-1}$	$C_{th,FL}/10^{-3}WsK^{-1}$	τ_{th}/s	f_{co}/Hz	A_a/mm^2
0402	90	0,6	0,05	2,95	0,4
0603	63	1,9	0,12	1,33	1,06
0805	38	4,6	0,17	0,91	2,0
1206	32	9,2	0,29	0,54	4,32

Tabelle 4.1: Typische thermische Materialwerte für SMD-Widerstände aus Datenblättern [Vis11], Stoffwertetabellen [Ste06] und berechnet nach (4.9). Angegeben sind der thermische Widerstand von Bauteil zu Platine $R_{th,FL}$, die thermische Kapazität des Widerstands $C_{th,FL}$, die Fläche des Widerstandfilms A_a , die nach (4.7) berechnete Zeitkonstante τ_{th} und die daraus resultierende Grenzfrequenz f_{co} .

lässt sich der Einfluss der Integrationsdichte der Pixel durch einen höheren Wert für $R_{th,LA}$ modellieren [Vis11].

Statische und dynamische Eigenschaften

Für den statischen Fall, bei konstanter Wärmezufuhr und thermischem Gleichgewicht, lässt sich aus den thermischen Materialwerten aus Tabelle 4.1 der nötige Wärmestrom für eine zu erzielende Temperaturdifferenz berechnen:

$$\dot{Q}_{th,F} = \frac{T_F - T_L}{R_{th,FL}}, \quad (4.6)$$

allein unter Berücksichtigung des Wärmestroms durch Kontakt lässt sich mit Gleichung 4.1 der elektrische Betriebsstrom des Pixels festlegen lässt. Typischerweise beträgt der Anteil des Wärmetransports durch Kontakt für den hier relevanten Temperaturbereich (bis maximal 70°C) über 90% des gesamten Wärmetransports, weshalb gängige Modelle für die thermische Modellierung von SMD-Widerständen [Vis11] sich allein auf diesen Teil des Wärmetransports beschränken. Da hier nur die wichtigsten Parameter zum Aufbau des Konverters identifiziert werden sollen, liefert eine solche Modellierung auch hier eine hinreichende Annäherung.

Aus diesem Modell nach [LSF00] lassen sich auch die dynamischen Eigenschaften in Form der Zeitkonstanten

$$\tau_{th} = R_{th} C_{th} \quad (4.7)$$

spezifizieren. Daraus kann der Temperaturverlauf während des Aufheizens als Temperaturerhöhung ΔT über die Zeit berechnet werden:

$$\Delta T(t) = R_{\text{th}} \dot{Q}_{\text{th}} (1 - e^{t/\tau_{\text{th}}}). \quad (4.8)$$

Außerdem kann man hieraus die *Grenzfrequenz*

$$f_{\text{co}} = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{th}}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{th}} C_{\text{th}}} \quad (4.9)$$

berechnen. Für RC-Glieder gibt sie die Frequenz an, ab der die Amplitude des gefilterten Signals um den Faktor $\sqrt{1/2}$ abgeschwächt wird [Rin81]. Da das hier verwendete Modell nur eine Annäherung des tatsächlichen thermischen Prozesses ist, kann sie hier als Anhaltspunkt für die Amplitude von Erwärmung und Abkühlung genommen werden, womit sich die maximale Frequenz für schnelle Bildwechsel abschätzen lässt.

Designkriterien

Gleichung (4.6) und (4.7) zeigen die primäre Entscheidung, die beim Design mit resistiven Elementen als Mustergenerator getroffen werden muss. Entweder maximiert man $R_{\text{th,FL}}$ und sorgt damit nach (4.6) für einen niedrigen Energiebedarf oder man minimiert $R_{\text{th,FL}}$ und ermöglicht nach (4.7) schnelle Bildwechsel. Ebenso zeigt sich meist ein gegensätzliches Verhalten bei dem Füllfaktor a_{ff} und der thermischen Kapazität C_{th} . Da hier eine größere Fläche in der Regel auch mit einer größeren Masse einher geht, kann entweder nach (4.5) auf einen energetisch effizienten oder nach (4.7) auf einen schnellen Bildgeber hin optimiert werden.

Bei der Auswahl der Widerstände gibt es nur begrenzten Spielraum, um die oben aufgeführten Parameter zu optimieren, da man hier auf die zur Verfügung stehenden Bautypen von Widerständen beschränkt ist. Für den Aufbau des Prototypen wurden SMD-Widerstände der Bauform 0805 gewählt. Primäres Entscheidungskriterium war dabei die Fläche des Widerstandfilms A_a , wonach der Bautyp 1206 die größte Fläche bietet (siehe Tabelle 4.1). Als Kompromiss wurde dennoch der etwas kleinere Bautyp 0805 gewählt, da er eine höhere Grenzfrequenz bietet und um den maximalen Stromverbrauch des Konverters möglichst gering zu halten.

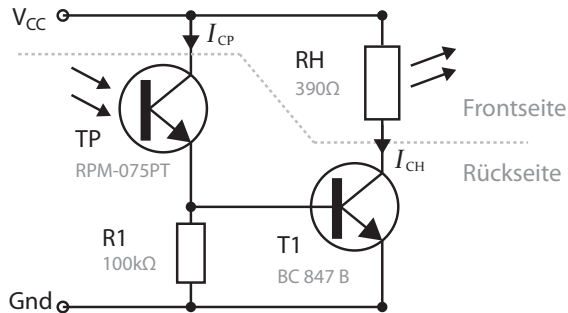


Abbildung 4.4: Schaltung für die Ansteuerung der einzelnen Pixel des Mustergenerators. Der Aufbau als spektraler Konverter nutzt eine optoelektronische Ansteuerung. Der Fototransistor TP ist dem Monitor zu gewandt und wird durch das einfallende Licht angesteuert. Der resultierende Strom I_{CP} wird durch den Transistor T1 verstärkt, sodass der Widerstand RH sich durch den fließenden Strom I_{CH} erwärmt.

Das vorgestellte Modell gilt generell auch für die Mustererzeugung mit resistiven Elementen, sodass bei einer gezielten Fertigung spezieller Heizelemente, auf die Optimierung der Parameter besser Einfluss genommen werden kann.

4.1.3 Heizelemente mit photosensitivem Konverter

Wie anfangs erwähnt, soll die Ansteuerung der Pixel optoelektronisch erfolgen, indem das angezeigte Bild auf einem herkömmlichen Monitor zur Steuerung benutzt wird. Für die Funktionsweise als Konverter soll die Leiterplatte direkt vor dem Monitor angebracht werden. Die Ansteuerung erfordert also lichtempfindliche Sensoren auf der dem Monitor zugewandten Seite, Verstärker und Widerstände als Heizelemente auf der dem Monitor abgewandten Seite der Leiterplatte. Abbildung 4.4 zeigt die dafür vorgesehene Schaltung, bestehend aus einem Fototransistor TP, dem heizenden Widerstand RH aus Kapitel 4.1.2 und einem Transistor T1, der das Stromsignal von TP für die Ansteuerung von RH verstärkt.

Die auf den Fototransistor treffende Beleuchtungsstärke E_P führt zu einer proportionalen Änderung des Kollektorstroms I_{CP} . Hier wurde ein Fototransistor gewählt, der über seinen kompletten Empfindlichkeitsbereich ein lineares Verhalten aufweist. Dies wird durch den Verstärkungsfaktor g_P ausgedrückt,

welcher die spektral unabhängige Empfindlichkeit des Fototransistors beinhaltet und photometrische Größe und elektrischen Strom miteinander verknüpft:

$$I_{CP} = g_P E_P. \quad (4.10)$$

Der Widerstand R1 ist hochohmig ausgelegt, sodass der Kollektorstrom I_{CP} über die Basis und Emitter von T1 fließt. In der hier vorliegenden Emitterschaltung verstärkt T1 den Basis-Emitter-Strom abhängig von seinem Gleichstromverstärkungsfaktor h_{FE} , sodass man den resultierenden Kollektorstrom erhält nach:

$$I_{CH} = h_{FE} I_{CP}. \quad (4.11)$$

Aus (4.10) und (4.11) ergibt sich somit der Zusammenhang der auf den Sensor treffenden Beleuchtungsstärke und dem Stromfluss durch den heizenden Widerstand RH:

$$I_{CH} = h_{FE} g_P E_P \quad (4.12)$$

und der Zusammenhang zum entstehenden Wärmestrom durch Einsetzen in (4.1):

$$\dot{Q}_{th,F} = (h_{FE} g_P E_P)^2 R_{el,RH}. \quad (4.13)$$

Zusammen mit (4.8) lässt sich damit ein oberes Limit für die Temperatur eines Konverterpixels abhängig von Bestrahlungsstärke und Zeit berechnen. Da das hier verwendete Modell auf der Annahme basiert, dass der Wärmetransport vorwiegend durch Kontakt erfolgt (siehe [Vis11]), fällt durch den zusätzlichen Wärmetransport über Konvektion oder Strahlung die tatsächliche Temperatur geringfügig niedriger aus.

Thermische Abhängigkeit der Ansteuerung

Bei der Betrachtung des thermischen Verhaltens des Mustergenerators ist zu beachten, dass die am Transistor T1 entstehende Verlustwärme $\dot{Q}_{th,T1}$ signifikant zur Erwärmung der Leiterplatte beiträgt. Das Maximum für $\dot{Q}_{th,T1}$ entsteht dabei, wenn das Pixel mit 50% der Maximalintensität angesteuert wird. Um den störenden Einfluss durch die Verlustwärme des Transistors gering zu halten,

eignen sich daher binäre Codemuster zu Ansteuerung, bei denen T1 entweder vollständig sperrt oder öffnet.

Umgekehrt ist auch zu beachten, dass Halbleiter eine Temperaturabhängigkeit aufweisen. Als Halbleiter erhöht sich ihre Leitfähigkeit bei steigender Temperatur. Für die beiden Transistoren in der Schaltung äußert sich das in einer Temperaturabhängigkeit der Verstärkungsfaktoren h_{FE} und g_p . Durch den Betrieb als thermischer Mustergenerator bedingt dies auch, dass an allen Bauteilen Temperaturschwankungen auftreten, was zusammen mit der Temperaturabhängigkeit zu einem instabilen Ausgangssignal führen kann. Dieses Verhalten lässt sich teilweise durch Erweiterungen der Schaltung kompensieren, beispielsweise durch komplexere Transistorschaltungen oder indem ein temperaturabhängiger Widerstand zwischen der Basis von T1 und Masse den Verstärkungsfaktor korrigiert. Von einer solchen Temperaturkompensation wurde bei dieser Version des Mustergenerators jedoch abgesehen, da dies ein aufwendiges Selektieren und Abstimmen der Komponenten voraussetzt. Stattdessen soll durch die Kühlung der Komponenten und eine Limitierung auf eine kurze Anzeigzeit der Muster der Einfluss durch die Temperatur gering gehalten werden.

4.1.4 Ansteuerung des Mustergenerators

Ansteuerung einzelner Pixel

Üblicherweise besteht jedes Pixel eines herkömmlichen Monitors aus Subpixeln in den drei Grundfarben. Dadurch wäre es möglich die spektral abhängige Empfindlichkeit von monochromatischen Sensoren auszunutzen und so durch die Mischung der Farbkanäle mehr Helligkeitsstufen zu erzeugen. Wir betrachten hier jedoch den Monitor nur als monochrome Lichtquelle. Stattdessen können durch räumliches Mitteln mehr Abstufungen der Intensitätswerte zur Ansteuerung erzeugt werden, da jeder Phototransistor durch das Licht mehrerer Pixel angesteuert wird.

Streulicht und der Öffnungswinkel des Empfindlichkeitsbereichs der Fototransistoren können zu einem Übersprechen zwischen den einzelnen Pixeln führen. Dieser Effekt lässt sich einfach durch ein Raster von Trennwänden zwischen Monitor und Konverter verhindern, sodass jedes Pixel des Monitors eindeutig einem Sensor auf dem Konverter zugeordnet werden kann. Allerdings wird hier zugunsten der Kühlung des Konverters auf Trennwände verzichtet. Der

Zwischenraum bietet die einzige Möglichkeit einen Luftstrom am Konverter entlang zu leiten, um die entstehende Wärme wieder abzuführen, ohne das angezeigte Muster zu stören. Um dennoch eine bestmögliche Trennung zwischen den einzelnen Pixeln zu gewährleisten, wird ausgenutzt, dass die Fototransistoren ihre höchste Sensitivität nur über einen begrenzten Winkelbereich haben. Das verwendete Modell hat einen Öffnungswinkel von 120° , sodass sich bis zu einem Abstand von 10mm zwischen Monitor und Konverter die Bereiche nicht überlappen und so noch eine gute Trennung zwischen benachbarten Pixeln besteht.

Die Eingangsgröße für den Fototransistor ist die Beleuchtungsstärke E_p , die von dem Monitor auf ihn einfällt. Nach den radiometrischen Grundgesetzen ergibt sich hieraus bei der fixen Anordnung zwischen Monitor und Sensor eine lineare Abhängigkeit zwischen E_p und der Strahldichte des Monitors L_M [BG10; BPF16]. Zusätzliche Einflussgrößen sind die Polarisierung des Lichts am LCD-Monitor und vor allem die Winkelabhängigkeit des Monitors [Pet06]. Da diese Parameter modellspezifisch sind und von der Positionierung des Konverters vor dem Monitor abhängig sind, werden diese als Ganzes durch eine photometrische Kalibrierung erfasst.

Photometrische Kalibrierung des Aufbaus

Nachdem in diesem Kapitel bisher das Verhalten von Widerstand und Ansteuerung modelliert wurde, gilt es nun den Konverter gezielt so anzusteuern, dass definierte Intensitätswerte angezeigt werden können. Dazu wird eine photometrische Kalibrierung realisiert, indem die Kennlinien von Monitor und Konverter ermittelt werden, um so auf den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße schließen zu können. Die Eingangsgröße ist hier das digitale Eingangssignal I_i des ansteuernden Monitors und die Ausgangsgröße ist die resultierende beobachtbare Temperatur an den einzelnen Pixeln. Ist die Kennlinie des Systems bekannt, kann damit eine lineare Ansteuerung realisiert werden.

Einerseits ist die Kennlinie von dem Verhalten des Konverters selbst abhängig. Nach (4.13) ist hierbei für den statischen Betrieb mit einer quadratischen Abhängigkeit zwischen der Beleuchtungsstärke des Sensors und der resultierenden Temperatur zu erwarten. Auf der anderen Seite beeinflusst die in der Regel nichtlineare Kennlinie des ansteuernden Monitors selbst auch die Kennlinie des Gesamtsystems.

Dem Ansatz aus [Pet06] folgend, wird daher hier für den Monitor ein Korrekturwert Δl_i zur Ansteuerung ermittelt, sodass für jedes Eingangssignal l_i des Monitors der korrigierte Wert $l_i + \Delta l_i$ in einem möglichst linearen Ausgangssignal resultiert:

$$l_i \mapsto l_i + \Delta l_i, \quad i = 0, \dots, 255. \quad (4.14)$$

Bei einer typischen Intensitätsauflösung von 8 Bit benötigt man demnach 256 Korrekturwerte. Hier wird dieser Ansatz für das Gesamtsystem, bestehend aus Monitor und Konverter, erweitert, indem als Ausgangssignal nicht die Leuchtstärke des Monitors, sondern die beobachtete Temperatur an den Pixeln des Konverters genommen wird. Zur Ermittlung der Kennlinie wird der Monitor schrittweise mit allen Intensitätswerten angesteuert und die Temperatur eines Pixels als Ausgangssignal mit der Wärmebildkamera erfasst. Dadurch erhält man die Kennlinie des Systems, quasi als Übertragungsfunktion von digitalem Eingangssignal auf die dargestellte Temperatur auf dem Konverter. Normiert man Eingangs- und Ausgangssignal auf den gleichen Wertebereich, erhält man die Korrekturfunktion 4.14 als Umkehrfunktion der ermittelten Kennlinie.

In Versuchen zeigt sich, dass die Kalibrierung der Kennlinie sich für einzelne Pixel zwar umsetzen lässt, aber auch für jedes Pixel separat geschehen muss, da durch Bauteil- und Fertigungstoleranzen jedes Pixel eine andere Charakteristik aufweist, wie in Abbildung 4.6b zu sehen ist. Durch die in Kapitel 4.1.3 angesprochene thermische Abhängigkeit der Verstärkungsfaktoren h_{FE} und g_P der Halbleiter, entsteht eine Rückkopplung sowie eine Abhängigkeit von benachbarten Pixeln, sodass hier nicht einfach ein additiver Korrekturwert angewendet werden kann. Darauf wird auch nochmal in Kapitel 4.2.2 eingegangen. Während zwar die oben vorgestellte Kalibrierung zur Linearisierung der Kennlinie angewendet wurde, wird eine pixelweise fotometrische Kalibrierung zur Anzeige von Grauwerten im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

4.2 Ergebnisse

Mit dem Prototypen des spektralen Konverters aus Kapitel 4.1.1 wurde mit einem einfachen Testaufbau die Eignung als Mustergenerator für die Deflektometrie getestet. Abbildung 4.5 zeigt den Aufbau mit dem Prototypen des Konverters vor einem herkömmlichen LCD-Monitor. Mit seitlich angebrachten Lüftern werden durch einen Luftstrom zwischen Konverter und Monitor

beide Komponenten gekühlt, ohne das Muster auf der Frontseite zu stark zu beeinträchtigen. Damit sollen hier die Ansteuerung getestet und die Eignung als Mustererzeuger für die Deflektometrie evaluiert werden.

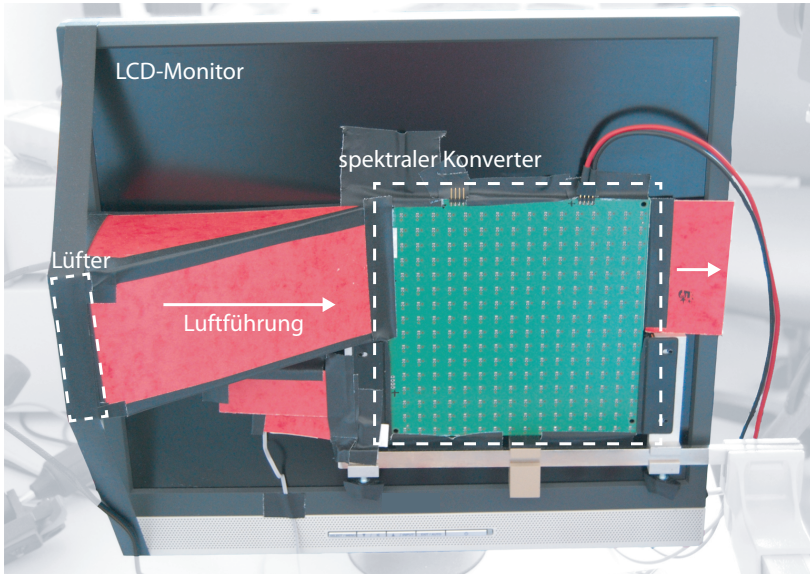


Abbildung 4.5: Versuchsaufbau mit dem spektralen Konverter. Der Prototyp hat eine Größe von 16 Pixeln Breite und 16 Pixeln Höhe, mit einer Auflösung von 1 Pixel pro 10 mm. Die Ansteuerung erfolgt durch einen herkömmlichen LCD-Monitor direkt hinter dem Prototypen des Konverters. Um die entstehende Wärme wieder abzuführen, wird der Konverter durch einen Luftstrom zwischen Platine und dem Monitor gekühlt.

Auf eine Untersuchung der Fehler und Genauigkeit der Codierung wird an dieser Stelle verzichtet, da die Auflösung des Konverters für eine Bewertung noch zu gering ist und da durch den, mit den im Rahmen der Arbeit zur Verfügung stehenden Mitteln, schwer zu kontrollierenden thermischen Prozess am Prototypen, die Ergebnisse noch zu großen Schwankungen unterworfen sind. Die entstehenden Fehler bei der Registrierung sind dementsprechend hoch. Eine objektive Bewertung von Messungen mit einem spektralen Konverter oder ähnlichen Mustererzeuger sollte daher mit einem nach den hier gewonnenen Erkenntnissen und den Empfehlungen aus Kapitel 4.3 weiter entwickelten Aufbau erfolgen. Für eine Einschätzung des zu erwartenden Fehlers bei der Positionscodierung sei auf [Kna06] und [Pet06] verwiesen, die bereits den Ein-

fluss der Quantisierung durch Pixel an herkömmlichen LCD-Monitoren bei der Mustererzeugung für die Deflektometrie untersucht haben. Bei der Nutzung von Phasenschiebe- oder binären Codierv Verfahren lassen sich die Ergebnisse entsprechend auch auf den spektralen Konverter anwenden, um die idealen Parameter der Mustererzeugung und die Fehler bei der Positionsermittlung zu bestimmen.

Als Testobjekt wurde ein metallbedampfter Oberflächen-Parabolspiegel mit einem Durchmesser von 152mm untersucht, der in weiteren Kapiteln noch zum Vergleich der Verfahren herangezogen wird. Durch die begrenzten Abmessungen der Anzeigefläche begünstigt die vergrößernde Abbildung des Spiegels hier Inspektion insofern, dass eine vollständige Abdeckung durch das Codemuster gegeben ist¹.

4.2.1 Positionscodierung am Widerstandsarray

Zur Positionscodierung kam bei den Versuchen eine Graycode Binärcodierung zum Einsatz (siehe Kapitel 3.1.1) [Wah84]. Auch wenn mit dem Konverter generell Graustufenmuster angezeigt werden können, zeigt sich der Konverter bei der Erzeugung von Intensitätsabstufungen in den Versuchen als zu schwer zu kontrollieren. Hauptsächlich ist dies auf den temperaturabhängigen Verstärkungsfaktor der Transistoren in der Ansteuerung zurückzuführen, der schon in Kapitel 4.1.3 angesprochen wurde. Da sich deren Verstärkungsfaktor bei Erwärmung erhöht, erhält man hier eine Rückkopplung, wenn die Transistoren nicht ausreichend gekühlt werden können. Dadurch entsteht ein »Lawineneffekt«, bei dem sich die Pixel stetig weiter erwärmen und sich kein stabiler Zustand einstellt. Dazu kommt noch das unterschiedliche Verhalten einzelner Pixel durch Toleranzen bei den Werten der Bauteile und durch die Fertigung. Ein Beispiel für das Ergebnis dieser Effekte ist in Abbildung 4.6b zu sehen, wo neben der abweichenden Charakteristik einzelner Pixel, zur Mitte hin die hohe Dichte aktiver Pixel zu einer stärkeren Erwärmung und damit zu dem oben erwähnten Lawineneffekt führt. Da bei der Darstellung von Binärcodes Intensitätsunterschiede der einzelnen Pixel in geringem Umfang ignoriert werden können, wurden hier Graycodes verwendet.

1 Die verwendete Kamera ist in dieser Konfiguration bereits bei ihrer minimalen Fokusdistanz, sodass keine weitere Vergrößerung durch Verringerung des Abstands möglich war.

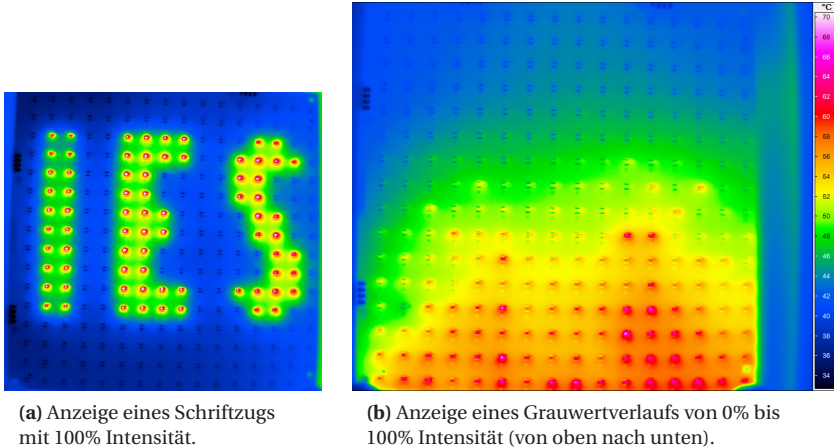


Abbildung 4.6: Vergleich der Anzeige von binären mit kontinuierlichen Mustern (nach 8 Sekunden Einschaltzeit). Während bei binären Bildern die unterschiedliche Charakteristik der Pixel keinen großen Einfluss hat (a), zeigt sich bei der Anzeige von graduellen Intensitätswerten die Abweichung der Pixel untereinander (b).

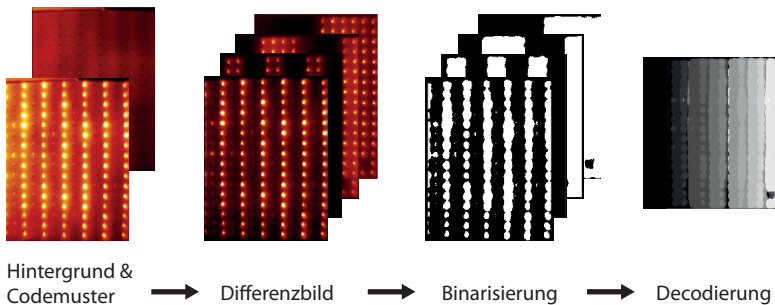


Abbildung 4.7: Decodierung von binären Codemustern am Widerstandarray. Vor der Anzeige von einem Codemustern wird ein Referenzbild des Hintergrunds aufgenommen. Von jedem Codebild wird der Hintergrund subtrahiert und die resultierenden Differenzbilder mit einem Schwellwert binarisiert. Die Binärwerte werden pixelweise als Graycode decodiert. (siehe Kapitel 4.2.1)

Binarisierung der Muster

Die Anzeige von Mustern mit dem Widerstandarray wird stets von der Wärmestrahlung des Hintergrunds überlagert. Restwärme von vorher angezeigten Mustern oder die Wärmestrahlung des ansteuernden Monitors, äußern sich mindestens als Kontrastminderung oder gar als überlagerndes, störendes Bild für das aktuell angezeigte Muster.

Um eine robustere Binarisierung der Muster zu erreichen, wird vor der Anzeige eines Einzelbildes einer Mustersequenz jeweils ein Referenzbild $I_{n,\text{Ref}}$ des Hintergrundes aufgenommen. Anschließend wird das nächste Bild der Mustersequenz angezeigt und eine Aufnahme I_n des Musters gemacht. Durch subtrahieren des Referenzbildes erhält man ein Differenzbild, dass der tatsächlichen Intensitätserhöhung entspricht, wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist.

Die Binarisierung erfolgt darauf anhand eines Schwellwertes s_{bin} für den beobachteten Temperaturanstieg. Dieser Wert wird so gewählt, dass bei der verwendeten maximalen Intensität und der Diffusion während der Anzeigezeit noch eine gute Separierung zwischen angezeigtem Muster und Hintergrund erfolgt. Für jede Aufnahme des Musters I_n erhält man so ein Binärbild B_n mit:

$$B_n(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } I_n(x, y) - I_{n,\text{Ref}}(x, y) > s_{\text{bin}} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.15)$$

Die einzelnen Binärbilder liefern wiederum jeweils ein Bit für die Graycodesequenz, die jede Zeile, beziehungsweise Spalte des Konverters codiert. Aus der Decodierung der Bitsequenz B_0, \dots, B_n für jeden Kamerapixel (x, y) erhält man die beobachtete Position (\tilde{u}, \tilde{v}) auf der Anzeigefläche und damit die gesuchte Registrierung:

$$D_{\tilde{u}}(x, y) = \text{graycode}(B_0(x, y), B_1(x, y), \dots, B_n(x, y)), \quad (4.16)$$

wobei die Auswertung für jedes Pixel separat erfolgt.

4.2.2 Thermisches Verhalten des Mustergenerators

Die größte Herausforderung beim Betrieb des Prototypen ist die Kontrolle der Erwärmung und Abkühlung der Anzeigefläche für die Anzeige eines Bildes.



Abbildung 4.8: Foto des untersuchten Spiegels. Es handelt sich um einen metallbedampften Parabolspiegel mit 152 mm Durchmesser und einer Brennweite von 1524mm.

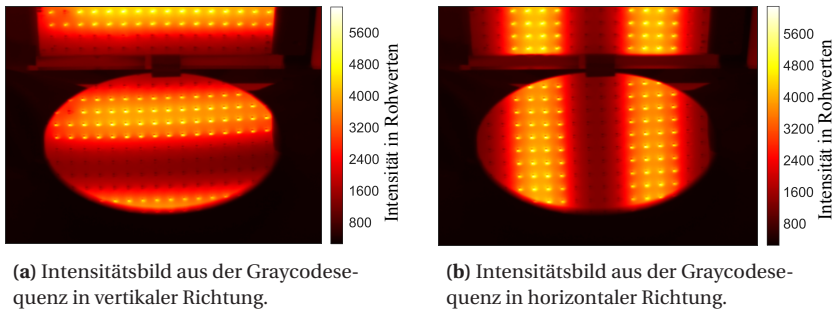
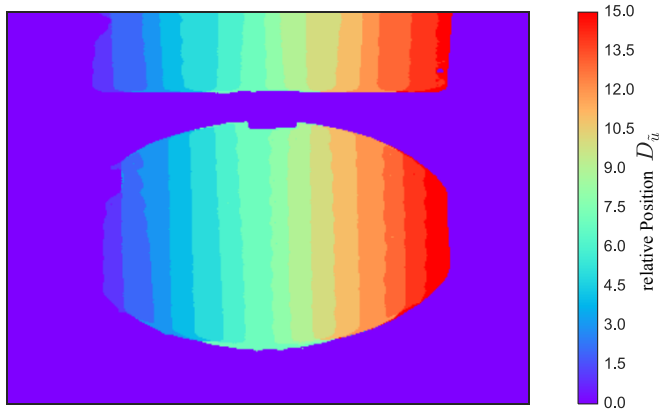
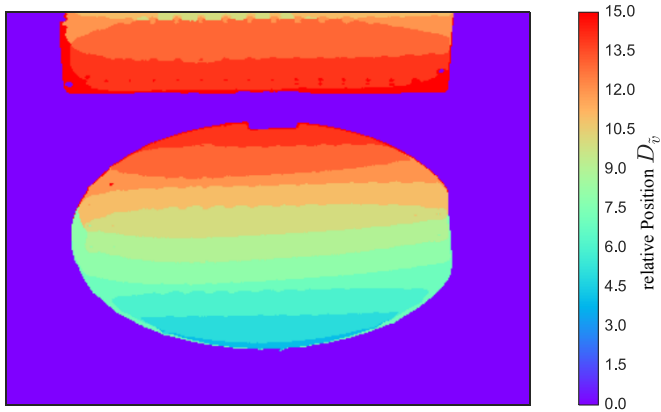


Abbildung 4.9: Einzelbilder aus der Graycodesequenz. Eine Codesequenz besteht jeweils aus vier Bildern mit horizontalen und vertikalen Streifencodes. Prüfbild ist der Spiegel aus Abbildung 4.8. Am oberen Rand ist im Bild noch der Konverter zu sehen.

Für die hier gezeigten Versuche wird das Array mit 20 V Betriebsspannung betrieben, wobei pro Pixel bis zu 800 mW Verlustleistung anfallen. Die Maximaltemperatur der Widerstände beträgt dabei 80 °C. Bei den üblichen Codemustern in der Deflektometrie kann man davon ausgehen, dass immer die Hälfte der maximalen Leistung am Array verbraucht wird. Entweder durch Binärmuster, wie sie hier verwendet wurde, bei denen genau die Hälfte aller Pixel aktiv ist oder bei Sinusmustern, bei denen die Durchschnittliche Intensität in der Regel auch die Hälfte der Maximalintensität beträgt.



(a) Decodierte relative Position $D_{\tilde{u}}$ in horizontaler Richtung.



(b) Decodierte relative Position $D_{\tilde{v}}$ in vertikaler Richtung.

Abbildung 4.10: Decodierung der Graycodesequenz bei einem Parabolspiegel als Prüfobjekt. Da bei dem Demonstrator die Widerstände die Fläche nicht vollständig abdecken, zeigt sich deren Form als Unregelmäßigkeit in der Decodierung. Der gebogene Verlauf der Bereiche in Abbildung 4.10b ist hier nur teilweise durch den gebogenen Spiegel, jedoch vorwiegend durch verlaufende Streifenmuster aufgrund der Wärmediffusion auf dem Mustergenerator bedingt.

Mit 128 zugleich aktiven Pixeln fällt bei dem verwendeten Konverter also rund 100 W Verlustleistung als Wärme an. Bei der engen Kopplung von Monitor und spektralem Konverter ist zusätzlich zu beachten, dass der Monitor selbst noch Wärme erzeugt. Dadurch entsteht bei beiden Komponenten ein zusätzlicher Wärmeeintrag.

Nach der Musteranzeige ist eine Kühlung des Konverters notwendig, um wieder ein dunkles Bild zu erhalten, also den Konverter wieder auf die Ausgangstemperatur (in der Regel Raumtemperatur) runter zu kühlen. Steht genügend Zeit zur Verfügung, kann dies einfach durch Warten geschehen oder wie in Abbildung 4.5 zu sehen, durch einen Luftstrom. Weitere Möglichkeiten werden auch noch in Kapitel 4.3.1 diskutiert.

Die Bildanzeige sollte daher auch möglichst kurz gehalten werden, da mit der elektrischen Verlustleistung immer mehr Wärmeenergie anfällt, die wieder abgeführt werden muss. Außerdem kann eine kontrastreiche Musteranzeige nur für kurze Zeit, in der Regel wenige Sekunden, aufrecht erhalten werden, da die kontinuierliche Wärmediffusion zu einem »Zerlaufen« der Bilder führt. Dies ist vor allem in Abbildung 4.10b zu sehen, wo die Wärmediffusion und der Wärmetransport durch Konvektion zu einem »Ausbeulen« der Muster führt. Für den hier verwendeten Demonstrator ist dieser Effekt teilweise noch erwünscht, da durch die Diffusion die inaktiven Bereiche zwischen den heizenden Widerständen auch als abstrahlende Fläche genutzt werden können. Im längeren Betrieb oder für eine kontrastreiche Musteranzeige ist dieser Effekt aber hinderlich, da die Wärmediffusion zu einem Übersprechen zwischen den Pixeln führt.

Gravierend ist bei dem Betrieb des Konverters auch das Problem der mechanischen Belastung durch die Kombination von Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Anzeige von kontrastreichen Mustern sorgt einerseits für starke, lokale Temperaturunterschiede und der dynamische Betrieb bei wechselnden Mustern zu schnellen Temperaturänderungen über die Zeit, sodass hier mit einer starken mechanischen Belastung an allen Materialübergängen zu rechnen ist.

Dies zeigt sich beim Betrieb des Prototypen am Ausfall einzelner Pixel durch gebrochene Lötstellen. In geringem Maße lässt sich beim Platinenlayout die Form der Leiterbahnen so planen, dass mechanischer Stress minimiert wird, jedoch ist es für weitere Entwicklungen des Konzepts ratsam, von herkömmlichen Widerständen als Heizelement abzusehen. In Kapitel 4.3.3 wird auf ein besseres Design der Heizelemente noch einmal gesondert eingegangen.

4.3 Ausblick

In diesem Kapitel wurde das Konzept eines spektralen Konverters vorgestellt, der als Erweiterung eines herkömmlichen Monitors dessen Bild vom sichtbaren in das thermische Infrarotspektrum umwandelt. Der vorgestellte Prototyp des Konverters realisiert eine niedrig aufgelöste Version dieses Konzepts und ermöglicht es die Eigenschaften eines solchen Konverters zu evaluieren und die Eignung für den Einsatz in der Deflektometrie zu testen. Für die Umsetzung des Prototyps konnten jedoch nicht alle Designparameter berücksichtigt werden oder fielen erst im Rahmen der Versuche auf. Im Folgenden sollen daher die Auswirkungen dieser Designparameter diskutiert werden und Hinweise zum Aufbau eines thermischen IR-Mustergenerators auf Basis eines Widerstandsrays geliefert werden.

4.3.1 Kühlung des Konverters

Wie die Versuche in Kapitel 4.2.2 zeigen, ist eine ausreichende Kühlung des Konverters notwendig, um einen thermisch stabilen Betrieb zu gewährleisten. Nur wenn die in die Pixel eingebrachte Wärme wieder abgeführt werden kann, ist es möglich für Bildwechsel die Pixel wieder »dunkel« zu schalten.

Zur Kühlung des Konverters kommt der Wärmetransport über Konvektion oder Kontakt in Frage. Konvektive Kühlung in Form eines konstanten Luftstroms bietet zwar eine signifikante Kühlleistung, jedoch ist es schwierig, eine gleichmäßige Kühlung über den gesamten Mustergenerator zu gewährleisten. Wird der Luftstrom über die Vorderseite entlang der heizenden Widerstände geleitet, äußert sich dies im Wärmebild als ein überlagernder Temperaturgradient und lokalen Fluktuationen der Temperatur durch Turbulenzen. Bei einer Kühlung durch einen Luftstrom zwischen Monitor und Konverter, wie sie bei den Versuchen in Kapitel 4.2 verwendet wurde, war mit einfachen Mitteln nur bei Mustern mit wenigen aktiven Pixeln eine ausreichende Kühlung zu erreichen. Hier ist auch zu erwarten, dass es bei einem großflächigem Konverter schwieriger wird für eine ausreichende und gleichmäßige konvektive Kühlung durch Luft zu sorgen. Um eine adäquate Kühlung des Konverters zu erreichen muss ein anderer Träger statt einer Platine benutzt werden, der es ermöglicht die Wärme abzuführen. Metalle bieten sich hierfür als gute Wärmeleiter an. Sie sorgen für eine bessere Verteilung der Wärme und ermöglichen es zusätzlich Wärme über einen Wärmestrom hin zum Rand des Konverters abzuführen. Dies birgt

jedoch auch die Gefahr eines stärkeren Übersprechens zwischen benachbarten Pixeln, da mit der besseren Leitfähigkeit eine schlechtere thermische Isolation untereinander einhergeht.

Bei einer hinreichend dicken Ausführung der Trägermaterials, kann der Konverter außerdem intern mit einer Wasserkühlung ausgestattet werden. Durch die hohe Wärmekapazität des Wassers wird so eine hohe Kühlleistung durch eine interne konvektive Kühlung ermöglicht.

4.3.2 Ansteuerung der Heizelemente

Das in Kapitel 4.1.3 vorgestellte Konzept ermöglicht eine einfache Ansteuerung des Widerstandarrays durch einen herkömmlichen Monitor, ist dabei jedoch nicht nur auf Monitore beschränkt. Durch den gekachelten Aufbau des Konverters lässt sich dessen Größe theoretisch beliebig erweitern und ist dabei nur durch die Größe des Monitors begrenzt. Für größere Anzeigeflächen können strukturierte Lichtquellen zur Ansteuerung verwendet werden, wie beispielsweise Projektoren oder LED-Videowände, wobei jedoch der Vorteil der einfachen Erweiterung eines herkömmlichen Deflektometrieaufbaus verloren geht.

Multiplexen der Ansteuerung

Neben der Art der Signalquelle für den Betrieb des Konverters, gibt es auch Alternativen und Erweiterung zur Ansteuerung der Widerstände als Heizelemente selbst. Ein alternatives Verfahren zu der in Kapitel 4.1.3 und Kapitel 4.1.4 beschriebenen Ansteuerung als Konverter vor einem Monitor, ist das reihen- und zeilenweise Ansteuern der individuellen Pixel mit einem *Multiplexen* der Stromversorgung. Diese Form der Ansteuerung ist auch üblich beim Betrieb von Mikrowiderstandarrays in der IRSP und auch bei Displaytechnologien im sichtbaren Spektrum ist das Multiplexen von Arrays aus Lichtquellen oder -modulatoren das vorherrschende Verfahren zur Ansteuerung.

Anstatt jedes Pixel mit einer eigenen Schaltung zu versehen, erfolgt hierbei die Ansteuerung über eine Leistungselektronik, die jeweils eine ganze Reihe und Spalte des Widerstandarrays direkt ansteuert. Die einzelnen Pixel werden dabei zyklisch abwechselnd betrieben. Teilen sich beispielsweise N Pixel eine Leitung zur Ansteuerung, beträgt der *Tastgrad*, das Verhältnis zwischen

Einschalt- und Periodendauer, maximal $1/N$. Um dennoch den gleichen Energieeintrag wie bei einer konstanten Energieversorgung zu erzielen, werden sie mit der N -fachen Leistung betrieben, sodass über die Zeit integriert die gleiche Energie anfällt. Damit dieser gepulste Betrieb nicht sichtbar wird¹, muss nachfolgend eine Form von Tiefpassfilterung für eine Glättung des Signals sorgen. Bei herkömmlichen Displays und Projektoren wird beispielsweise die Trägheit des menschlichen Auges ausgenutzt, sodass der Eindruck einer flimmerfreien Darstellung entsteht. Im Falle des Widerstandarrays sorgt die Trägheit des thermischen Heiz- und Abkühlprozesses für diese Filterung. Betrachtet man das thermische Modell in Abbildung 4.3 analog zu einer elektrischen Schaltung, so bilden die RC-Glieder aus $R_{\text{th},F}$ und $C_{\text{th},F}$ einen Tiefpassfilter. Überschreitet die Impulsfrequenz des Multiplexens deutlich die Grenzfrequenz aus (4.9), sorgt dieser Tiefpassfilter für ein gleichmäßiges, thermisches Intensitätssignal an dem abstrahlenden Widerstand.

Für ein Array aus Widerständen mit einer Ansteuerung durch Multiplexen reduziert sich die Schaltung des Arrays auf den heizenden Widerstand und eine zusätzliche Diode pro Pixel. Die Stromversorgung erfolgt über reihen- und zeilenweise Durchkontaktierung der einzelnen Pixel, wodurch jedes Pixel individuell angesteuert werden kann, siehe Abbildung 4.11.

Da die Schaltung zur Ansteuerung selbst nicht auf der Trägerplatine untergebracht werden muss, kann die Platine nur noch einseitig bestückt werden. Ohne den Monitor als Signalquelle ist so die Rückseite der Platine frei um beispielsweise Kühlkörper zu installieren, sodass der Wärmefluss über Kontaktkühlung abgeführt werden kann.

Die Ansteuerung des Widerstandarrays durch Multiplexen ist allerdings ein von Grund auf anderes Konzept, verglichen mit dem Aufbau eines spektralen Konverters und erfordert die Konzeption einer neuen Ansteuerung. Dadurch ginge auch der Vorteil verloren, einen herkömmlichen Deflektometrieaufbau einfach umrüsten zu können.

1 Im Falle einer Kamera werden periodische Intensitätsschwankungen der Lichtquelle als Interferenz zwischen der Aufnahme Frequenz der Kamera und der Modulationsfrequenz der Lichtquelle sichtbar.

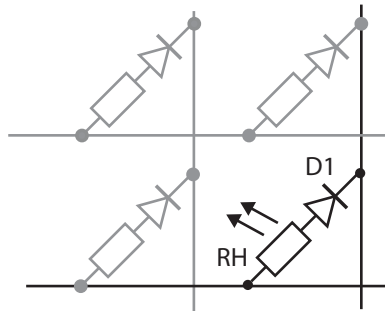


Abbildung 4.11: Schaltung für die Ansteuerung der einzelnen Pixel des Mustergenerators durch reihen- und zeilenweises Multiplexen. Die Schaltung auf der Platine reduziert sich auf einen Widerstand und eine Diode pro Pixel, wodurch eine einseitige Bestückung möglich ist. Eine Leistungselektronik (hier nicht abgebildet) steuert jeweils die Zeilen und für die Spalten nacheinander an, wobei die Erwärmung durch die Dauer des Stromimpulses kontrolliert werden kann.

Ansteuerung mit Rückkopplung

Die direkte Ansteuerung durch Multiplexen des Widerstandarrays bietet außerdem die Möglichkeit, die Temperatur einzelner Widerstände messen zu können, da deren spezifischer, elektrischer Widerstand temperaturabhängig ist. In den inaktiven Phasen beim Multiplexen der Ansteuerung, kann der aktuelle Widerstand einzelner Widerstände gemessen werden, um so auf deren Temperatur zu schließen. Dies lässt sich ausnutzen, um eine Rückkopplung für die Ansteuerung zu ermöglichen. Obwohl sich in [Wil92b] Hinweise auf diese Rückkopplung für die Ansteuerung von IRSP finden, ist derzeit kein System bekannt, das dieses Verfahren einsetzt.

Schnellere Dynamik durch Übersteuern

Ein besseres dynamisches Verhalten, genauer gesagt eine schnellere Anstiegszeit bei der Erwärmung einzelner Widerstände, lässt sich durch das kurzzeitige, gezielte Übersteuern der Widerstände erreichen. Nach Gleichung (4.8) hängt die Geschwindigkeit der Temperaturerhöhung nur noch von der eingebrachten Wärmeleistung \dot{Q}_{th} ab, wenn die materialspezifischen Parameter R_{th} und C_{th}

einmal festgelegt sind. Für eine kürzere Heizphase wird der Widerstand kurzzeitig mit einem höheren elektrischen Strom betrieben, um bei Erreichen der Zieltemperatur mit einem niedrigeren Betriebsstrom die Temperatur konstant zu halten.

Um diese Ansteuerung mit dem spektralen Konverter umzusetzen wird dieser mit einer erhöhten Betriebsspannung betrieben, sodass bei Ansteuerung mit maximaler Intensität, der dadurch höhere Stromfluss einen schnelleren Temperaturanstieg erzielt. Da der Monitor nur eine begrenzte Intensitätsauflösung hat, wird dadurch der obere Teil des zur Verfügung stehenden Dynamikbereichs geopfert und es steht eine verringerte Auflösung für den statischen Betrieb zur Verfügung. Für die Anzeige von binären Codemustern bedeutet dies jedoch keine Einschränkung. Die maximale Spannung, und damit die erreichbare Geschwindigkeitssteigerung, wird dabei nur durch Spezifikation der Bauteile begrenzt.

Bei der Ansteuerung durch Multiplexen des Widerstandarrays aus dem vorherigen Abschnitt kann das Übersteuern einfach durch eine höhere Betriebsspannung und Anpassen der Pulslänge umgesetzt werden.

Das Übersteuern beschleunigt jedoch nur die Aufheizphase der Widerstände. Um insgesamt schnellere Bildwechsel zu ermöglichen, muss auch die Abkühlphase verkürzt werden, was durch einen geringen thermischen Widerstand zwischen Widerstandsfilm und Trägermaterial und einer ausreichenden Kühlung zum Abführen der Wärme erreicht wird.

4.3.3 Design der Heizelemente

Bei dem in diesem Kapitel vorgestellten thermischen Mustergenerator werden herkömmliche SMD-Widerstände als thermische IR-Lichtquellen zweckentfremdet. Dementsprechend kann hier durch ein auf die Anwendung optimiertes Design der Heizelemente die Effizienz des spektralen Konverters verbessert werden. Betrachtet man die einzelnen Teile des Modells aus Kapitel 4.1.2, finden sich mehrere Parameter zur Optimierung.

Einfluss der Temperatur

Einerseits erkennt man aus Gleichung (4.2), dass die abgestrahlte Wärmeleistung von dem Emissionsgrad ε und vor allem der Temperatur T_F des Wider-

standsfilms an der Oberfläche abhängt. Der Emissionsgrad des Strahlers lässt sich durch ein anderes Material für die Heizelemente oder eine zusätzliche Beschichtung der Widerstände verbessern. Heizelemente aus einem anderem Material, wie beispielsweise Quarzstrahler, lassen sich auch mit deutlich höheren Temperaturen betreiben, sodass hier ein höherer Wirkungsgrad erzielt wird.

Einfluss des Füllfaktors

Des weiteren zeigt Gleichung (4.5), dass die Effizienz der einzelnen Pixeln von deren effektivem Füllfaktor abhängt. Während die aktive Fläche der Elemente bei einem Aufbau mit SMD-Komponenten durch die Bauform der Komponenten und den benötigten Platz für Lötstellen begrenzt ist, kann durch ein angepasstes Design der Füllfaktor verbessert werden. Angelehnt an den Aufbau aktueller Mikrobolometersensoren (siehe Kapitel 3.4.1) kann die aktive Fläche beispielsweise vergrößert werden, indem jedes Heizelement einen wärmeleitenden Aufsatz erhält, der die Pixelfläche möglichst vollständig überdeckt. So wird die Wärme von dem Widerstandsfilm als Wärmequelle über die ganze Fläche verteilt. Effektiv erhöht sich dadurch aber auch die Wärmekapazität des Elements und führt zu einem zusätzlichen thermischen Widerstand zwischen Wärmequelle und abstrahlender Fläche, sodass abzuwägen ist, ob diese Erweiterung nicht Designzielen an anderer Stelle entgegenwirkt. Der effektive Füllfaktor eines Pixels kann auch durch die Integration eines Reflektors verbessert werden, wie sie auch bei einer Variante der Mikrowiderstandarrays (siehe Kapitel 2.2.2) eingesetzt wurden. Dabei wird die inaktive Fläche des Pixels mit reflektierenden Flächen gefüllt, welche die seitliche und rückwärtige Streustrahlung der Heizelemente nach vorne gerichtet reflektieren. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass die Reflektoren auch störende Wärmequellen in der Umgebung in das Bild reflektieren.

Einfluss des thermischen Widerstands

Da für den Betrieb als IR-Mustergenerator nur der Wärmetransport über Strahlung von Interesse ist, lässt sich die Effizienz steigern, indem der Verlust von Energie über konkurrierende Wege des Wärmetransports minimiert wird. Um den Wärmetransport über Konvektion niedrig zu halten, ist es generell notwendig, einen bewegten Luftstrom entlang der Heizelemente zu vermeiden.

Darüber hinaus kann durch eine Schutzgasatmosphäre der Wärmetransport im Vergleich zu Luft verringert oder idealerweise durch eine Vakuumatmosphäre vollständig unterbunden werden. In beiden Fällen ist jedoch eine gasdichte Einhausung des Mustergenerators und eine großflächige, IR-durchlässige Abdeckung nötig.

Ein maßgeblicher Anteil des Wärmestroms fällt auf den Wärmetransport durch Kontakt, der den thermischen Widerstand zwischen Widerstandsfilm und Trägermaterial überwinden muss. Aus (4.6) ist ersichtlich, dass sich durch einen höheren thermischen Widerstand die nötige Leistung zum Erwärmen eines Heizelements reduzieren lässt. Andererseits erhält man dadurch aber auch ein trägeres Verhalten der Heizelemente, da nach (4.7) ein höherer thermischer Widerstand in einer größeren Zeitkonstanten für das dynamische Verhalten des Widerstands als Heizelement resultiert. Dem lässt sich entgegenwirken, indem man die Wärmekapazität des Heizelements reduziert, die nach (4.6) keinen Einfluss auf die nötige Leistung im stabilen, statischen Zustand hat. Ein nach diesen Maßgaben ideales Heizelement besitzt demnach einen möglichst hohen thermischen Widerstand, bei einer möglichst geringen Wärmekapazität. Der Aufbau einzelner Pixel von Mikrobolometersensoren und Mikrowiderstandarrays zeigt die praktische Umsetzung einer solchen Optimierung. Hier wird die Masse des aktiven Elements gering gehalten und der Kontakt zum Trägermaterial auf das Nötigste, in dem Falle der Mikroarrays zwei dünne Kontakte für den Stromfluss, reduziert. Für eine effiziente Bildanzeige sollte außerdem die Wärmeleitung in lateraler Richtung möglichst gering sein, um ein Übersprechen zwischen Pixeln zu verhindern, aber dennoch eine Wärmeleitung in die Tiefe ermöglichen, um die Pixel kühlen zu können.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Konzept eines spektralen Konverters vorgestellt, mit dem ein herkömmlicher Monitor für das thermische IR-Spektrum umgerüstet werden kann. Die Idee wurde anhand eines Prototypen demonstriert, der in Form einer optoelektronischen Schaltung aus Standardkomponenten aufgebaut werden kann. Dazu wurden in Kapitel 4.1 die Parameter aufgezeigt, die bei dem Aufbau eines solchen Konverters als Mustergenerator zu beachten sind und im Ausblick wurden Hinweise zum weiteren Ausbau des Konzepts gegeben. Bei den Versuchen in Kapitel 4.2 konnte der Aufbau eines deflektometrischen

Sensors mit dem Konverter demonstriert werden. Wenn auch noch durch die Auflösung des Prototypen eingeschränkt, zeigt sich dennoch, dass sich eine deflektometrische Registrierung praktikabel umsetzen lässt. Die Versuche ergaben auch zugleich wichtige Hinweise, die für zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich zu beachten sind.

Der spektrale Konverter zeigt sich insgesamt als ein einfach zu realisierender Ansatz für einen thermischen Mustergenerator. Dabei ist die Anwendung nicht nur auf den Einsatz vor einem Monitor beschränkt, sondern könnte auch mit anderen Bildgebern, wie Projektoren oder Videowänden zum Einsatz kommen. Durch die flache, modulare Bauform kann damit ein Mustergenerator flexibel in unterschiedlichen Geometrien aufgebaut werden, sodass die Mustererzeugung an die Anforderungen verschiedener Inspektionsaufgaben angepasst werden kann.

5

Dynamische Mustererzeugung mittels Laserlicht

In diesem Kapitel wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem mit einem Laser die nötigen Codemuster für eine deflektometrische Messung auf eine Projektionsfläche aufgebracht werden. Im Gegensatz zu einer Projektion wird jedoch nicht die an der Oberfläche gestreute Strahlung betrachtet, sondern die Oberfläche der Projektionsfläche soll durch die absorbierte Laserstrahlung gezielt erwärmt werden. Das anzuzeigende Muster entspricht der emittierten Wärmestrahlung, wodurch eine dynamische Erzeugung thermischer Muster ermöglicht wird, siehe Abbildung 5.1. Grundlage für diesen Ansatz ist ein im Patent [BHW09] vorgestelltes Verfahren. Jedoch findet sich in der Literatur bisher kein Hinweis auf eine praktische Umsetzung eines solchen Verfahrens zur Oberflächenprüfung.

Neben dem Aufbau des Systems zur Mustererzeugung werden in diesem Kapitel auch drei Ansätze zur Positionscodierung mittels der thermischen Muster vorgestellt. Dabei ist die Zielsetzung, die für eine deflektometrische Messung notwendige Registrierung zwischen Kamera und Musteranzeige zu realisieren. Dabei wird jeder Punkt der Musteranzeige anhand seines charakteristischen zeitlichen Intensitätsverlaufs identifiziert.

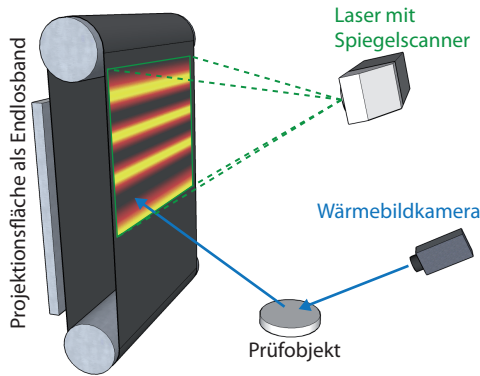


Abbildung 5.1: Konzept zur Mustererzeugung mittels Laserlicht.

5.1 Versuchsaufbau

Um die Eignung für die Deflektometrie im thermischen Infrarot zu testen, wurde die oben vorgestellte Idee zur Mustererzeugung in einem Versuchsaufbau umgesetzt (siehe Abbildung 5.2). Dafür wird, neben dem Laser zur Erzeugung der thermischen Muster, eine geeignete Projektionsfläche sowie eine Wärmebildkamera benötigt.

5.1.1 Laser und Steuerung

Laserquelle und Optik

Zur Mustererzeugung kommt ein Laserbearbeitungssystem *LS-8CE70M* von *LS-Systems* zum Einsatz, das zum Beschriften und Schneiden von Materialien konzipiert ist. Die Laserquelle ist ein 80 W CO₂-Laser mit einer emittierten Wellenlänge von 10,6 µm. Zur Erzeugung eines stabilen Laserstrahls muss die Laserquelle mit minimal 20% der spezifizierten Maximalleistung betrieben

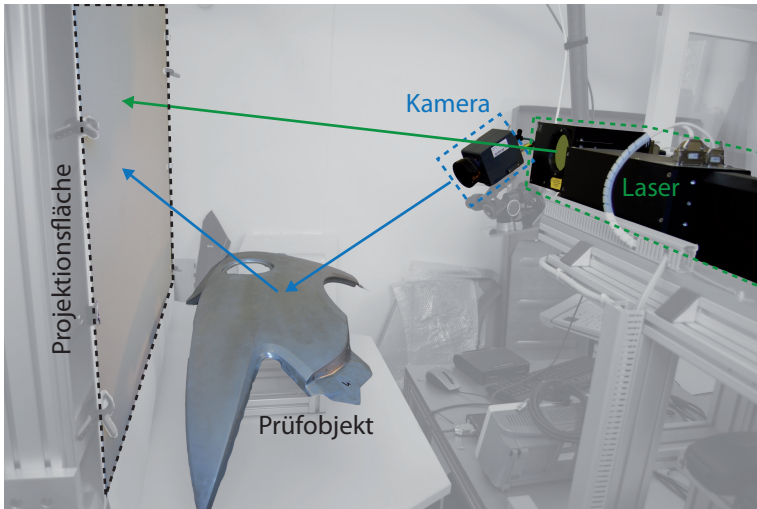


Abbildung 5.2: Versuchsaufbau zur Mustererzeugung mittels Laserlicht. Die Projektionsfläche wird durch die absorbierte Laserstrahlung gezielt erwärmt. Die Wärmebildkamera betrachtet die Reflexion der emittierten Wärmestrahlung auf der zu untersuchenden Oberfläche.

werden. Der parametrierbare Leistungsbereich beschränkt sich daher auf eine Leistung von etwa 16 W bis 80 W¹.

Der Rohstrahl wird vor der Fokussierung zunächst aufgeweitet, wobei der Laser hier unscharf auf die Projektionsfläche einstrahlt. Dadurch erhält man einen breiteren Strahl zum Schreiben der Muster und die damit einhergehende geringere Intensität des Laserstrahls auf der Oberfläche vermeidet Beschädigungen der Projektionsfläche. Mit dem verwendeten System lässt sich so eine nutzbare Spotgröße von maximal 10 mm erzielen. Bei weiterer Aufweitung des Strahls wird die Form des Laserspots durch *Lasermodes* höherer Ordnung dominiert, sodass ein unregelmäßiges und nicht deterministisches Profil entsteht [Hüg09].

Mittels eines 2-Achsen Spiegelscanners kann der Laserstrahl auf der Arbeitsfläche mit einer maximalen Geschwindigkeit von 10 m/s positioniert werden.

¹ Die tatsächliche Ausgangsleistung kann geringfügig höher sein und ist abhängig von Betriebstemperatur und Alter der Laserröhre. Die angegebenen Werte entsprechen den Spezifikationen aus dem Datenblatt.

Die Steuerung erlaubt eine vektorbasierte Bewegung des Lasers auf der Arbeitsebene, während Laserleistung und Arbeitsgeschwindigkeit parametrisiert werden können. Nach einer initialen Kalibrierung der Arbeitsebene, sorgt die Lasersteuerung intern für den Ausgleich von Verzerrungen, die durch die Arbeitsweise des Spiegelscanners entstehen. Dabei wird auch die perspektivische Abbildung berücksichtigt, sodass die Ansteuerung in absoluten, metrischen Koordinaten auf der zuvor kalibrierten Arbeitsebene erfolgt. Um Schäden an der Projektionsfläche durch zu hohe Temperaturen zu vermeiden, wurde die Geschwindigkeit für die Mustererzeugung auf ein Minimum von 0,5 m/s begrenzt¹.

Steuerung des Lasers

Das Laserbearbeitungssystem besitzt einen dedizierten Steuerrechner und wird über eine eigene, proprietäre Softwareumgebung programmiert. Die grafische, Kontrollfluss-orientierte Programmiersprache ermöglicht eine, für den Laserbetrieb notwendige, sichere Programmierung der Lasersteuerung.

Die Berechnung der Koordinaten für die Mustererzeugung erfolgt in dieser Softwareumgebung. Dabei wird auch ein Taktsignal zur Synchronisation mit der Bildaufnahme generiert, auf das in Kapitel 5.1.2 genauer eingegangen wird. So ist gewährleistet, dass alle zeitkritischen Routinen lokal auf der Hardware der Lasersteuerung laufen. Das auswertende Bildverarbeitungssystem schickt nur Parameter und Steuerbefehle über eine Netzwerkschnittstelle an den Steuerrechner (siehe Abbildung 5.3).

Bei den vorgestellten Verfahren werden einfache Linienmuster zur Codierung verwendet, welche in Kapitel 5.1.4 behandelt werden.

5.1.2 Kamera

In dem hier benutzten Aufbau kommt eine Kamera mit Mikrobolometersensoren zu Einsatz, wie sie eingangs in Kapitel 3.4.1 beschrieben wurde. Für den vorgestellten Ansatz erfordert der Aufbau eine Synchronisation von Kamera und

¹ Die Grenzwerte für die maximale thermische Belastung des Materials der Projektionsfläche wurden durch Versuche an Materialproben ermittelt.

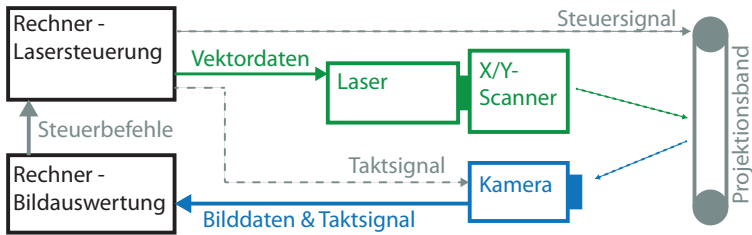


Abbildung 5.3: Steuer- und Datenfluss der einzelnen Komponenten untereinander. Die Lasersteuerung übernimmt zeitkritische Funktionen, während die Bildauswertung rechenintensive Aufgaben handhabt. Das Taktsignal der Mustererzeugung wird von der Kamerahardware als Metainformation zu den Bilddaten geliefert.

Lasersystem. Außerdem muss die Kamera vor direkter Laserstrahlung geschützt werden, weshalb zusätzliche Schutzfilter notwendig sind.

Synchronisation mit der Lasersteuerung

Einige der Ansätze zur Positionscodierung erfordern die Kenntnis der aktuellen Position des Lasers auf der Projektionsfläche. Daher ist eine Kopplung zwischen Lasersteuerung und Bildaufnahmesystem notwendig. Versuche mit einer Synchronisation in Software über die Netzwerkschnittstelle beider Systeme ergaben keine hinreichende Synchronisation, da die Latenz der Verbindung zu große Schwankungen (*Jitter*) aufweist. Während sich eine konstante Latenz noch durch einen Offset korrigieren lässt, muss der Jitter so klein gehalten werden, dass das Taktsignal deterministisch einem Einzelbild zugeordnet werden kann. Daher wurde unter den Gegebenheiten der verwendeten Komponenten eine möglichst hardwarenahe Synchronisation realisiert. Auf Vorschläge für eine ideale Lösung zur Synchronisation wird in Kapitel 5.6.2 noch eingegangen.

Um die Latenz und Jitter des Signals möglichst gering zu halten, wurde ein Trigger-Eingang der Kamera direkt mit der Lasersteuerung verbunden (siehe Abbildung 5.3). Darüber erhält die Kamera den Zeilentakt des Lasers, der von der Hardware in dem Bilddatenstrom als Metainformation eingebettet wird. So wird eine möglichst geringe Latenz und Jitter gewährleistet. Die Hardware setzt dafür pro Bild ein Bit mit dem Status des Eingangs, weshalb Aufzeichnung auf die Integrationszeit der Einzelbilder quantisiert ist. Die Synchronisation

kann so bei der Auswertung der Bilddaten aus dem eingebetteten Taktsignal und dem Zeitstempel der Einzelbilder gewonnen werden.

Zusätzlich wird der Zeilentakt des Lasers so justiert, dass er ein Vielfaches der Aufnahme Frequenz der Kamera ergibt. Durch die Charakteristik der mechanischen Bewegung des Spiegelscanners, ergibt sich dieser Gleichtakt von Kamera und Mustererzeugung nur bei einigen, experimentell zu ermittelnden Geschwindigkeiten des Laserspots. Wenn nicht anders spezifiziert, verwenden die hier gezeigten Aufnahmen eine Geschwindigkeit des Laserspots von 1026 mm/s, bei der eine synchrone Mustererzeugung stattfindet, wobei sich eine beobachtbare Temperaturerhöhung von etwa 10 Kelvin ergibt. Bei bekannter Schreibgeschwindigkeit des Laser lässt sich so aus den aufgezeichneten Daten zu jedem Einzelbild die aktuelle Position des Laserspots ermitteln. In Kapitel 5.2 wird mit diesem zusätzlichen Taktsignal der erste Schritt einer Positionscodierung realisiert.

Sperrfilter gegen Laserstrahlung

Die Wellenlänge des CO₂-Lasers liegt mit 10,6 μm in dem Empfindlichkeitsbereich der Wärmebildkamera im LWIR-Spektrum. Daher kann die Laserstrahlung ungehindert die Optik der Kamera passieren und den Sensor beschädigen. Bei der Leistung des verwendeten Lasers kann selbst indirekte Strahlung durch Reflexion oder Streuung an einer Oberfläche den Sensor zerstören. Für den Betrieb im gleichen Arbeitsbereich ist die Kamera daher mit einem Bandblockfilter für den Wellenlängenbereich von 9 – 11 μm ausgestattet. Die der Transmissionsgrad für diesen Bereich wird mit null angegeben und mit der Temperaturauflösung der Kamera ist auch keine Reststrahlung feststellbar. In allen Bildern in diesem Kapitel und für die von der Kamera aufgenommenen Daten ist folglich zu berücksichtigen, dass vorwiegend nur die Erwärmung der Oberfläche durch die Absorption der Laserstrahlung zu sehen ist.

Der blockierte Wellenlängenbereich und der Transmissionsgrad des Filters von durchschnittlich etwa $\tau = 0,7$ haben eine temperaturabhängige Dämpfung des von der Kamera gemessenen Intensitätssignals zur Folge. Das Maximum der spektralen Ausstrahlung für die verwendeten Temperaturen nach (3.6) liegt mit etwa 9 μm gerade an der Grenze des blockierten Wellenlängenbereichs, weshalb die Dämpfung nicht zu gravierend ausfällt. Da bei den in diesem Kapitel verwendeten Verfahren zur Auswertung nur die gemessene relative Temperaturerhöhung relevant ist, wurde keine photometrische Kalibrierung zur Korrektur

der gemessenen absoluten Temperatur vorgenommen. Dennoch ist zu beachten, dass die Kamera dadurch niedrigere Temperaturen, beziehungsweise Intensitätswerte misst.

Eine Möglichkeit das Problem zu umgehen, wäre einen Laser mit anderer Wellenlänge zu benutzen. Da die Optik der Kamera für das sichtbare und NIR-Spektrum undurchlässig ist, für deren Wellenlängenbereiche eine Vielzahl verschiedener Lasertechnologien verfügbar sind, ist die Auswahl an Alternativen groß. Dennoch fiel hier die Wahl auf ein CO₂-Lasersystem. Verglichen mit Lasern anderer Wellenlängen ermöglichen CO₂-Laser bei gleicher Laserleistung eine kompaktere Bauweise und sind erheblich kostengünstiger. Zudem lassen sich für die Wellenlänge von 10,6 µm die Laserschutzrichtlinien einfacher umsetzen, da die Laserstrahlung von herkömmlichem Glas absorbiert wird.

5.1.3 Arbeitsfläche des Lasers

Um die Bildfrequenz der Anzeige zu erhöhen, ist die Projektionsfläche als Endlosband ausgelegt. Wurde ein Muster angezeigt, kann das Band weiter bewegt werden und das nächste Muster der Sequenz geschrieben werden, während das vorherige Muster auf der Rückseite abkühlt. Damit kann die Wartezeit bis zum vollständigen Abkühlen des Muster eingespart werden. Das Endlosband besitzt eine eigene Motorsteuerung und kann über den Steuerrechner des Lasers kontrolliert werden.

Bei dem Material für die Arbeitsfläche waren die primären Auswahlkriterien die Bauform als Endloslaufband und die Eignung für die Bestrahlung mit dem Laser. Für den Aufbau wurde daher herkömmliches Bandmaterial für Transportbänder verwendet, das möglichst temperaturbeständig ist und ohne Bedenken mit dem Laser bestrahlt werden kann¹.

Des Weiteren wurde die engere Auswahl an Materialien hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften und ihres Absorptionsgrades untersucht. Die Wahl fiel auf ein schwer entflammbares Bandmaterial aus Polyestergewebe, das durch eine raue Gewebeoberfläche eine möglichst gute Absorption der Laserstrahlung

1 Bei der Benutzung einer Projektionsfläche aus Kunststoff ist unbedingt auf die chemische Zusammensetzung des Materials zu achten. Für die verwendeten Materialien ist zu überprüfen, ob sie unter Wärmeeinwirkung oder bei Entflammung gesundheitsschädliche Dämpfe entwickeln können!

ermöglicht. Es bietet im Vergleich mit anderen Materialien eine geringere Wärmeleitfähigkeit, sodass die Diffusion eingebrachter Wärmemuster möglichst gering ausfällt.

5.1.4 Mustererzeugung mit dem Laser

Ausgangspunkt für die Mustererzeugung aller hier vorgestellter Verfahren ist ein Linienmuster, welches entweder horizontal oder vertikal von dem Laser auf die Projektionsfläche geschrieben wird.

Abbildung 5.4 zeigt die wichtigsten Parameter der Mustererzeugung. Sie lässt sich parametrisieren anhand der Breite und Höhe (w, h) des Musters und dem Abstand der Linien ℓ . Zusätzlich lässt sich die Geschwindigkeit des Laserspots v_L und die Laserleistung P_L vorgeben, wovon die Intensität des Musters und die Geschwindigkeit der Mustererstellung abhängt. Für die Mustererzeugung wurde der Laser hier stets mit maximaler Leistung betrieben. Der Durchmesser des Laserspots ω und damit auch die Breite der Laserlinie wird durch die Fokussierung des Laserstrahls festgelegt und bleibt nach der Kalibrierung der Arbeitsebene (siehe Kapitel 5.1.1) unverändert.

In den folgenden Darstellungen wird stets ein Muster mit einer horizontalen Linienrichtung benutzt. Dabei kann die Mustererzeugung und die folgende Decodierung natürlich ohne Einschränkungen auch in vertikaler Richtung erfolgen und wird vor allem in Kapitel 5.4 auch sinnvoller Weise so eingesetzt.

Diese Form des Musters wurde hier aufgrund der einfach zu realisierenden Berechnung in der Steuersoftware des Lasers und zur Umsetzung der Synchronisierung aus Kapitel 5.1.2 während des Zeilenrücklaufs (siehe Abbildung 5.4) gewählt. Alternative Muster zur Codierung werden noch in Kapitel 5.6.1 behandelt.

5.1.5 Einschränkungen durch den Aufbau

Während die Ergebnisse die Eignung des Lasers zur Erzeugung thermischer Codemuster zeigen, gibt es zwei Einschränkungen des Aufbaus, die der Realisierung beliebiger Konfigurationen von Kamera und Projektionsfläche im Wege stehen. Dies äußert sich vor allem bei der Inspektion großflächiger Prüfbjekte.

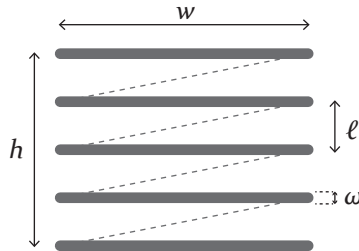


Abbildung 5.4: Vom Laser geschriebenes Muster und Parameter für Mustererzeugung. Hier am Beispiel eines horizontalen Linienmusters. Das Muster kann je nach verwendeter Codierung auch vertikal geschrieben werden. Gestrichelte Linien zeigen Bewegungen ohne aktiven Laser, wobei die Mustererzeugung unten rechts startet.

Tiefenschärfe der Kamera

Ein generelles Problem bei der Verwendung von Wärmebildkameras ist die eingeschränkte Verfügbarkeit von Optiken. Dabei sind meist nur wenige Brennweiten mit fester Blende und kleiner Blendenzahl erhältlich. Während sich bei einer gegebenen Brennweite das Blickfeld durch eine geeignete Wahl des Abstandes anpassen lässt, äußert sich die kleine Blendenzahl der und damit einhergehende geringe Tiefenschärfe bei Aufnahmen in der Deflektometrie als problematisch. Die hier verwendeten Optik mit einer Blendenzahl von 1,0 hat effektiv einen Tiefenschärfebereich von 65 mm, in dem Strukturen von $1 \frac{\text{Perioden}}{\text{mm}}$ aufgelöst werden können (siehe auch Kapitel 6.1.2).

In der Standardkonfiguration für einen herkömmlichen Deflektometrieaufbau wird die Kamera auf die zu untersuchende Oberfläche fokussiert, um eine möglichst hohe laterale Auflösung der Oberfläche zu erzielen. Alternativ fokussiert die Kamera auf das Codemuster, wodurch eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Oberflächenneigung erzielt wird, jedoch auf Kosten einer geringeren lateralen Auflösung. Um einen Kompromiss aus beiden Konfigurationen zu erhalten, kann auch zwischen die zu untersuchende Oberfläche und das Codemuster fokussiert werden. Außerdem kann eine höhere Tiefenschärfe durch eine große Blendenzahl erzielt werden, sodass möglichst Oberfläche und Codemuster im Tiefenschärfebereich liegen. Die damit verbundene geringere Lichtempfindlichkeit des Kamerasystems kann in der Regel durch eine längere Belichtungszeit kompensiert werden. Optiken für Wärmebildkameras sind jedoch meist auf fixe Blendengrößen mit kleinen Blendenzahlen beschränkt,

um eine möglichst hohe Temperaturempfindlichkeit zu erzielen. Eine einfache, improvisierte Lösung wäre das Anbringen einer zusätzlichen (Loch-)Blende vor der Optik der Kamera. Das Verbesserungspotential mit einer solchen externen Blende wurde für den Aufbau untersucht, jedoch konnte damit nicht die gewünschte Verbesserung erzielt werden. Die geringere Lichtempfindlichkeit durch die kleine Blende wiegt hierbei den Vorteil einer größeren Tiefenschärfe wieder auf. Da im Falle der Mustererzeugung mit dem Laser die das Muster nur kurzzeitig und nicht statisch zur Anzeige kommt, kann nicht analog zur herkömmlichen Deflektometrie das Codemuster länger belichtet werden.

Eine Lösung in Kombination mit der oben erwähnten zusätzlichen Blende wäre, ein Muster mit höherer Intensität zu benutzen. Dies kann einerseits im geringen Umfang durch die Optimierung des Materials der Projektionsfläche erzielt werden oder durch eine größere Leistung des benutzten Lasers (siehe Kapitel 5.6.2).

Arbeitsraum des Lasers

Zum Arbeiten auf der Projektionsfläche benötigt der Laser ein freies Sichtfeld zur Projektionsfläche. In dem Aufbau, wie er in Abbildung 5.2 zu sehen ist, können daher weder Kamera noch Prüfobjekt in Projektionsbereich zwischen Laser und Projektionsfläche positioniert werden. Prüfobjekte können daher in der Regel nur unterhalb dieses Bereiches platziert werden, während die Kamera von einer Position seitlich, außerhalb des Arbeitsbereiches auf die zu prüfende Oberfläche gerichtet ist.

In einer idealen Position für die Kamera nach [Wer11; HRW13], treffen die Sichtstrahlen nach der Reflexion an der Oberfläche möglichst senkrecht auf die Anzeigefläche des Codemusters. Dadurch erfahren alle Sichtstrahlen eine vergleichbare laterale Auslenkung auf der Projektionsfläche und durch den gleichen Abstand fällt die Weichzeichnung durch die Tiefenunschärfe für alle Pixel ungefähr gleich aus. Bei dem schrägen Blickwinkel auf die Projektionsfläche fällt diese Weichzeichnung unterschiedlich aus. Dies äußert sich je nach Betrachtungswinkel der Kamera, in einer unterschiedlichen Weichzeichnung des Musters, da für jeden Sichtstrahl der Kamera der Abstand von Fokusebene zur Projektionsfläche unterschiedlich ausfällt.

Dieses Problem ließe sich durch eine Änderung des Aufbaus lösen, beispielsweise durch eine Rückseitenprojektion auf die Projektionsfläche, wie sie in Kapitel

5.6.2 vorgestellt wird. Ein weitere Möglichkeit wäre eine andere Optik für das Lasersystem, sodass der Laser keine zentrale Position frontal zur Projektionsfläche mehr benötigt und von einer seitlichen Position auf der Arbeitsfläche agieren kann.

5.2 Registrierung durch Synchronisation

Der erste Ansatz zur Positionscodierung mit dem Laser, nutzt die Kenntnis der genauen Position des Laserspots zu jedem Zeitpunkt einer Bildaufnahme.

5.2.1 Verknüpfen von Bildindex und Laserposition

Bei dem hier benutzten Aufbau wird dazu das oben erwähnte Taktsignal der Mustererzeugung ausgewertet. Durch Anpassen der Zeilenfrequenz an die Aufnahme Frequenz der Kamera wird eine gleichbleibende Schrittweite des Laserspots je aufgenommenen Bild erreicht¹. Die Synchronisierung kann durchaus auch auf anderem Wege erfolgen, wie beispielsweise einer engeren Integration von Bildaufnahme und Mustererzeugung, wobei die Vektordaten der Laserposition direkt eingebettet werden. Eine weitere Möglichkeit wäre eine zweite, synchronisierte Kamera, welche die aktuelle Position des Laserspots auf der Projektionsfläche direkt aufnimmt.

Unabhängig von der Art der benutzten Synchronisation von Bild und Positionsdaten, lässt sich diese als eine Zuordnung vom Zeitpunkt der Bildaufnahme t auf die relative Position (\tilde{u}, \tilde{v}) des Zentrums des Laserspots auf der Musteranzeige beschreiben:

$$\tilde{p} : t \longrightarrow (\tilde{u}, \tilde{v}). \quad (5.1)$$

Aus dem Bildindex n erhält man den Zeitpunkt $t = n t_1$ durch Multiplikation mit der Integrationszeit t_1 der Kamera. Dadurch ist in dem Beispiel aus Abbildung 5.4 die relative Position für \tilde{u} in Schreibrichtung durch die Schrittweite des Laserspots während der Integrationszeit eines Einzelbildes quantisiert. Dagegen

¹ Zumindest für die hier verwendeten Mustergrößen. Für längere Zeiträume bei der Erstellung deutlich größerer Muster ist mit einem Drift der Frequenzen zu rechnen.

erfährt die Position \tilde{v} eine Quantisierung durch den Abstand der geschriebenen Zeilen unabhängig von der Integrationszeit der Kamera.

Die tatsächliche Position, in absoluten Koordinaten, erhält man, indem man die relative Position (\tilde{u}, \tilde{v}) wieder mit den Parametern der Mustererzeugung verknüpft. So lässt sich auch eine Zuordnung von Bildindizes auf die tatsächlichen, metrischen Koordinaten (u, v) herstellen:

$$p: t \mapsto (u, v), \quad (5.2)$$

wobei u aus der Geschwindigkeit des Laserspots v_L und der Integrationszeit der Kamera t_I berechnet wird:

$$u = \tilde{u} v_L t_I \quad (5.3)$$

und v aus dem Linienabstand ℓ des Musters:

$$v = \tilde{v} \ell. \quad (5.4)$$

5.2.2 Registrierung von Sensorpixeln zu Musterposition

Um die Position des Laserspots im Kamerabild zu ermitteln, wird davon ausgegangen, dass der heißeste Punkt auf der Projektionsfläche der aktuellen Position entspricht. Für jedes Pixel (x, y) der Bildsequenz I wird der Bildindex n ermittelt, bei dem das Pixel die maximale Intensität aufweist. Die Funktion F_{amax} liefert dafür den gesuchten Index

$$F_{\text{amax}}(x, y) = \underset{n}{\operatorname{argmax}} I(x, y, n). \quad (5.5)$$

Die Zuordnung D , welche jedem Kamerapixel die beobachtete Schirmposition zuordnet, erhält man aus der Synchronisierung durch Einsetzen in \tilde{p}

$$D_{\tilde{u}, \tilde{v}}(x, y) = \tilde{p}(F_{\text{amax}}(x, y) t_I). \quad (5.6)$$

Analog dazu erhält man die metrische Position (u, v) durch einsetzen in p .

Genau genommen erreicht ein Punkt auf der Projektionsfläche seine maximale Temperatur, nachdem der Laserspot ihn passiert hat und so entsprechen die Pixel maximaler Intensität den Punkten direkt hinter der tatsächlichen Position. Wenn man die Position als den Mittelpunkt des Laserspots auffasst, muss

die Position in Schreibrichtung daher noch um den halben Durchmesser des Laserspots $-\omega/2$ korrigiert werden.

5.2.3 Ergebnisse der Registrierung durch Synchronisation

Abbildung 5.5 zeigt das Ergebnis der Registrierung bei direkter Sicht auf die Projektionsfläche. Man erkennt in Abbildung 5.5a wie $D_{\tilde{v}}$, die vertikalen Koordinaten der Decodierung $D_{\tilde{u},\tilde{v}}$, die Position in diskreten Schritten codiert, wobei die Auflösung von dem Linienabstands ℓ des geschriebenen Musters abhängig ist. Außerdem zeigt Abbildung 5.5b die horizontalen Koordinaten in Schreibrichtung $D_{\tilde{u}}$, welche ebenfalls auf diskrete Schritte beschränkt sind und deren Auflösung sich aus der Schrittweite des Lasers pro Einzelbild $v_L t_1$ ergibt.

Somit lässt sich umgekehrt mit diesen Parametern auch die Auflösung der Registrierung erhöhen, indem man mit kleinerem Durchmesser des Laserspots dichtere Linien schreibt und mit einer langsameren Schreibgeschwindigkeit kürzere Schritte pro Einzelbild macht. Die bessere Auflösung erfordert dabei eine längere Dauer für die Mustererzeugung. Auf diese Weise eine Fläche von 1 m auf 1 m, mit einer Auflösung von 10 mm in beide Richtungen zu codieren, würde 200 Sekunden dauern, wobei nur ein Durchlauf notwendig ist.

Die schnellste Möglichkeit mit dieser Registrierung eine Projektionsfläche vollständig abzudecken ist, sich nur auf die Zeileninformation der Synchronisation zu beschränken und horizontale sowie vertikale Richtung in einem eignen Durchlauf zu codieren. Die Geschwindigkeit v_L des Lasers kann dabei bis zu einem Limit von $v_L \leq \omega / t_1$ erhöht werden, sodass während der Integrationszeit der Kamera genau eine Zeile geschrieben wird. Unter den gleichen Voraussetzungen wie auch zuvor, dauert so die Codierung einer 1 m auf 1 m großen Fläche, bei 10 mm Auflösung, mit zwei Durchläufen nur 20 Sekunden.

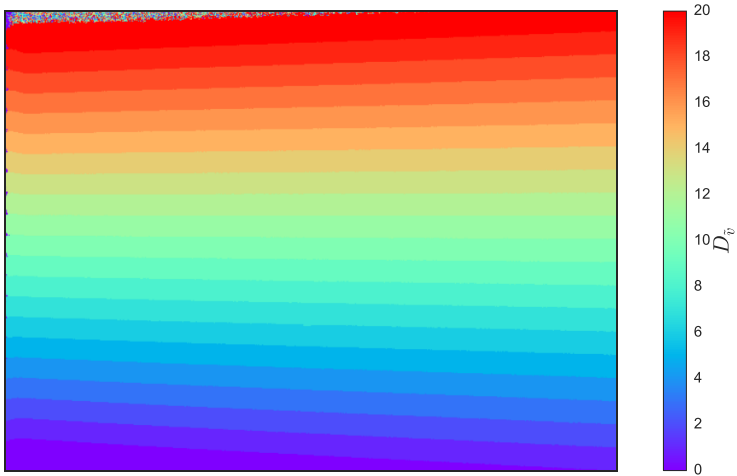
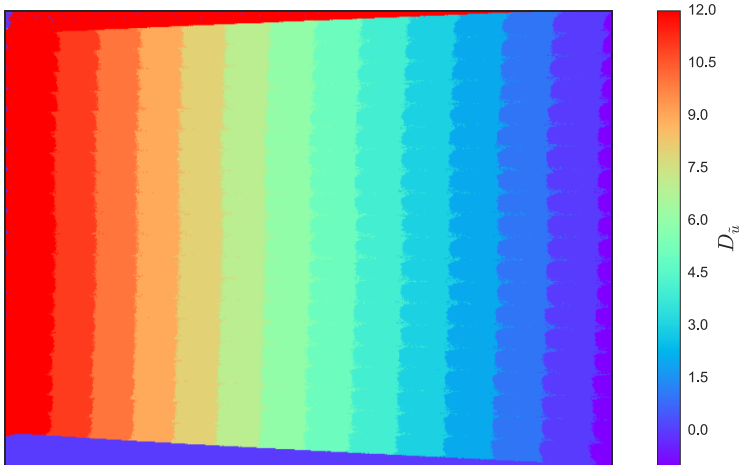
(a) Registrierung zu einzelnen Zeilen D_v .(b) Registrierung zu Einzelschritten pro Zeile D_u .

Abbildung 5.5: Ergebnis der Registrierung von Kamerapixel auf Positionen auf der Projektionsfläche durch Hardwaresynchronisierung von Bildaufnahme und Mustererzeugung. Die Kamera blickt direkt auf die Projektionsfläche, bei einer Auflösung von 640×480 Pixeln. Auf der Fläche wurde ein 20 cm auf 20 cm großer Bereich mit dem Verfahren aus Kapitel 5.2 codiert.

5.3 Positionscodierung über das thermische Profil

Für die vorherige Registrierung in Kapitel 5.2 wurde die Annahme getroffen, dass sich die Position des Laserspots in einem Maximum über die Bildserie äußert. Betrachtet man aber eine Momentaufnahme des Laserspots im Detail, wie Abbildung 5.6 zeigt, erkennt man deutlich ein Intensitätsprofil, dass durch den bewegten Laserstrahl auf der Oberfläche entsteht. Das zuvor angenommene Maximum fällt also für jedes Pixel unterschiedlich aus, je nachdem welchen Teil des Profils und zu welchem Zeitpunkt man es beobachtet.

Im nächsten Schritt soll die Kenntnis eben dieses Temperaturprofils des Laserspots zur Positionscodierung herangezogen werden. Auf Basis der in Kapitel 5.2 vorgestellten diskreten Registrierung ermöglicht das thermische Verhalten über die Zeit eine feinere Bestimmung der Position. In diesem Abschnitt wird dazu das Profil in Schreibrichtung benutzt, um die Schritte der zuvor bestimmten Registrierung $D_{\bar{u}}$ weiter unterteilen zu können.

5.3.1 Modell für das thermische Muster

Um aus den gemessenen Intensitätswerten auf eine Position innerhalb des Temperaturprofils schließen zu können, wurde ein Modell für den Temperaturverlauf der Oberfläche bei Bestrahlung mit einem Laser gesucht, das es ermöglicht, von dem beobachteten Temperaturprofil auf eine Position schließen zu können.

Ideales Temperaturmodell

Das Standardmodell aus der Laserstrahlbearbeitung, das nach [Hüg09] den Gegebenheiten des Aufbaus am besten entspricht, ist ein *bewegter Gaußstrahl auf einer unendlich ausgedehnten Scheibe*. Man erhält ein 4-dimensionales Modell der Wärmeverteilung, über die drei Raumachsen im Volumen des bestrahlten Körpers und über die Zeit, bei dem sich um den Laserspot eine quasi-stationäre Temperaturverteilung bildet, die dem Laserspot folgt. Hierbei werden konvektive und radiative Wärmeverluste vernachlässigt und konstante Stoffwerte für

die Oberfläche angenommen. Ziel ist es, anhand des beobachteten Temperaturverlaufs eines Pixels aus diesem Modell mittels Optimierungsverfahren die Position auf der Oberfläche zu rekonstruieren.

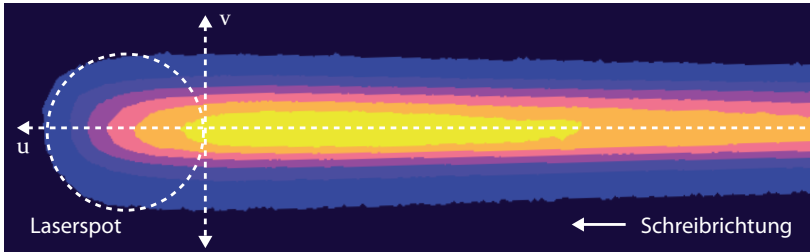


Abbildung 5.6: Temperaturprofil des bewegten Laserspots auf der Projektionsfläche aus einer Nahaufnahme mit der Wärmebildkamera.

Eine physikalisch korrekte Modellierung des Temperaturprofils über die Zeit würde, neben der genauen Kenntnis der Materialkonstanten und der Charakteristik des Laserstrahls, eine Simulation des thermischen Diffusionsprozesses erfordern. In Anbetracht des Ziels der Arbeit, der Realisierung einer Positionscodierung mit dem Laser, ist die Modellierung mit einem vereinfachten Temperaturmodell aus der Literatur ausreichend.

Zudem wird die Verwendung eines vollständigen Modells in [Hüg09] nur empfohlen, wenn eine dreidimensionale Modellierung des Prozesses notwendig ist. Bei den hier gegebenen Voraussetzungen wird die Approximation mit einem vereinfachten, eindimensionalen Modell vorgeschlagen. Auf die Verwendung eines komplexeren Modells oder alternativer Ansätze wird in Kapitel 5.6.1 noch eingegangen.

Modellannahmen

Strahlform des Lasers

Für einen Laserstrahl hoher Güte wird die Strahlform des Lasers als eine zweidimensionalen Gaußverteilung angenommen. Bei dem verwendeten Lasersystem wurde durch unscharfe Fokussierung der Strahl so weit wie möglich aufgeweitet, wobei sich in der Praxis zeigt, dass der Strahl eine Mischung von unterschiedlichen Moden ist und mehrere Intensitätsmaxima aufweist.

Bei der kurzen Einwirkzeit des Lasers auf jeden Punkt der Oberfläche im Verhältnis zu der zeitlichen Auflösung der Kamera, ist die Form des Strahls für eine vereinfachte Betrachtung jedoch nicht von Relevanz. Die Intensität des Laserstrahls bei der Bewegung über einen Punkt wird hier über die Zeit als Rechteckimpuls mit gleich verteilter Intensität angenommen. Dabei ist der Wärmeeintrag der gleiche wie bei der tatsächlichen, unbekannten Strahlform und ein geringfügiger Fehler im vorhergesagten Temperaturverlauf wird in Kauf genommen.

Integrationszeit der Kamera

Selbst bei der niedrigsten bei der Mustererzeugung verwendeten Geschwindigkeit des Lasers ist die Integrationszeit der Kamera länger als die Aufheizphase eines Punktes auf der Oberfläche. Daher ist davon auszugehen, dass pro Pixel nur wenige Messungen das Temperaturprofil des vorbei ziehenden Laserspots erfassen.

Durch die Arbeitsweise der Deflektometrie ist mit nicht vorhersehbaren Verzerrungen der Abbildung zu rechnen, da die zu prüfende Oberfläche quasi ein optisches Element unbekannter Form darstellt. Im Extremfall erfährt der Sichtstrahl eines einzelnen Pixel eine andere Ablenkung wie die umliegenden Pixel und so ist es zwar wahrscheinlich, dass benachbarte Pixel auch auf der Projektionsfläche benachbarte Positionen betrachten, es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden.

Wird der deflektometrische Sensor in einer Konfiguration betrieben, bei der die Kamera auf die reflektierende Oberfläche fokussiert wird, führt dies zusätzlich zu einer unscharfen Abbildung des thermischen Musters auf der Projektionsfläche.

Die Decodierung der Position muss also mit einem zeitlich unterabgetasteten, isolierten Intensitätsprofil eines Pixels auf eine Position relativ zum Laserspot schließen können.

Trägheit des thermischen Prozesses

Bei dem für die Projektionsfläche verwendeten Material kommt die Trägheit des thermischen Prozesses auch einer Vereinfachung des thermischen Modells zu Gute. Das verwendete Kunststoffmaterial weist eine hohe Wärmekapazität, bei einer geringen Wärmeleitfähigkeit auf, sodass der thermische Diffusionsprozess vergleichsweise langsam verläuft. Für die hier im Folgenden betrachteten

Zeiträume von wenigen Einzelbildern der Kamera, ist die laterale Ausbreitung der Wärme daher vernachlässigbar, sodass das im folgenden Abschnitt vorgestellte Modell angenommen werden kann.

Vereinfachtes Temperaturmodell

Um eine Abschätzung für das thermische Verhalten der Oberfläche treffen zu können, wird hier unter den zuvor genannten Annahmen ein eindimensionales Modell für die Wärmeausbreitung angewendet werden. Dazu wird aus [Car08] das Modell eines *konstanten Wärmestroms auf einen halbbunendlichen Körper* angenommen.

Voraussetzungen

Nach [Hüg09] lässt sich bei der Laserstrahlbearbeitung die Temperatur in der Wechselwirkungszone durch ein eindimensionales Modell annähern, wenn die Diffusion der Wärme im betrachteten Zeitraum vernachlässigbar klein ist im Vergleich zur Ausdehnung der Zone. Hier soll diese Bedingung noch weiter eingeschränkt werden insofern, dass die betrachtete Zone der Beobachtungsbereich eines Kamerapixels ist.

Die Geschwindigkeit der Wärmeausbreitung wird durch die *Diffusionslänge* l_{th} als eine charakteristische Längendimension des Prozesses angegeben, die definiert ist als

$$l_{\text{th}} = 2\sqrt{\kappa t}. \quad (5.7)$$

Darin ist $\kappa = \lambda_{\text{th}}/(\rho_{\text{d}}c_{\text{p}})$ die Temperaturleitfähigkeit, λ_{th} die Wärmeleitfähigkeit, ρ_{d} die Dichte und c_{p} die spezifische Wärme je Masseneinheit. Die Diffusionslänge lässt sich veranschaulichen als die Strecke, die von einer Isotherme in der Zeit t zurückgelegt wird.

Der von einem Pixel auf der Oberfläche beobachtete Bereich sei vereinfacht angeben durch seinen Durchmesser d_{p} . Nach [Hüg09] muss für die Anwendbarkeit des Modells die Bedingung $l_{\text{th}}/d_{\text{p}} \ll 1$ erfüllt sein. Mit den thermischen Materialeigenschaften für die Projektionsfläche aus Stoffwerttabellen wie [Ste06] kann die Bedingung überprüft werden.

Für typische Stoffwerte bei dem im Aufbau verwendeten Material erhält man $\kappa \approx 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ und für t wird in (5.7) die Integrationszeit der Kamera

$t_l = 0,02$ s verwendet. Daraus ergibt sich eine Diffusionslänge von $l_{th} = 2,88 \cdot 10^{-5}$ m, als Schrittweite einer Isotherme pro Einzelbild. Nimmt man für eine typische Konfiguration des Aufbaus d_p mit 0,5 mm an, so erhält man

$$\frac{\lambda_{th}}{d_p} = 0,0576 \ll 1. \quad (5.8)$$

Bei den hier konservativ gewählten Parametern bedeutet dies, dass das Modell hier anwendbar ist, die Voraussetzungen aber nur für den Zeitraum von wenigen Einzelbildern gegeben ist. Damit wäre aber auf jeden Fall der Temperaturverlauf in der Aufheizphase bis zum Maximum durch das Modell erfasst.

Der Name des Modells weist noch auf zwei weitere Voraussetzungen hin. Ein *konstanter Wärmestrom* wird durch die zuvor getroffene Annahme gewährleistet, dass die Bestrahlung durch den Laser als ein Rechteckimpuls mit gleichverteilter Intensität über die Zeit erfolgt. Außerdem setzt das Modell einen *halbunendlichen Körper* voraus. Hier gilt wieder die gleiche Annahme, dass die Diffusionslänge l_{th} im Verhältnis zur Dicke des Materials (mit ≈ 5 mm) so klein ausfällt, dass die Wärme das Material in dem betrachteten Zeitraum nicht durchdringt und sich daher wie ein Körper mit unendlicher Ausdehnung in z -Richtung verhält.

Modell

Unter den gegebenen Annahmen beschreibt das eindimensionale Modell $T(z, t)$ die Temperaturverteilung über die Zeit t und die Eindringtiefe z in das Material, wobei die Wärmeleitung ausschließlich in die Tiefe erfolgt. Als Prozessparameter fließen dabei die Intensität der Laserstrahlung I_L , der Absorptionsgrad der Oberfläche α und die Stoffwerte des Materials mit ein. Weiterhin kann hier das Modell auf den Fall $z = 0$ eingeschränkt werden, da für die Erzeugung von IR-Mustern nur die abgestrahlte Wärme von der Oberfläche von Interesse ist.

Nach [Car08] liefert das Modell für die Erwärmung der Oberfläche $\Delta T(0, t)$ den Ausdruck

$$\Delta T(0, t) = \frac{\alpha I_L}{\lambda_{th}} \frac{l_{th}}{\sqrt{\pi}}. \quad (5.9)$$

Der Abkühlvorgang für $t > t_H$ nach einer Bestrahlungsdauer von t_H lässt sich ebenso beschreiben durch

$$\Delta T(z, t) = \frac{\alpha I_L}{\lambda_{th} \sqrt{\pi}} (l_{th} - l_{th}^*), \quad (5.10)$$

mit

$$l_{th}^* = 2 \sqrt{\kappa (t - t_H)}. \quad (5.11)$$

Die Voraussetzungen und Annahmen für dieses Modell schränken die Anwendung so weit ein, dass es für eine komplexe Modellierung des Prozesses nicht geeignet ist. Dennoch ist es ausreichend, um den Temperaturverlauf für den kurzen Zeitraum beim Passieren des Laserspots zu modellieren und zeigt welche Einflussgrößen zu berücksichtigen sind.

Interessant ist hier, dass alle Prozessparameter und Stoffwerte in dem Modell als lineare Faktoren mit einfließen. Unterschiedliche Werte der Parameter haben so nur eine Skalierung der Temperaturkurve zur Folge, während die charakteristische Form nur von der Bestrahlungsdauer abhängig ist.

Der aus dem Modell ersichtliche Zusammenhang der Parameter Bestrahlungsdauer, Intensität und Stoffwerten liefert zudem auch nützliche Hinweise zur Optimierung des Prozesses. Zum Beispiel zeigt das Modell, dass nicht nur eine offensichtliche Erhöhung der Intensität I_L , sondern auch eine geringere Wärmeleitfähigkeit λ_{th} zu einer höheren Temperatur der bestrahlten Oberfläche führt.

5.3.2 Positionsbestimmung im Einzelbild

Um die Nutzbarkeit des Temperaturprofils zur Positionsbestimmung zu evaluieren, soll hier ein einfacher Ansatz angewendet werden. Den Index des Einzelbildes und damit den Zeitpunkt, an dem der Laserspot ein Pixel passiert liefert schon die Registrierung über die Synchronisation. Hier soll für alle Pixel, bei denen der gleiche Index ermittelt wurde, eine feinere Untergliederung erzielt werden. Effektiv wird innerhalb der Integrationszeit der Kamera der Zeitpunkt gesucht, an dem der Laserspot das Pixel erreicht hatte. Das Resultat soll eine relative Position innerhalb des Integrationszeitraums sein, um zusammen mit der

zuvor ermittelten quantisierten Position eine kontinuierliche Positionsbestimmung in Schreibrichtung zu erzielen. Die Ausgangsdaten sind für jedes Pixel allein die Intensitätswerte über die Bildserie $I(x, y, n)$ und die Registrierung aus Kapitel 5.2.2.

Ansatz

Die markanteste Stelle, um im Temperaturprofil über die Zeit diese Position zu ermitteln, bietet die Aufheizphase der Oberfläche. Messungen des Temperaturverlaufs zeigen rapiden, nahezu impulsartigen Temperaturanstieg in dem Einzelbild, wo der Laserspot die zu einem Pixel korrespondierende Position erreicht. Allerdings bietet die Kamera nicht die zeitliche Auflösung, um den Verlauf des Temperaturanstiegs zu erfassen. Mit dem Modell aus Kapitel 5.3.1 kann jedoch der Temperaturverlauf für diese Phase vorhergesagt werden. Für die Aufheizphase lässt sich nach (5.9) die Beziehung zwischen Temperatur und Bestrahlungsdauer durch $T \sim \sqrt{t_H}$ beschreiben. Demnach ist der Temperaturverlauf für alle Pixel, abgesehen von einem Skalierungsfaktor, gleich.

Durch die Bewegung des Laserspots startet jedoch die Aufheizphase an jeder Position in Schreibrichtung mit einem Zeitversatz und die Momentaufnahme eines Einzelbildes zeigt für jedes Pixel den Verlauf des Temperaturanstiegs zu einem anderen Zeitpunkt. Unter der Annahme, dass alle Pixel das gleiche charakteristische Profil bei der Erwärmung zeigen, befindet sich dieser Zeitpunkt für einige Pixel in der Aufheizphase. Wir wollen dies hier zur Ermittlung der relativen Position ausnutzen. Der steile Gradient des Temperaturanstiegs in der Aufheizphase sollte für benachbarte Positionen einen auswertbaren Temperaturunterschied zeigen.

Ermittlung der relativen Position

Zunächst gilt es, für jedes Pixel den Bildindex zu ermitteln, in dem die Aufheizphase stattfindet. Dazu wird pixelweise der Gradient der gemessenen Intensitäten über die Einzelbilder berechnet

$$G(x, y, n) = \frac{d}{dn} I(x, y, n). \quad (5.12)$$

Bei dem hier gezeigten Beispielen wurden die Gradienten durch die Faltung mit der ersten Ableitung eines Gauß-Filterkerns approximiert. Für jedes Pixel wird

nun der Bildindex G_{amax} der Aufheizphase anhand des größten Gradienten in G ermittelt

$$G_{\text{amax}}(x, y) = \operatorname{argmax}_n G(x, y, n). \quad (5.13)$$

Anhand der Bildindizes G_{amax} kann aus der Bildserie ein Intensitätsbild nur mit den gemessenen Intensitätsanstieg in der Aufheizphase erstellt werden

$$\Delta I_{\text{heat}}(x, y) = I(x, y, G_{\text{amax}}(x, y)) - I_{\text{min}}(x, y), \quad (5.14)$$

welches in Abbildung 5.7a) zu sehen ist. Für die minimale Intensität pro Pixel über die Bildserie gilt

$$I_{\text{min}}(x, y) = \min_n I(x, y, n). \quad (5.15)$$

Die Intensität jedes Pixels in der Aufheizphase im Verhältnis zur seiner maximalen Intensität $I_{\text{max}}(x, y)$, mit

$$I_{\text{max}}(x, y) = \max_n I(x, y, n), \quad (5.16)$$

lässt auf die Dauer der Bestrahlung durch den Laserspot schließen. Durch Normieren von ΔI_{heat} erhält man so für jedes Pixel eine relative Position innerhalb der Aufheizphase eines Einzelbildes, die jedoch noch abhängig von der charakteristischen Kurve des Temperaturanstiegs ist

$$\Delta \hat{I}_{\text{heat}} = \frac{\Delta I_{\text{heat}}}{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}. \quad (5.17)$$

Gleichzeitig sorgt die Normierung für eine Unabhängigkeit von der Position im Temperaturprofil senkrecht zur Schreibrichtung. Die mit der Entfernung vom Strahlzentrum abnehmende Intensität fließt in dem vereinfachten Temperaturmodell als linearer Faktor mit ein. Abbildung 5.7b zeigt das Ergebnis der Normierung für einen Detailausschnitt des Temperaturprofils. Man erkennt deutlich den Gradienten in Schreibrichtung des Laserstrahls, der auf die unterschiedliche Bestrahlungsdauer durch den überstreifenden Laserspot zurückzuführen ist. Auf diese Ergebnisse wird in Kapitel 5.3.3 noch tiefer gehend eingegangen.

Unter der Annahme des vereinfachten Temperaturmodells für die Erwärmung der Oberfläche und einem linearen Verhältnis zwischen Intensitätswerten und

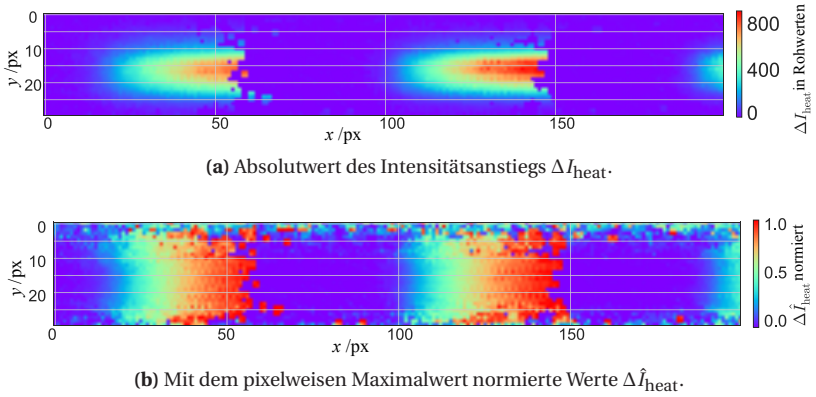


Abbildung 5.7: Detailausschnitt einer Laserlinie aus Abbildung 5.8a. Für jedes Pixel wird der beobachtete Intensitätswert in seiner Aufheizphase nach (5.14) ermittelt (a). Durch Normierung nach (5.17) erhält man $\Delta \hat{I}_{\text{heat}}$ (b), woraus sich nach (5.19) eine relative Position ergibt.

Temperatur, erhält man die Abhängigkeit der Intensitätswerte eines Pixels I von der Zeit der Bestrahlung t_H mit

$$I \sim \Delta T = k_{\text{th}} \sqrt{t_H}, \quad (5.18)$$

wobei k_{th} die thermischen Konstanten des Prozesses zusammenfasst. Die Skalierung durch die Konstante k_{th} wird durch die Normierung ausgeglichen und so liefert nach dem angenommenen thermischen Modell:

$$\Delta F_{\bar{u}}(x, y) = \Delta \hat{I}_{\text{heat}}^2 \quad (5.19)$$

eine relative Position innerhalb der beobachteten Aufheizphase in Schreibrichtung des Lasers, was hier der u -Richtung entspricht.

Zusammengenommen mit der diskreten Registrierung aus (5.6) lässt sich hieraus eine Registrierung mit einer feineren Positionsbestimmung ableiten:

$$D_{\bar{u}}(x, y) = \tilde{p}_{\bar{u}}(F_{\text{amax}}(x, y) - \Delta F_{\bar{u}}(x, y)) \cdot t_I, \quad (5.20)$$

wobei hier nur die \tilde{u} -Richtung der Zuordnung $\tilde{p}_{\tilde{u}}$ aus (5.1) ausgewertet wird. Analog ergibt sich für absolute Musterkoordinaten mit den u -Koordinaten aus (5.2) die Registrierung:

$$D_u(x, y) = p_u((F_{\text{amax}}(x, y) - \Delta F_{\tilde{u}}(x, y)) \cdot t_1). \quad (5.21)$$

Der Vergleich der Verfahren in Abbildung 5.29 und Tabelle 5.1 zeigen, dass sich damit die Unsicherheit der Registrierung etwa um einen Faktor 2 verringern lässt.

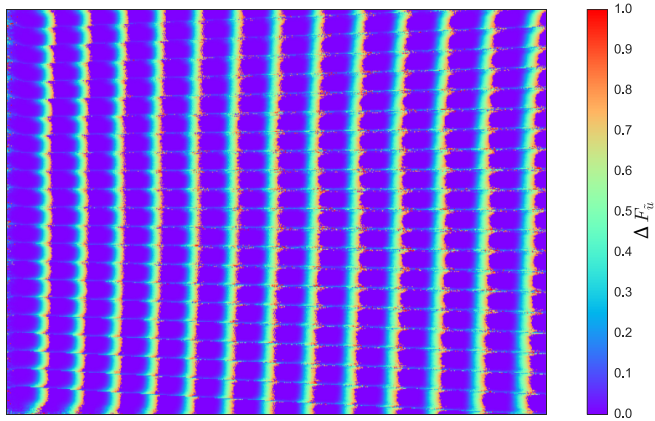
5.3.3 Ergebnisse und Bewertung

Die Ergebnisse des in Kapitel 5.3.2 vorgestellten Verfahrens zeigen, dass sich mit dem Temperaturprofil als Informationsquelle die Position auf der Projektionsfläche genauer bestimmen lässt, als mit dem durch die Quantisierung auf Einzelbilder limitierten Verfahren aus Kapitel 5.2. Obwohl hier für die Registrierung nur auf die Intensitätswerte der Aufheizphase und des Maximums zurückgegriffen wurde, lässt sich dennoch robust auf eine Position schließen.

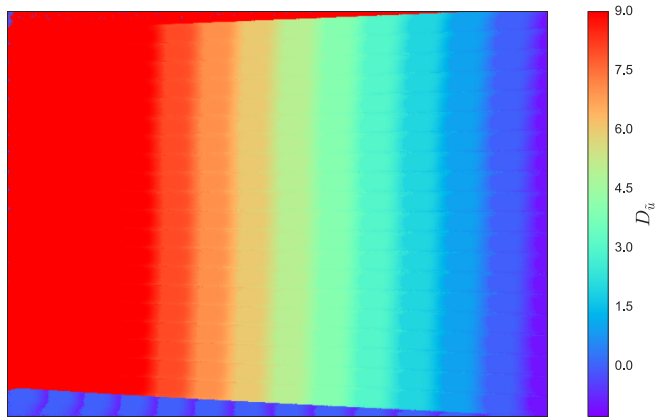
Die Beispielmessungen in Kapitel 5.5.2 zeigen, dass sich mit diesem Verfahren gegenüber der Positionscodierung durch Synchronisation die Messunsicherheit halbieren lässt (siehe Tabelle 5.1). Im Folgenden soll auf die Fehlerquellen eingegangen werden, die unter anderem durch die zuvor gemachten Annahmen entstehen.

Messung außerhalb der Aufheizphase

Auffällig ist in Abbildung 5.7b jeweils ein breiter Bereich von Pixeln zwischen den sichtbaren Gradienten, für die ein Wert nahe 0 ermittelt wurde. Diese Pixel entsprechen Positionen mit einem sprunghaften Intensitätsanstieg, ohne einen Zwischenwert in der Aufheizphase. Einfach ausgedrückt entsprechen sie den Positionen, die der Laserspot in diesem Einzelbild noch nicht erreicht hat und im nächsten schon übersprungen hat. Für diese Pixel lässt sich mit dem hier vorgestellten Verfahren keine Verbesserung der Registrierung erzielen. Zwar lässt sich diese Lücke durch eine geringere Schreibgeschwindigkeit v_L verkleinern, allerdings schrumpft dabei proportional auch der Bereich der Pixel, für die eine Messung in der Aufheizphase gemacht werden konnte.



(a) Feinere Unterteilung der Position in einem Einzelschritt durch den Korrekturwert $\Delta F_{\bar{u}}$. Die Werte geben die relative Position innerhalb eines Einzelschrittes an.



(b) Relative Position $D_{\bar{u}}$ in Schritten pro Einzelbild.

Abbildung 5.8: Ergebnis der Positionscodierung über das thermische Profil. Die Kamera blickt direkt auf die Projektionsfläche, bei einer Auflösung von 640×480 Pixeln. Auf der Fläche wurde ein 20 cm auf 20 cm großer Bereich codiert. Aufbauend auf der Registrierung durch Synchronisation aus Kapitel 5.2.2 wird für jedes Pixel ein Korrekturwert $\Delta F_{\bar{u}}$ der Position berechnet (a). Durch Subtrahieren des Korrekturwerts $\Delta F_{\bar{u}}$ von der diskreten Registrierung aus Abbildung 5.5b nach Gleichung (5.20) erhält man eine kontinuierliche Registrierung in Schreibrichtung $D_{\bar{u}}$ (b).

Effektiv war ohne Modifikation der Synchronisation mit dem verwendeten Aufbau die Geschwindigkeit nicht so weit zu senken, dass sich diese Lücke schließt. Die in Kapitel 5.6.2 vorgeschlagenen Anpassung und damit flexiblen Mustererzeugung würde hier eine lückenlose Ermittlung der Gradienten ermöglichen.

Hierdurch entsteht ein systematischer Fehler, der ohne eine Anpassung der Geschwindigkeit bei diesem Verfahren die größte Fehlerquelle darstellt.

Tatsächliche Form des Laserspots

Bei den zuvor in Kapitel 5.3.1 gemachten Annahmen zur Form des Laserstrahls wurde vorausgesetzt, dass der Energieeintrag in jeden Punkt in Form eines Rechteckimpulses zeitlich konstanter Länge t_H erfolgt. Hierbei werden zwei systematische Fehler gemacht.

Profil in Bewegungsrichtung

Mit den vorhandenen Mitteln konnte das reale Profil des Laserstrahls nicht ermittelt werden, jedoch ist mit einer zumindest annähernden Gaußform zu rechnen. In dem Fall würde der Energieeintrag durch den Strahl nicht impulsartig erfolgen, sondern graduell ansteigen und wieder abfallen. Da die analytische Form des Temperaturmodells in (5.9) und (5.10) von einer konstanten Intensität ausgehen, wäre die Herleitung oder Simulation eines neuen Modells mit einem gaußförmigen Intensitätsverlauf notwendig, wovon hier abgesehen wurde.

Profil orthogonal zur Bewegungsrichtung

Mit dem derzeitigen Modell wird das Profil orthogonal zur Bewegungsrichtung nur indirekt berücksichtigt, indem für jeden Punkt auf der Projektionsfläche ein Energieeintrag unterschiedlicher Intensität angenommen wird. Bei der Ermittlung der relativen Position im thermischen Profil in Kapitel 5.3.2 wird dies durch die Normierung der Intensitätswerte wieder kompensiert.

Tatsächlich entsteht der in Abbildung 5.6 sichtbare geringere Energieeintrag abseits der zentralen Bewegungsachse auch durch eine kürzere Einwirkzeit, bedingt durch die Strahlform. Die Abbildung 5.9b veranschaulicht den Fehler, der dabei gemacht wird. Die Modellannahme bedeutet, dass die geringere Temperatur T_{Modell} abseits der zentralen Achse, verglichen mit der beobachteten

Temperatur T_0 auf der Achse, sich nur in der Amplitude unterscheiden, aber bei gleicher Einwirkzeit t_H entstehen.

Unter der Annahme einer rotationssymmetrischen Gaußform für den Strahl und einem Radius des Laserspots $r_\omega = \omega/2$, ergibt sich für Positionen abseits der zentralen Achse aber der Temperaturverlauf T_v mit einer verkürzten Einwirkzeit δt_H , für die gilt:

$$\frac{\delta t_H}{t_H} = \frac{u_s}{r_\omega} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_s}{r_\omega}\right)^2}. \quad (5.22)$$

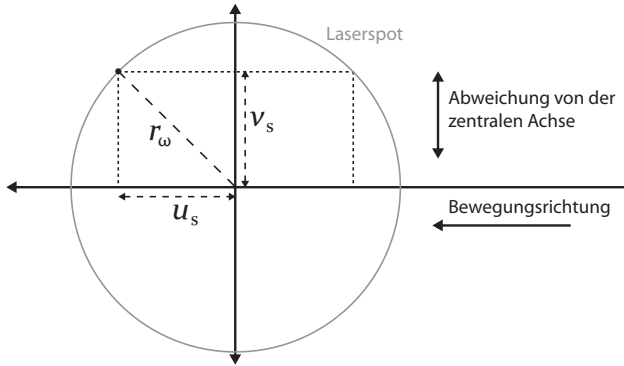
Abbildung 5.9 zeigt den Zusammenhang der geometrischen Variablen, mit der Position v_s relativ zur zentralen Achse und der verkürzten, halben überstrichenen Strecke u_s .

Dadurch entsteht ein maximaler Fehler bei der Ermittlung des Zeitpunktes in der Aufheizphase von $\delta t = (t_H - \delta t_H)/2$. Der Zeitpunkt t in der Aufheizphase wird so zu Beginn zu früh und am Ende zu spät ermittelt, sodass der Zeitpunkt mit einem Fehler von $\pm \delta t$ bestimmt wird. Als Beispiel bei einer Geschwindigkeit des Lasers von $v_L = 1000$ mm/s und einem Spotdurchmesser von $\omega = 10$ mm ergibt sich eine Einwirkzeit von $t_H = 10$ ms. Die Unsicherheit δt beträgt demnach ± 5 ms, wobei sie nach (5.22) zur zentralen Achse hin abnimmt. Für die Registrierung der absoluten Position D_u nach (5.21) entsteht in dem Fall eine Positionierungsgenauigkeit von ± 5 mm.

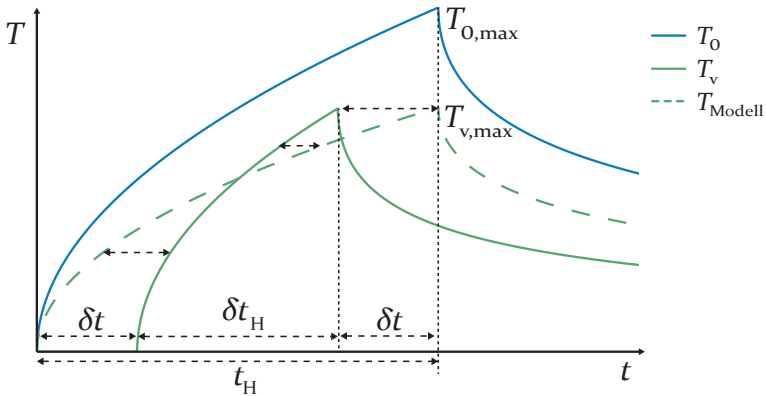
Der Effekt ist in Abbildung 5.8a und 5.7b zu sehen, bei denen sich das Profil zum Rand zwischen den Zeilen verbreitert und teilweise verschiebt.

Temperaturauflösung der Kamera

Die erzielbare Genauigkeit der Registrierung durch Nutzung des thermischen Profils ist grundlegend von der thermischen Auflösung der Kamera abhängig. Bei Wärmebildkameras wird die Temperaturauflösung anhand der NETD, der kleinsten unterscheidbaren Temperaturdifferenz (siehe Kapitel 3.4.1), angegeben. Auf Basis des NETD kann die minimal aufzulösende Zeitdifferenz δt_{NETD} in dem Temperaturprofil und damit der Fehler für die relative Position abgeschätzt werden. Zur Vereinfachung wird hier ein linearer Temperaturanstieg angenommen.



(a) Für Punkte abseits der zentralen Achse verkürzt sich die Einwirkzeit t_H auf δt_H , mit $\delta t_H / t_H = u_s / r_\omega$.



(b) Da das Modell für alle Punkte die gleiche Einwirkzeit t_H annimmt, weicht der ermittelte Zeitpunkt t um bis zu $\pm \delta t$ vom tatsächlichen Zeitpunkt ab.

Abbildung 5.9: Systematischer Fehler durch die Form des Laserspots bei der Positionsermittlung aus dem Verlauf des thermischen Profils.

Für den realen Temperaturverlauf, in Abbildung 5.10 als T_{Modell} bezeichnet, wird dabei δt_{NETD} am Anfang der Heizphase zu groß und am Ende zu klein geschätzt.

Mit dieser Annahme erhält man für die Zeitdifferenz δt_{NETD}

$$\delta t_{\text{NETD}} = \frac{T_{\text{NETD}}}{T_{\text{max}}} t_{\text{H}}, \quad (5.23)$$

mit der Maximaltemperatur T_{max} zum Ende der Heizphase der Länge t_{H} . Ohne genaue Kenntnis der Dämpfung durch Transmissions- und Reflektanzverluste ist in der Praxis eine Berechnung auf den Temperaturwerten entsprechenden Intensitätswerten zugänglicher:

$$\delta t_{\text{NETD}} = \frac{I_{\text{NETD}}}{I_{\text{max}}} t_{\text{H}}. \quad (5.24)$$

So ergibt sich für die Intensitätsauflösung der verwendeten Kamera mit $I_{\text{NETD}} = 10$ (Intensität entsprechend einem NETD von $T_{\text{NETD}} \approx 50$ mK) und einer typischen maximalen Intensität des Musters mit $I_{\text{max}} = 2000$ (entspricht $T_{\text{max}} \approx 10^\circ\text{K}$) eine zeitliche Auflösung von $\delta t_{\text{NETD}} = t_{\text{H}}/200$, wobei dieser Wert für das Zentrum des Laserspots gilt. Für Punkte auf der Projektionsfläche, die eine geringere Erwärmung erfahren, nimmt dieser Wert mit sinkendem I_{max} entsprechend ab. Für eine Geschwindigkeit des Lasers von $v_{\text{L}} = 1000$ mm/s und einem Spotdurchmesser von $\omega = 10$ mm ergibt sich eine Einwirkzeit von $t_{\text{H}} = 10$ ms. Nach der obigen Abschätzung für die zeitliche Auflösung ist damit $\delta t_{\text{NETD}} = 50$ μs , was bei der Geschwindigkeit einer Unsicherheit bei der Positionsbestimmung von 50 μm in Schreibrichtung des Lasers entspricht.

Der Einfluss des Rauschens bei einem niedrigen SNR ist für Pixel abseits der zentralen Achse des Laserprofils in Abbildung 5.7b zu erkennen. Durch die geringe Intensität des Lasers am Rand des Laserspots und die kürzere Einwirkzeit entsteht hier nur eine geringe Erwärmung. Zwar lässt sich auch am Rand eine relative Position rekonstruieren, jedoch wird das Ergebnis am Rand nach der Normierung durch das Rauschen dominiert. Um solche Bereiche mit geringem SNR zu vermeiden, können die Zeilen des Musters überlappend geschrieben werden.

Der Fehler bei der Bestimmung der relativen Position lässt sich nach (5.23) also durch einen steileren Temperaturanstieg minimieren, wobei eine kürzere Aufheizphase t_{H} bei gleichen übrigen Prozessparametern aber auch zu einer

geringeren Maximaltemperatur führt. Generell ist daraus abzuleiten, dass eine hohe Temperatur des Musters und damit ein hoher SNR der Genauigkeit des Verfahrens zu Gute kommt.

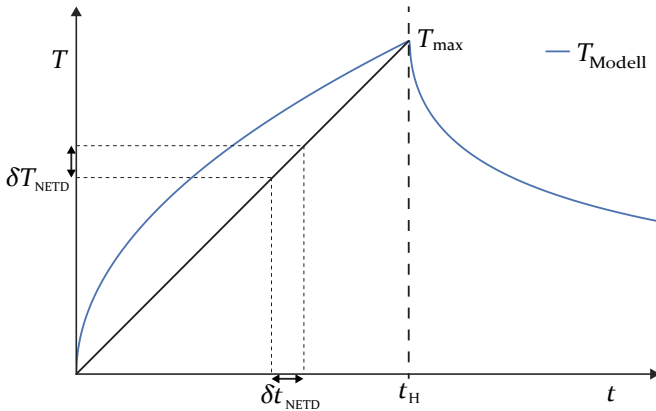


Abbildung 5.10: Abschätzung des von der Temporauflösung der Kamera δT_{NETD} abhängigen Fehlers bei der Ermittlung eines Zeitpunkts t anhand des Modells für den Temperaturverlauf.

Positioniergenauigkeit des Lasers

Die Genauigkeit der Registrierung hängt natürlich direkt von der Genauigkeit der Mustererzeugung ab. Laut Spezifikationen hat der Spiegelscanner des verwendeten Systems eine Winkelauflösung von $\delta\theta = 12\ \mu\text{rad}$. Bei dem hier verwendeten Arbeitsabstand von $d = 1\text{m}$ ergibt sich eine Positioniergenauigkeit¹ von $1\text{m} \cdot \tan\delta\theta \approx 12\ \mu\text{m}$ auf der Arbeitsebene. Selbst für die Randbereiche der Arbeitsebene bleibt der Fehler unter $15\ \mu\text{m}$. In Anbetracht der Größenordnung der übrigen hier anfallenden Fehler, kann die Positioniergenauigkeit des Laser demnach hier vernachlässigt werden.

¹ Bei dem kleinen Öffnungswinkel wird für die trigonometrische Berechnung ein näherungsweise senkrechter Strahleinfall angenommen und die Tangensfunktion durch ihr Argument angenähert.

5.4 Positionscodierung mittels Phasenschiebungsverfahren

Für den nächsten Ansatz zur Positionscodierung, soll wieder das Profil des schreibenden Laserstrahls selbst ausgenutzt werden. Im Gegensatz zum vorherigen Verfahren wird jedoch nicht das Profil in Bewegungsrichtung des Lasers, sondern orthogonal dazu verwendet. Hierbei ist nicht mehr die Betrachtung des schnellen, dynamischen Prozesses notwendig, der bei der Erwärmung durch den Laser erfolgt. Stattdessen wird das Muster hier als quasi statisch betrachtet und die vollständig beschriebene Projektionsfläche ausgewertet, indem die in Kapitel 5.4.3 beschriebene Bildserie auf eine Langzeitbelichtung reduziert wird.

Kern des hier vorgestellten Verfahrens ist die Realisierung einer Phasenschiebecodierung. Sie hat sich in der Deflektometrie als Standardverfahren zur Positionscodierung durchgesetzt. In Kapitel 3.1.1 wurde bereits auf die Vorzüge eingegangen, die das Verfahren gegenüber anderen möglichen Codierv Verfahren bei der Deflektometrie aufweist. Auf die Erzeugung der notwendigen Muster wird in Kapitel 5.4.2 eingegangen. Das Problem der Mehrdeutigkeit der resultierenden Decodierung wird in Kapitel 5.4.4 durch Phasenentfaltung mit der Registrierung aus Kapitel 5.2 gelöst. Kapitel 5.4.5 zeigt die Ergebnisse des Verfahrens und gibt eine Bewertung der Fehlerquellen.

Um das zuvor genutzte Schema wieder aufzugreifen, erfolgt hier die Beschreibung der Codierung der vertikalen Richtung, die nach dem Beispiel des Profils aus Abbildung 5.6 der v -Achse entspricht. Für eine vollständige deflektometrische Messung wird die Codierung jedoch in vertikaler und horizontaler Richtung unabhängig voneinander angewendet.

5.4.1 Grundlagen der Phasenschiebecodierung

Zur Codierung benutzt die Phasenschiebecodierung Sinusmuster, wobei, wie der Name schon sagt, die Positionsinformation in der Phase der Sinusfunktion steckt. Durch die Periodizität des Sinus beschränkt sich die resultierende Phaseninformation φ auf das Intervall $(-\pi, \pi]$ und liefert die Position relativ zur

verwendeten Periodenlänge des Sinusmusters. Von der kontinuierlichen Phaseninformation Φ , welche die Position über die komplette Länge des Musters angibt, erhält man dadurch nur die mehrdeutige Information aus φ :

$$\varphi = ((\Phi + \pi) \bmod 2\pi) - \pi. \quad (5.25)$$

Um aus der gemessenen Phase des Musters wieder eine eindeutige Phaseninformation und damit die Position auf der Projektionsfläche zu erhalten, muss Φ mittels einer *Phasenentfaltung* wieder rekonstruiert werden. Auf dazu anwendbare Verfahren wird in Kapitel 5.4.4 noch eingegangen.

Vier-Schritt-Algorithmus

Bei dem Sinusmuster ließe sich theoretisch aus einem einzelnen angezeigten Muster die Phaseninformation gewinnen. Jedoch ist durch die unbekannten optischen Eigenschaften der Oberfläche und anderen störenden Einflüssen die Auswertung von nur einem Muster in der Regel nicht praktikabel. Daher setzt das Phasenschiebungsverfahren darauf, mehrere Muster gleicher Wellenlänge mit einer zueinander verschobenen Phasenlage anzuzeigen und an jeder Stelle die beobachteten Intensitätswerte auszuwerten. Der Intensitätsverlauf von N einzelnen Sinusmustern lässt sich beschreiben durch:

$$I_i = I_0 (1 + K \cos(\varphi + \varphi_i)), \quad i = 1 \dots N, \quad 0 < K \leq 1, \quad (5.26)$$

mit der mittleren Intensität I_0 , dem Kontrast des Musters K und einem Offset der Phasenlage φ_i . Für eine Auswertung sind mindestens $N = 3$ Muster notwendig. Üblich ist es allerdings $N = 4$ Muster zu verwenden, der sogenannte *Vier-Schritt-Algorithmus*, wodurch ein guter Kompromiss zwischen möglichst wenigen, anzuzeigenden Mustern und einer geringen Restwelligkeit der resultierenden Phase erzielt wird [Kam04]. Außerdem ergibt sich für den Fall von nur vier Mustern eine einfache Berechnung von φ durch:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right). \quad (5.27)$$

Dabei sind I_1 bis I_4 die Intensitäten der jeweils um $\pi/2$ verschobenen Muster aus (5.26).

5.4.2 Anpassung der Musterparameter

Um die Phasenschiebecodierung mit vom Laser geschriebenen Mustern zu realisieren, gilt es also, das nach (5.26) definierte Sinusmuster als thermisches Profil zu erzeugen. Betrachtet man das Profil des zuvor verwendeten Musters aus Kapitel 5.1.4, so ist schon eine Ähnlichkeit zu einem Sinusprofil zu erkennen. Das Ziel soll hier sein, die Parameter der Mustererzeugung so weit zu optimieren, dass das resultierende thermische Profil auf der Projektionsfläche möglichst einem Sinus entspricht.

Funktion des variablen Profils

Zunächst wird ein Modell erstellt, das das erzeugte Muster auf der Oberfläche repräsentiert. Um alle Einflüsse auf die Mustererzeugung, wie die Form des Laserspots, die Eigenschaften der Projektionsfläche und den Einfluss der optischen Abbildung der Kamera zu berücksichtigen, basiert das Modell auf Stichproben des Laserprofils, wie es von der Kamera gesehen wird. Dies bedeutet auch, dass der Abstand und Fokus der Kamera bei der Stichprobe, für die späteren Aufnahmen beibehalten werden muss. Der Einfluss einer abweichenden Konfiguration wird später in Kapitel 5.4.5 untersucht. Ebenso sind durch die Modellierung auf Basis des Kamerabildes die Parameter in Pixelkoordinaten und werden abschließend wieder auf Musterkoordinaten skaliert.

Als Ausgangsmaterial dient hier ein Querschnitt durch das Laserprofil zum Zeitpunkt der maximalen Intensität in Form eines eindimensionalen Profils $l_{\text{sample}}(x)$ von gesampelten Intensitätswerten, die auf den Wertebereich $[0,1]$ normiert wurden. Für nicht ganzzahlige Werte von x werden die Zwischenwerte linear interpoliert. Der relevante Parameter für das gesuchte Profil ist der Zeilenabstand ℓ . Zur Optimierung wird daher hier das Linienprofil als Funktion

$$l(x, \ell_x) = \max_{1 \leq j \leq M} l_{\text{sample}}(x + j\ell_x), \quad j \in \mathbb{N} \quad (5.28)$$

definiert, mit dem Zeilenabstand ℓ_x in Pixelkoordinaten, welches auf Basis von l_{sample} ein periodisches Profil erzeugt (siehe Abbildung 5.11). Der Parameter M bestimmt den Definitionsbereich der Funktion und bestimmt die Breite des Profils, dass bei der Optimierung berücksichtigt wird. Hier wurde in der Regel eine Breite von $M = 5$ benutzt. Das Maximum wird hier verwendet, da als

Muster für die spätere Phasenschiebecodierung jeweils die maximale Intensität über die Bildsequenz verwendet wird.

Optimierung der Parameter

Zur Optimierung von $l(x, \ell_x)$ auf ein möglichst sinusförmiges Profil, wird der Abstand des periodischen Profils zu einer Kosinusfunktion minimiert. Mittels einer *Least-Squares-Minimierung* wird der Ausdruck

$$\sum_x (l(x, \ell_x) - (a \cdot \cos(bx) + c))^2 \quad (5.29)$$

minimiert, wobei hier die Amplitude a , Kreisfrequenz b und Offset c der Kosinusfunktion mit optimiert, aber nicht weiter verwendet werden. Der wichtige Parameter ist hier jedoch der Zeilenabstand ℓ_x für die spätere Mustererzeugung. Da die Stichprobe des Profils l_{sample} aus einer Aufnahme mit bekannten Musterparametern stammt, kann hieraus der Skalierungsfaktor ermittelt werden, um aus ℓ_x den Musterparameter ℓ zu berechnen.

Abbildung 5.12 zeigt ein Beispiel für das Ergebnis einer solchen Optimierung mit dem Profil $l(x, \ell_x)$ und ein ideales Sinusprofil mit den nach (5.29) ermittelten Parametern. Die Differenz zwischen beiden Profilen zeigt den systematischen Fehler im resultierenden Muster gegenüber einem idealen Muster. Diese Abweichung von einem idealen Sinusprofil führt bei der Decodierung zu einem periodischen Phasenfehler (siehe Kapitel 5.4.5 und Abbildung 5.18).

5.4.3 Phasenschiebecodierung mit dem thermischen Muster

Mit den zuvor erhaltenen Parametern für die Erzeugung eines Sinusprofils werden nun die Codemuster für die Phasenschiebecodierung erstellt. Dazu erfordert der *Vier-Schritt-Algorithmus* jeweils vier phasenverschobene Aufnahmen. Da hier ℓ einer Periodenlänge entspricht, werden die einzelnen Muster jeweils mit einem Versatz von $\ell/4$ erzeugt. Abbildung 5.13 zeigt die vier resultierenden approximierten Sinusprofile des Musters, das für die Phasenschiebecodierung verwendet wird.

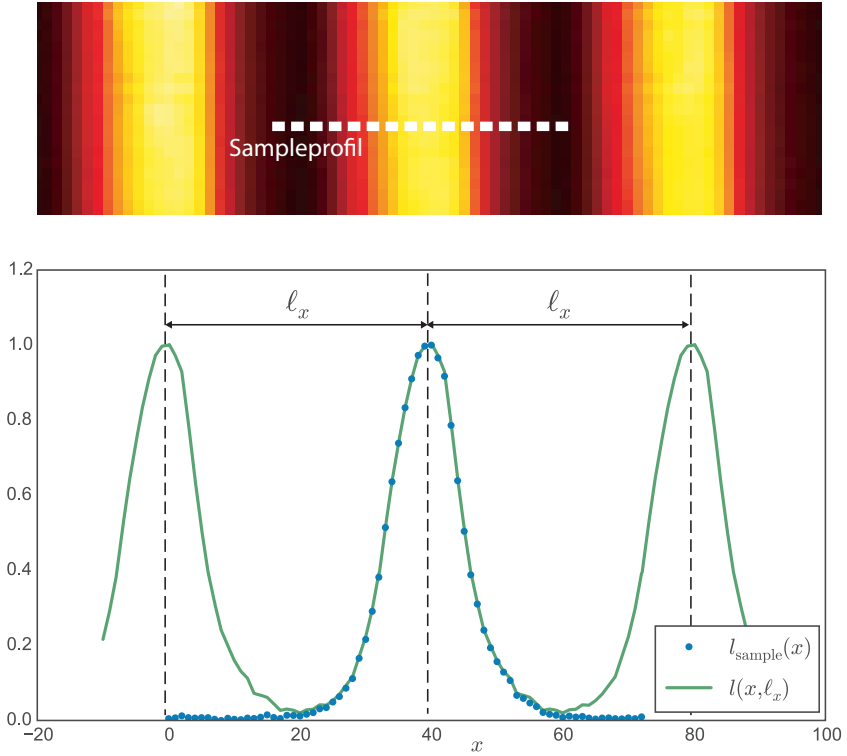


Abbildung 5.11: Aus Aufnahmen des Codemusters wird die Funktion $l_{\text{sample}}(x)$ aus Samples einer Linie des tatsächlichen Laserprofils gewonnen. Daraus wird ein periodisches Profil $l(x, \ell_x)$ interpoliert mit einer variablen Periodenlänge ℓ_x , welche es zu optimieren gilt. Das angedeutete Sampleprofil in der oberen Abbildung ist hier nur zur Veranschaulichung. Für die Optimierung wurden Samples einer einzelnen geschriebenen Linie genommen.

Die Intensitätsbilder I_1, \dots, I_4 für die Decodierung aus (5.27) erhält man aus der maximalen Intensitätsänderung $I_i := I_{i,\text{max}} - I_{i,\text{min}}$. Die Berechnung des Minimums $I_{i,\text{min}}$ beschränkt sich hierbei auf die Einzelbilder unmittelbar vor dem beobachteten Intensitätsmaximum. So wird bei der Überlappung der Musterlinien vermieden, dass noch nicht abgekühlte Bereiche der Projektionsfläche zu einer Verzerrung des Profils führen. Die Decodierung erfolgt dann nach (5.27), woraus man die relative Phase φ_v erhält, die jedoch noch eine mehrdeutige Positionsinformation liefert.

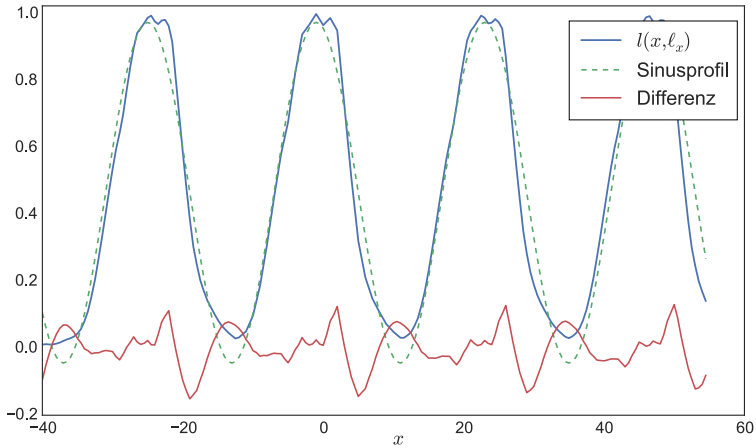


Abbildung 5.12: Ergebnis einer Optimierung der Periodenlänge ℓ_x von $l(x, \ell_x)$. Das Sinusprofil ist die in (5.29) optimierte Kosinusfunktion. Die resultierende Periodenlänge beträgt $\ell_x = 24$ px, was in Musterkoordinaten einem Abstand von $\ell = 9,6$ mm entspricht.

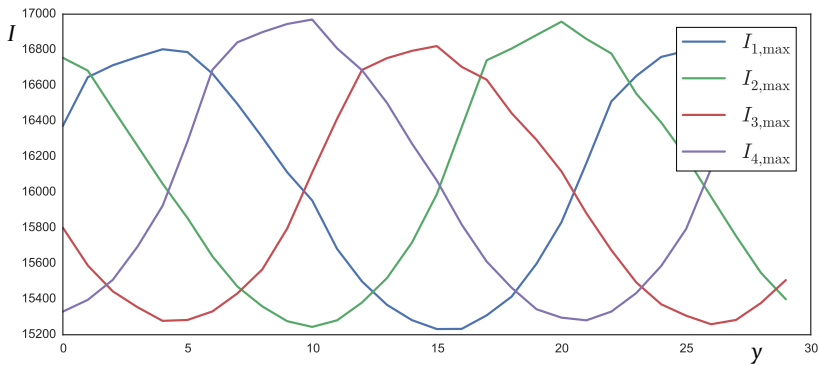


Abbildung 5.13: Überlagerte Profile der geschriebenen Codemuster. Durch die Optimierung der Periodenlänge ℓ_x haben die Profile, zumindest annähernd, Sinusform. Die Muster sind zueinander jeweils um ein Viertel der Periodenlänge verschoben. Das *Peak-to-Peak-Signal* entspricht einer beobachteten Temperaturdifferenz von etwa 8 K und die Temperatur des Hintergrundes hat eine Intensität von etwa 15000 in Rohwerten (Repräsentiert durch 15 Bit Werte für einen Temperaturbereich von -40 bis 300 °C).

Hierbei ist anzumerken, dass die Positionscodierung mittels Phasenschiebverfahren an sich unabhängig von den vorherigen Verfahren aus Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3 funktioniert.

5.4.4 Phasenentfaltung der Decodierung

Abbildung 5.14 zeigt, ist φ_v als Ergebnis der Phasenschiebecodierung noch in der Intervall $(-\pi, \pi]$ »wrapped« (aus dem Englischen: gewickelt). Zum »Unwrappen« oder *Entfalten* des Ergebnisses können verschiedene Ansätze verwendet werden.

Floodfill-Algorithmen

Das Problem der Phasenentfaltung beschränkt sich nicht nur auf Phasenschiebverfahren, sondern muss beispielsweise auch bei der Interferometrie, Satelliten-Radar-Erkundung und Computertomographie gelöst werden. Daher existieren eine Vielzahl an Algorithmen zur Rekonstruktion des Phasensignals. Einen guten Überblick gibt hierzu [GP98].

Die meisten Algorithmen, die eine Phasenentfaltung ohne zusätzliche Informationen ermöglichen sind, sogenannte *Floodfill-Algorithmen* (von engl.: »flood«: Flut, »fill«: füllen), die bei Phasensprüngen von $-\pi$ nach π oder umgekehrt einen kontinuierlichen Übergang wiederherstellen, wobei die Rekonstruktion von einem Startpunkt ausgehend den Gradienten im Phasenbild folgt. Bei den hier gezeigten Beispielen wurde der auf einem solchen Ansatz basierende Algorithmus aus [Her+02] zur Phasenentfaltung verwendet.

Die Nachteile der Floodfill-Algorithmen sind einerseits die Wahl eines geeigneten Startpunkts für die Entfaltung, da nicht bekannt ist, ob ein Punkt Teil des Signals oder ein nicht codierter Bereich des Bildes mit nur Rauschen ist. Dadurch ist die Entfaltung auch relativ zu den in φ sichtbaren Perioden des Signals, da ohne Zusatzinformation nicht bekannt ist, wie weit sich das ursprüngliche Signal erstreckt. Andererseits erfordern solche Verfahren einen kontinuierlichen Pfad durch das Bild. Enthält das Phasensignal von sich aus schon Diskontinuitäten oder zerfällt es bei einem Bild in mehrere, nicht verbundene Bereiche, so ist mit solchen Verfahren in der Regel keine vollständige Rekonstruktion möglich. Daher eignen sich solche Verfahren nur in Ausnahmefällen zur Phasenentfaltung von Aufnahmen in der Deflektometrie.

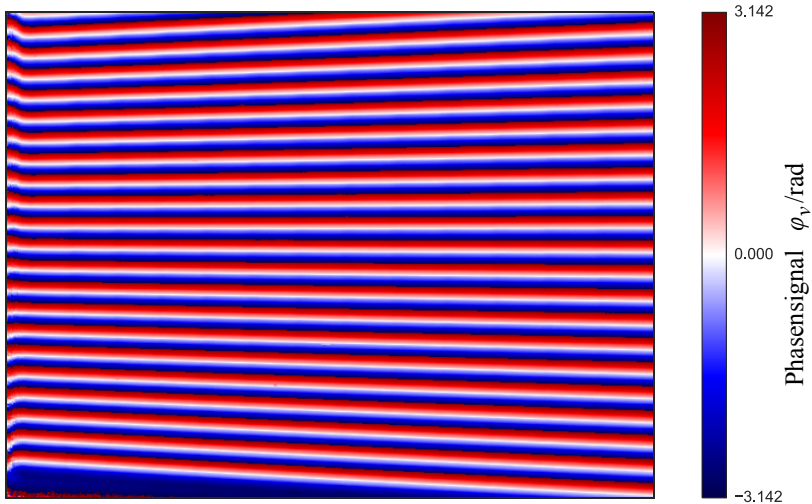


Abbildung 5.14: Resultat φ_v der Phasenschiebcodierung. Die Positionsinformation ist noch vieldeutig, da man nur die Phaseninformation modulo 2π erhält und muss noch mittels einer Phasentfaltung rekonstruiert werden.

Kombination mehrerer Wellenlängen

Ein gängiges Verfahren zur Phasentfaltung in der Deflektometrie ist die Kombination mehrerer Wellenlängen. Dafür werden mindestens zwei Messungen mit unterschiedlicher Periodenlänge des Musters gemacht, wobei die benutzten Längen teilerfremd sein müssen. Mit Hilfe des *chinesischen Restsatzes* kann daraus die Position im Phasensignal wieder eindeutig rekonstruiert werden [Kam04]. Detaillierte Beschreibungen zur Anwendung dieses Ansatzes in der Deflektometrie finden sich in [Lam04] und [Kna06]. In [Pet06] wird dieser Ansatz als *Heterodynverfahren* bezeichnet, bei dem die resultierende Schwebung bei der Überlagerung der Periodenlängen zu einem Signal mit größerer Periodenlänge führt, in der eine eindeutige Ortskodierung möglich ist.

Mehrwellenlängenverfahren können bei der Mustererzeugung mit Laser, zumindest mit dem hier verwendeten Aufbau, nicht angewendet werden. Die Periodenlänge der erzeugten Sinusmuster ist abhängig von der gegebenen Größe des Laserspots und ist für eine Konfiguration des Aufbaus durch die Optimierung der Parameter aus Kapitel 5.4.2 festgelegt. Eine manuelle Änderung

des Fokuspunktes und damit der Spotgröße des Lasers ist bei der verwendeten Optik ohne größere Eingriffe nicht praktikabel. Im Ausblick in Kapitel 5.6.2 wird eine Erweiterung des Aufbaus vorgestellt, mit der auch eine Erzeugung von Mustern mit variabler Periodenlänge möglich ist.

Phasenentfaltung mittels Registrierung durch Synchronisation

Im Falle der Mustererzeugung mit dem Laser kann auch auf eine zusätzliche Informationsquelle zur Rekonstruktion des Phasensignals zurückgegriffen werden. Da die Anzeige der Codemuster nicht instantan, wie bei einem herkömmlichen Monitor erfolgt, erhält man zusätzlich eine Positionsinformation aus dem Bildaufbau, sodass gleichzeitig das Verfahren aus Kapitel 5.2 angewendet werden kann.

Dazu kann das Problem der Phasenentfaltung so formuliert werden, dass es gilt, für jedes Pixel die ganze Zahl $J(x,y)$ zu finden, sodass mit

$$\Phi = \varphi + 2\pi J \quad (5.30)$$

das Phasensignal wieder rekonstruiert wird, indem das mehrdeutige Signal für jedes Pixel in das richtige Intervall verschoben wird. Dafür liefert die Decodierung $D_{\bar{v},\text{sync}}$ aus Kapitel 5.2 die gesuchten pixelweisen Faktoren J . Wendet man das Verfahren zur Positionscodierung mittels Synchronisierung auf die Bildsequenz von I_3 an, so liefert

$$\Phi_v = 2\pi \left(\left(\frac{\varphi_v}{2\pi} + \frac{1}{2} \right) + D_{\bar{v},\text{sync}} \right) \quad (5.31)$$

eine Phasenentfaltung von φ_v , wobei hier φ_v zunächst auf das Intervall $(0,1]$ normiert wird. Gleichzeitig erhält man so die Registrierung $D_{\bar{v}}$ für die Zeilenposition:

$$D_{\bar{v}} = \left(\frac{\varphi_v}{2\pi} + \frac{1}{2} \right) + D_{\bar{v},\text{sync}}. \quad (5.32)$$

Im Gegensatz zu den Floodfill-Verfahren aus Kapitel 5.4.4 erfolgt hierbei die Entfaltung für jedes Pixel unabhängig. Da keine Nachbarschaftsinformation benötigt wird, funktioniert dieser Ansatz auch problemlos bei nicht zusammenhängenden Regionen und isolierten Pixeln.

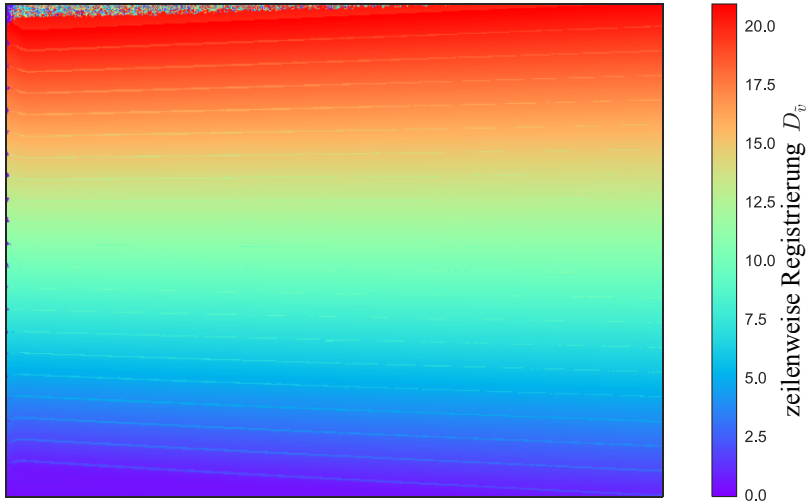


Abbildung 5.15: Ergebnis der Registrierung $D_{\bar{v}}$ nach der Phasenentfaltung von φ_v durch Zuhilfenahme der Decodierung $D_{\bar{v},\text{sync}}$ aus Kapitel 5.2. Die Kamera blickt direkt auf die Projektionsfläche, bei einer Auflösung von 640×480 Pixeln. Auf der Fläche wurde ein 20 cm auf 20 cm großer Bereich codiert.

Das Ergebnis der resultierenden Registrierung $D_{\bar{v}}$ ist in Abbildung 5.15 zu sehen. Durch die absolute Decodierung aus $D_{\bar{v},\text{sync}}$, kann die Phase aus Φ_v wieder absolut rekonstruiert werden. Auffällig sind hier noch Phasensprünge, die im Bild als horizontale Linien sichtbar sind. Diese entstehen, da die Übergänge zwischen den Zeilen aus $D_{\bar{v},\text{sync}}$ nicht exakt mit den Phasensprüngen im mehrdeutigen Signal φ_v übereinstimmen. Hier kann eine Kombination aus Floodfill-Algorithmus mit der Unterstützung der Information aus der Decodierung durch die Synchronisation für glatte Übergänge an den Phasensprüngen sorgen, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurde.

Um aus den gewonnenen verfahrensabhängigen, relativen Schirmkoordinaten (\tilde{u}, \tilde{v}) die Position in metrischen Einheiten zu erhalten, wird diese bei der Phasenschiebecodierung mit der Periodenlänge ℓ des Musters skaliert. So liefert $(u, v)^\top = (\tilde{u}, \tilde{v})^\top \cdot \ell$ die Position in absoluten Musterkoordinaten.

5.4.5 Bewertung der Ergebnisse zur Phasenschiebecodierung

In diesem Kapitel wurde bisher gezeigt, wie sich aus dem Profil der thermischen Muster Sinusmuster annähern lassen und mit dem benutzten Aufbau so eine Phasenschiebecodierung realisieren lässt. Im Folgenden soll bewertet werden, inwieweit sich Rauschen und der Einfluss der Aufnahmebedingungen auf das Ergebnis der Phasenschiebecodierung mit den durch den Laser erzeugten Mustern auswirken.

Einfluss des Kamerarauschens

Das Rauschen im Eingangssignal der Phasenschiebecodierung, also hier dem Intensitätsrauschen in den aufgenommenen Bildern der Codemuster, äußert sich im Phasensignal φ als Phasenrauschen. Eine Herleitung des Phasenrauschens für den *Vier-Schritt-Algorithmus* bietet [FPT11], worin auf Grundlage von [Sur97] ein Zusammenhang zwischen dem Intensitätsrauschen σ_I der Kamera und der Standardabweichung des Phasenrauschens σ_φ hergestellt wird. Auf Basis der Parameter des Sinusprofils aus (5.26) berechnet sich das Phasenrauschen danach aus:

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{2}{N} \frac{1}{K} \frac{\sigma_I}{I_0}} = \sqrt{\frac{2}{N} \frac{1}{K} \frac{1}{\text{SNR}}}, \quad (5.33)$$

mit der Anzahl der Phasenschritte N , dem Kontrast K und der mittleren Intensität I_0 des Musters.

Für die bei dem Phasenschiebverfahren hier verwendeten typischen Parameter lässt sich daraus der Phasenfehler durch das Kamerarauschen berechnen. Mit der Wahl des Verfahrens ist $N = 4$ gleich vorgegeben. Das resultierende Sinusprofil aus Kapitel 5.4.3 besitzt eine mittlere Intensität von $I_0 = 1000$ über den Intensität des Hintergrundes, bei einem Kontrast von $K = 0,8$. Das Intensitätsrauschen der Kamera entspricht etwa $\sigma_I = 4$. Dadurch ergibt sich ein SNR von 250 und nach (5.33) ein Wert von $\sigma_\varphi = 0,0035$ für das Phasenrauschen.

Aus (5.33) ist zu erkennen, wie die Intensität und der Kontrast des Musters sich direkt auf den Phasenfehler auswirken. Die hier berechneten Werte beziehen sich auf ein Codemuster, das unter idealen Bedingungen ohne Reflektanzverluste oder unscharfer Abbildung aufgenommen wurde. Der berechnete Wert für

σ_φ kann daher bei realen Aufnahmen als untere Grenze für den Phasenfehler angesehen werden.

Abweichung vom optimierten Profil

Der Vorteil der Phasenschiebecodierung zur Positionscodierung in der herkömmlichen Deflektometrie ist deren Robustheit gegenüber einer unscharfen Abbildung der verwendeten Sinusmuster. Wird das Codemuster nur unscharf abgebildet, beispielsweise wenn die Kamera auf die zu untersuchende Oberfläche fokussiert wird, ist dies ein willkommener Vorteil. Die unscharfe Abbildung äußert sich dabei als Tiefpassfilterung des Musters, wobei sich die Filterung in nur in einer Kontrastminderung des Musters zeigt, solange bis die Ortsfrequenz des Musters durch die Filterung keinen Kontrast mehr aufweist.

Dieser Vorteil geht bei der Verwendung der hier vorgestellten thermischen Muster teilweise verloren. Ursache hierfür ist, dass die einzelnen Codemuster nicht als Ganzes angezeigt werden, sondern aus dem pixelweisen Maximum über die Bildsequenz gewonnen werden. Dadurch wird jede Linie des Musters für sich unscharf abgebildet, bevor die Linien zu dem Muster zusammengesetzt werden. Ein Beispiel für den Einfluss auf das resultierende Profil des Musters ist in Abbildung 5.16 zu sehen.

Einerseits äußert sich die unscharfe Abbildung der Muster wie erwartet in einem Kontrastverlust, der zu einem größeren Phasenfehler führt. Nach (5.33) steigt für die in Abbildung 5.16 gezeigte Aufnahme dadurch der Phasenfehler durch das Kamerarauschen schon auf $\sigma_{\varphi, \text{blur}} = 0,013$.

Auffällig ist jedoch die Verzerrung des Sinusmusters. Da effektiv die Wellenzüge unabhängig voneinander durch die unscharfe Abbildung gespreizt werden, entstehen bei der Bildung des Musters die spitz zulaufenden Minima. Bei einer Tiefpassfilterung eines statischen Musters, würden diese Spitzen mit geglättet. Die Optimierung der Musterparameter aus Kapitel 5.4.2 berücksichtigt diesen Effekt, da als Vorlage ein tatsächliches Sample des Profils benutzt wird, das die unscharfe Abbildung schon durchlaufen hat. In Abbildung 5.17 sieht man den Einfluss dieser Tiefpassfilterung auf das Ergebnis der Parameteroptimierung. Mit dem unscharf abgebildeten Laserprofil lässt sich ebenfalls näherungsweise ein Sinusprofil erzielen, jedoch bei einem größeren Linienabstand ℓ_x , was ein Sinusprofil mit größerer Periodenlänge und geringerem Kontrast ergibt.

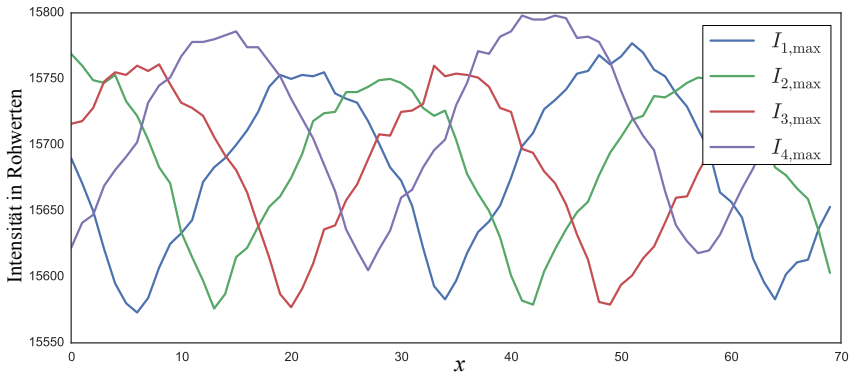


Abbildung 5.16: Thermisches Profil der erzeugten Sinusmuster nach einer unscharfen Abbildung. Verglichen mit dem optimierten Profil in Abbildung 5.13 ist das Sinusprofil stark verzerrt.

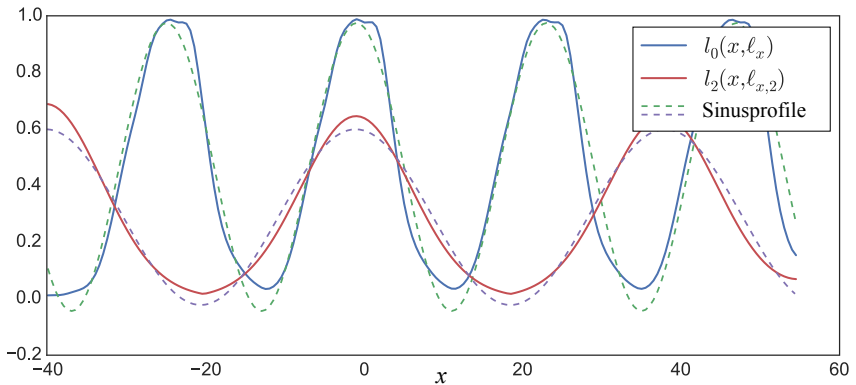


Abbildung 5.17: Einfluss der Tiefpassfilterung durch eine unscharfe Abbildung auf die Optimierung der Musterbreite. Ein scharf abgebildetes Muster liefert nach der Optimierung das Sinusprofil l_0 mit der Musterbreite ℓ_x . Wird das Profil dagegen unscharf abgebildet (hier simuliert mit einem Gaußfilter mit einer Standardabweichung von 2 Pixeln), resultiert dies in einem breiteren Profil l_2 mit der Musterbreite $\ell_{x,2}$ und geringerem Kontrast.

Allerdings wird dadurch das Muster für genau diese Abbildung optimiert, womit die Länge des Sichtstrahls von Kamera zu Muster festgelegt ist. Bei einem deflektometrischen Sensor sind Sichtstrahlen unterschiedlicher Länge jedoch unvermeidbar. Insbesondere dadurch, dass der Arbeitsraum des Lasers ausgespart werden muss, sind die möglichen Konfigurationen für Kamera und Prüfobjekt eingeschränkt (siehe Kapitel 5.1.5), was oft in einen flachen Sichtwinkel für die Kamera und damit einem ausgeprägten Effekt der Tiefenunschärfe resultiert.

Einfluss auf den Phasenfehler

Abbildung 5.18 zeigt den Einfluss auf den Phasenfehler, wenn das Muster nicht im optimierten Abstand benutzt wird. Aus den zugehörigen Aufnahmen der ebenen Projektionsfläche im optimalen Abstand aus Abbildung 5.13 wurde das entfaltete Phasensignal Φ_0 berechnet. Ebenso wurde für das unscharf abgebildete Profil das entfaltete Phasensignal Φ_{blur} berechnet.

Für beide Signale wurde die Differenz $\delta\Phi_0$ und $\delta\Phi_{\text{blur}}$ zu einer auf die Daten gefitteten Geraden gebildet, die dem idealen Ergebnis bei der Messung einer Ebene entspricht. Durch den nicht perfekten Sinus enthalten beide Signale eine Restwelligkeit, die bei dem verzerrten Sinus zu $\delta\Phi_{\text{blur}}$ deutlich ausgeprägter ausfällt. Die in der Abbildung eingezeichnete Standardabweichung des Phasenfehlers steigt bei den verwendeten Testdaten von $\sigma_{\Phi,0} = 0,06$ für den korrekten Abstand, gegenüber $\sigma_{\Phi,\text{blur}} = 0,21$, wenn das Muster durch einen falschen Abstand unscharf abgebildet wird.

Vermeidung des Effekts

Zur Vermeidung des Effekts kann bei der Optik der Kamera eine kleinere Blende verwendet werden, wodurch eine größere Tiefenschärfe erzielt wird. Jedoch müssen solche Optiken für Wärmebildkameras speziell angefertigt werden, weshalb eine solche Lösung hier nicht praktikabel war. In Kapitel 5.1.5 wurde gesondert auf dieses Thema eingegangen. Alternativ kann auch eine spezielle Optik in *Scheimpflug*-Konfiguration benutzt werden, die auch bei der Sicht auf eine schräge Ebene eine scharfe Abbildung ermöglicht [BPF16], welche jedoch ebenfalls für Wärmebildkameras nicht erhältlich ist.

Eine andere Möglichkeit wäre eine direkte Musterprojektion zu benutzen, wie sie in Kapitel 5.6.2 vorgestellt wird, anstatt das Muster iterativ aufzubauen. Wird das Sinusprofil als Ganzes unscharf abgebildet, erreicht man wieder den

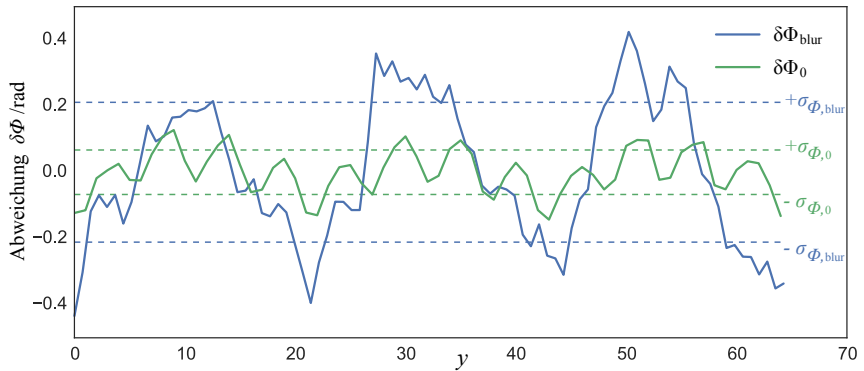
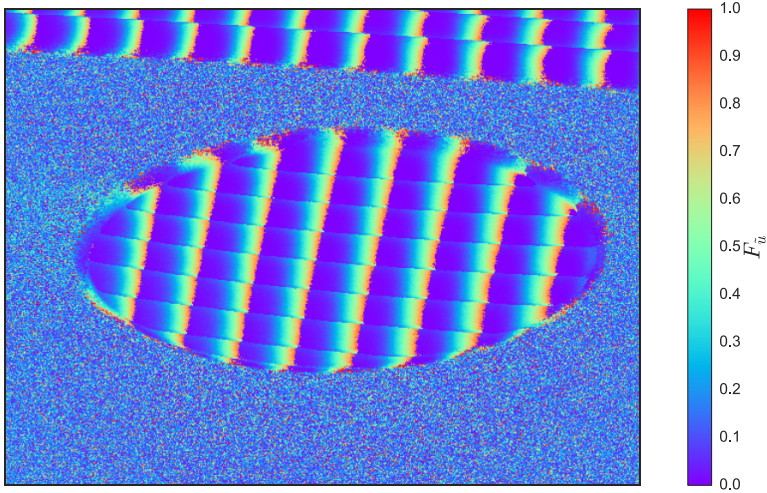
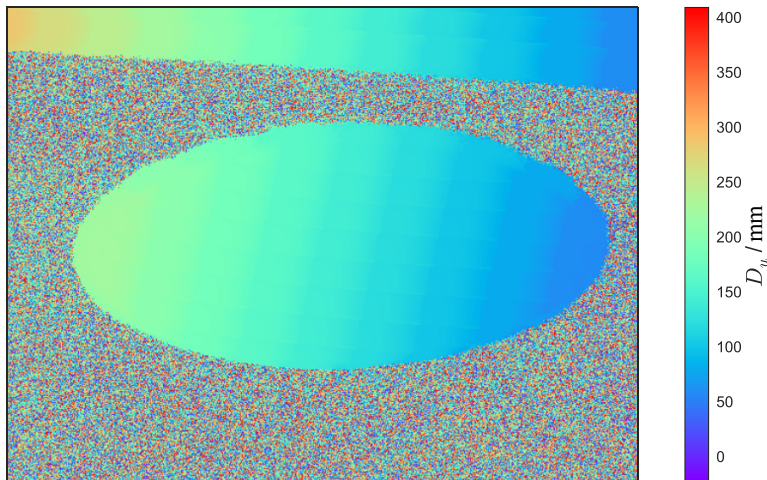


Abbildung 5.18: Phasenfehler im entfalteten Signal bei idealer $\delta\Phi_0$ und unscharfer $\delta\Phi_{\text{blur}}$ Abbildung als Differenz zu einer Referenzebene. Zusätzlich sind jeweils die oberen und unteren Grenzen einer Standardabweichung $\pm\sigma_{\Phi,0}$ und $\pm\sigma_{\Phi,\text{blur}}$ für die beiden Phasenfehler eingezeichnet.

Vorteil der herkömmlichen Phasenschiebecodierung, wobei die Sinusform bei unscharfer Abbildung erhalten bleibt.

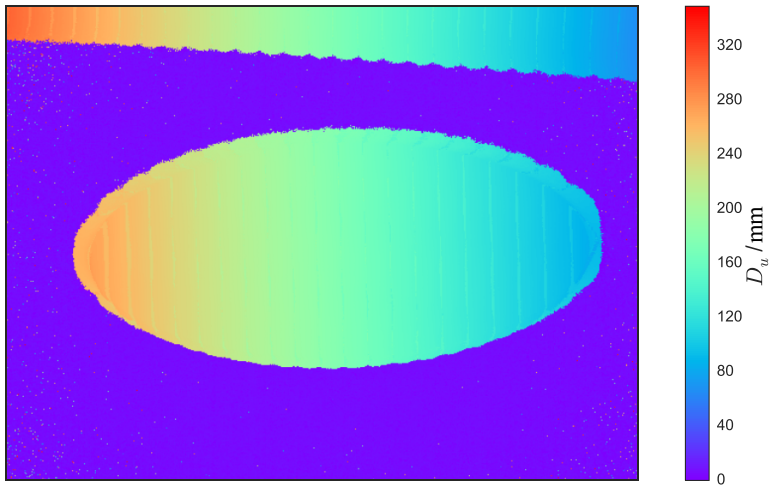


(a) Feinere Untergliederung der Position F_u des Laserspots innerhalb der Einzelbilder.

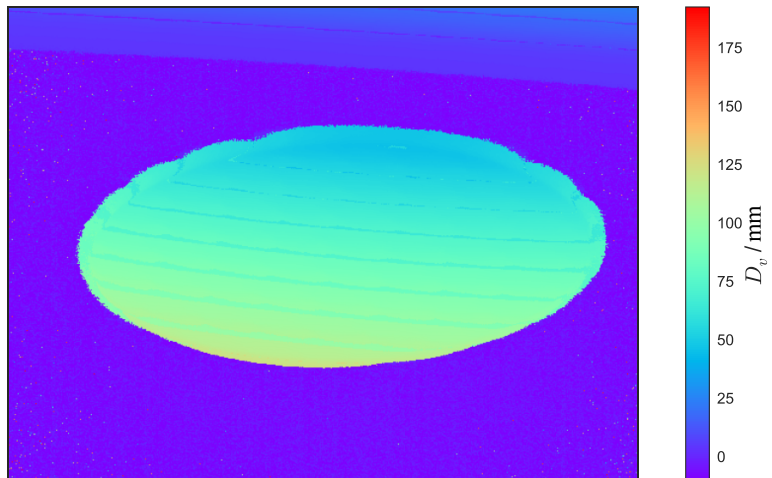


(b) Kontinuierliche Registrierung D_u durch feinere Untergliederung der diskreten Schritte mittels F_u .

Abbildung 5.19: Untersuchung eines Oberflächen-Parabolspiegels (siehe Kapitel 5.5.1). Ergebnis der Positionscodierung mit dem thermischen Profil des Laserspots nach Kapitel 5.3.



(a) Decodierung der absoluten Position D_u in horizontaler Richtung.



(b) Decodierung der absoluten Position D_v in vertikaler Richtung.

Abbildung 5.20: Untersuchung eines Oberflächen-Parabolspiegels (siehe Kapitel 5.5.1). Ergebnis der Phasenschiebecodierung mit Phasenfaltung über die Registrierung durch den synchronisierten Bildaufbau mit dem Laser.

5.5 Ergebnisse

5.5.1 Untersuchungen am Beispiel

Um die Anwendbarkeit der Verfahren zu evaluieren, wurden verschiedene Prüfobjekte mit den in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren untersucht. Die Aufnahmen erfolgten mit der Konfiguration des Aufbaus, wie er in Abbildung 5.2 zu sehen ist. Für die Mustererzeugung wurde eine Fläche der Breite $w = 357$ mm und Höhe $h = 367$ mm mit dem Laser beschrieben, bei einem Linienabstand von $\ell = 9,2$ mm und einer Geschwindigkeit von $v_L = 1026$ mm/s. Neben der nötigen Fläche, um das Prüfobjekt abzudecken, ergeben sich die Parameter nach der an die Synchronisierung angepassten Geschwindigkeit (siehe Kapitel 5.1.2) und der optimierten Musterbreite für die Phasenschiebecodierung (siehe Kapitel 5.4.2).

Oberflächen-Parabolspiegel

Als Referenzobjekt wurde ein Oberflächen-Parabolspiegel mit einem Durchmesser von 152 mm untersucht. Einerseits zeigt er als Referenz das Verhalten bei idealen Oberflächeneigenschaften. Außerdem hält sich bei einem Prüfobjekt dieser Größe der Einfluss der Tiefenschärfe noch in Grenzen. Der Spiegel wurde als Prüfobjekt gewählt, um den späteren Vergleich mit der Messung an einem herkömmlichen Deflektometriesensor zu ermöglichen, da die metallbedampfte Oberfläche im sichtbaren und thermischen Infrarotspektrum ein nahezu idealer Spiegel ist. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass sich die Messunsicherheiten der hier vorgestellten Verfahren noch um Größenordnungen über denen der herkömmlichen Deflektometrie liegen, sodass hier ein direkter Vergleich noch nicht sinnvoll ist. Daher beschränken sich die Versuche hier auf eine qualitative Bewertung und den Vergleich der Verfahren untereinander.

Erwartungsgemäß zeigt sich der Spiegel als eine gutmütig zu inspizierende Oberfläche. Mit der schnellen Registrierung durch Synchronisation aus Kapitel 5.2 lässt sich aus nur einem geschriebenen Muster eine grobe, quantisierte Decodierung erzielen, welche in Abbildung 5.21 zu sehen ist. Durch Auswertung des thermischen Profils in den Einzelbildern lässt sich hier nochmals eine

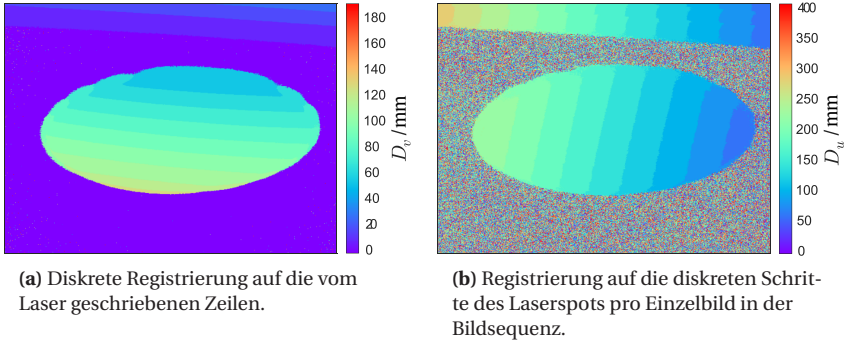


Abbildung 5.21: Ergebnis der Untersuchung eines Oberflächen-Parabolspiegels (siehe Kapitel 5.5.1) mittels der Registrierung durch Synchronisation mit dem Laser aus Kapitel 5.2.

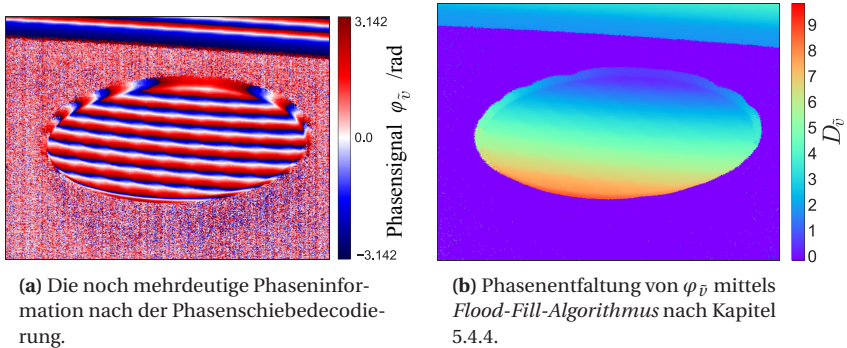


Abbildung 5.22: Phasentfaltung des Ergebnisses der Phasenschiebedecodierung. Hier liefern *Flood-Fill-Algorithmen* nur eine relative Position innerhalb des beobachteten Phasensignals.

feinere Position in horizontaler Richtung (Richtung der u -Achse) erzielen. Abbildung 5.19 zeigt die entsprechende feinere Untergliederung der Einzelschritte $F_{\tilde{u}}$ und die resultierende Registrierung D_u .

Der Spiegel wurde ebenso mit dem Phasenschiebeprozess untersucht. Hier wurde zur Codierung das Muster jeweils horizontal und vertikal angezeigt, wobei pro Richtung vier phasenverschobene Muster notwendig sind. Das Pha-

sensignal der Decodierung ist in Abbildung 5.22a zu sehen und Abbildung 5.20 zeigt die decodierte Position nach Entfaltung des Signals für bei Richtungen.



Abbildung 5.23: Untersuchtes Karosserierohblech. Mittig ist eine Delle zu erkennen, die in den Detailaufnahmen untersucht wurde.

Zur Phasenentfaltung bei einer glatten, zusammenhängen Oberfläche, ohne Diskontinuitäten, lassen sich auch *Flood-Fill-Algorithmen* anwenden. Abbildung 5.22b zeigt das Ergebnis der Phasenentfaltung bei der Aufnahme des Spiegels. Hier zeigt sich der Nachteil, dass bei einer solchen Phasenentfaltung ohne Zusatzinformation nur eine relative Phaseninformation rekonstruierbar ist. Für eine qualitative Untersuchung oder Detektion und Lokalisation von Defekten wäre eine relative Registrierung jedoch schon ausreichend.

Am Rand des Spiegels ist der Einfluss der Tiefenschärfe auf die laterale Auflösung zu erkennen. Der Fokuspunkt der Kamera liegt in den Aufnahmen mittig auf dem Spiegel. In den Abbildungen 5.21 bis 5.20 ist zu erkennen, dass die Registrierung oder Phasenbilder dadurch den vorderen oder hinteren Rand den Spiegels nur unscharf erfasst und dadurch das Codemuster über den den Rand zu fließen scheint.

Rohbleche

Als Beispiel für den geplanten Einsatz der Infrarotdeflektometrie wurden Prüfteile praxisrelevanter Anwendungen untersucht. Abbildung 5.23 zeigt ein un-

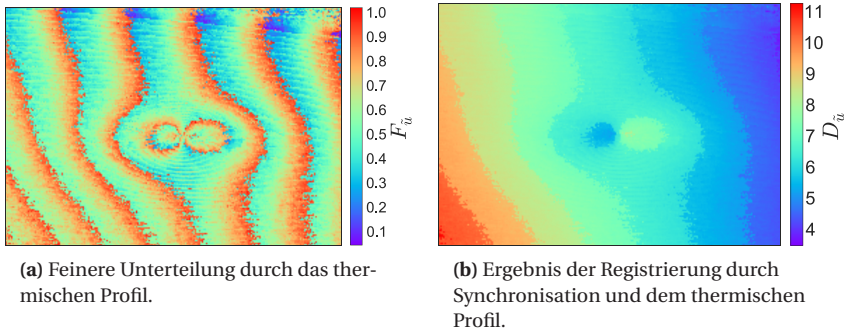


Abbildung 5.24: Bei der Registrierung anhand des thermischen Profils führt die unscharfe Abbildung zu einer ungenaueren Lokalisierung innerhalb des Profils. In Abbildung (b) ist die graduelle Verschlechterung mit steigender Unschärfe zum unteren Rand zu erkennen.

tersuchtes Karosserierohblech. Hier zeigen sich bei der Größe des Prüfteils die in Kapitel 5.1.5 erwähnten Einschränkungen des Aufbaus als nachteilig für manche Codierv Verfahren.

Die Positionsermittlung über der thermische Profil in Abbildung 5.24 zeigt, dass hier noch eine Unterteilung der Position erzielt wird. Allerdings ist im unteren Bereich von Abbildung 5.24a eine Verschiebung des Profils bei zunehmender Unschärfe des Profils zu erkennen. Dadurch erhält man zwar noch ein qualitativ besseres, kontinuierliches Ergebnis, jedoch ist durch die Verschiebung mit einem systematischen Fehler zu rechnen.

Bei der Untersuchung mittels Phasenschiebungsverfahren zeigen sich die Eigenschaften der Oberfläche. Hier wird durch Musterkompression die Ortsfrequenz des Musters zu hoch, sodass nach der unscharfen Abbildung und nach Reflektanzverlusten das Sinusprofil keinen ausreichenden Kontrast mehr liefert. Das Phasensignal der Phasenschiebecodierung in Abbildung 5.25 zeigt sich so verrauscht, sodass hier eine robuste Phasenentfaltung nur mit Hilfe der zusätzlichen Information aus der Registrierung durch Synchronisation möglich ist. Abbildung 5.26 zeigt die Ergebnisse der beiden Codierv Verfahren. Dabei wird durch die Phasenschiebecodierung effektiv keine bessere Decodierung erzielt und der ermittelten Position nur Rauschen hinzugefügt.

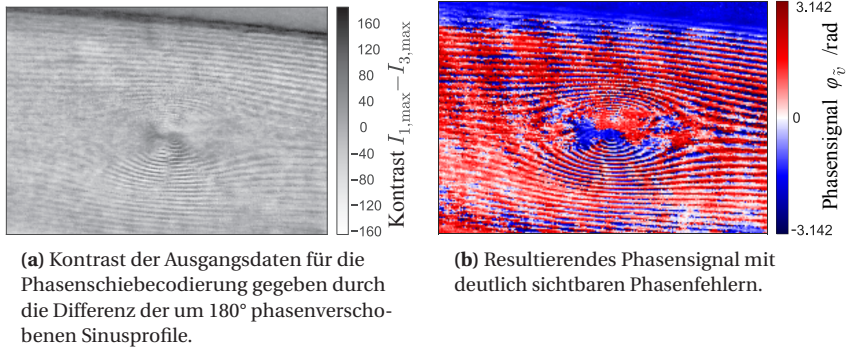


Abbildung 5.25: Phasenfehler der Phasenschiebecodierung bei Kontrastverlust durch Tiefenunschärfe und schlechter Reflektanz der Oberfläche. Das Prüfobjekt ist ein Karosserierohrblech mit Defekten.

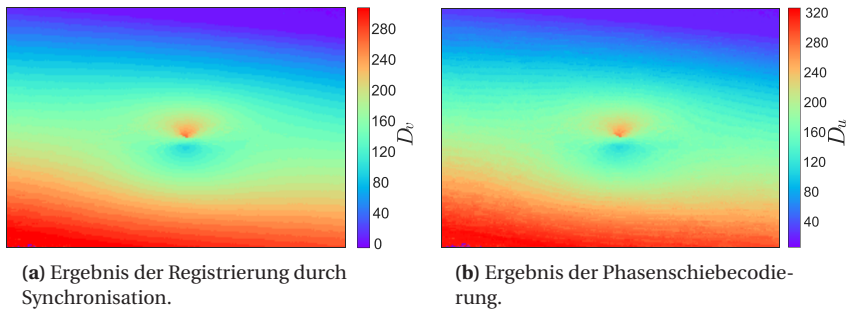


Abbildung 5.26: Vergleich der Positionscodierung durch Synchronisation und Phasenschiebecodierung. Bei geringem Kontrast der Codemuster, lässt sich mit der Phasenschiebecodierung keine bessere Positionscodierung erzielen.

Hier ist anzumerken, dass die Oberfläche selbst durch ihre geringere Reflektanz nur zu einem Kontrastverlust führt, die Verfahren jedoch hier generell einsetzbar sind.

Hauptsächlich wird die Leistungsfähigkeit hier durch die Tiefenunschärfe begrenzt, die durch die ungünstige Konfiguration des Aufbaus bedingt ist. Um bei einer unscharfen Abbildung dennoch die Phasenschiebecodierung einsetzen zu können, ist ein Muster mit größerer Periodenlänge notwendig, dass auch

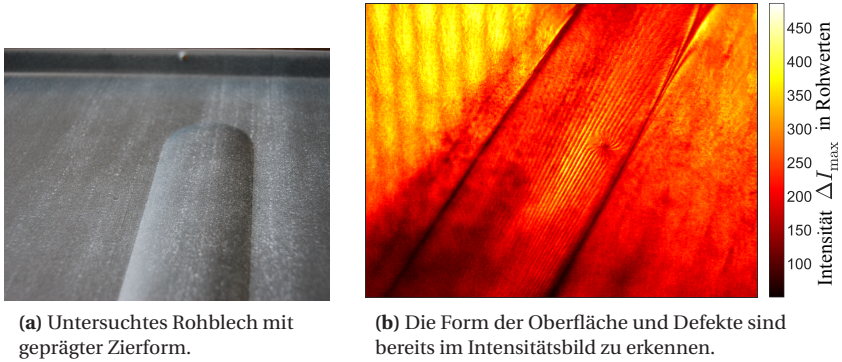


Abbildung 5.27: Untersuchtes Rohblech im sichtbaren und thermischen IR-Spektrum (siehe Kapitel 5.5.1).

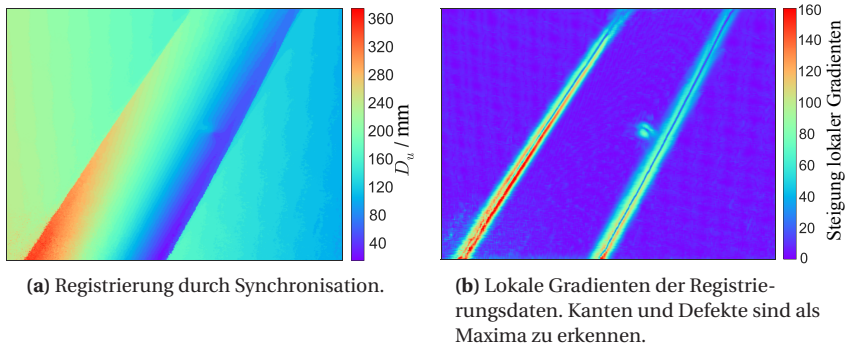


Abbildung 5.28: Die Registrierung durch Synchronisation ermöglicht eine schnelle Inspektion der Oberfläche und eine Detektion von Defekten.

nach einer Tiefpassfilterung noch erhalten bleibt. Entsprechend ist bei der Codierung über das Profil ein Laserspot mit lateral größerer Ausdehnung notwendig, damit nach einer unscharfen Abbildung das Profil noch auswertbar ist. Langwelligere Muster bei gleicher Intensitätsauflösung führen jedoch generell zu einer ungenaueren Positionsbestimmung, was beispielsweise in [Kna06] detailliert diskutiert wird.

Da sowohl die Registrierung über das Profil als auch Phasenschiebecodierung über die Phasenentfaltung auf der quantisierten Positionsinformation der Synchronisation basieren, wird in beiden Fällen dennoch eine grundlegende Decodierung der Position ermöglicht. Bei geringem Kontrast des Musters zeigt sich hier die Auswertung des Intensitätsmaximums als robuste Unterstützung. Angesichts des deutlich höheren Zeitaufwands zur Mustererzeugung bei der Phasenschiebecodierung, ist es daher empfehlenswert bei schlechten Aufnahmebedingungen allein die Positionscodierung durch Synchronisation zu nutzen. Vor allem für eine schnelle Inspektion von Oberflächen, bei der eher die Detektion von Defekten im Vordergrund steht eignet sich die Registrierung durch Synchronisation.

Das Beispiel in Abbildung 5.27 zeigt die Untersuchung eines verschmutzten Rohblechs mit schlechten Reflektanzeigenschaften. Verformungen der Oberfläche sind bereits im Intensitätsmaximum über die Bildserie, quasi als virtuelles Prüfmuster, deutlich zu erkennen. Hier lassen sich ohne Positionscodierung schon Verfahren aus der Mustererkennung anwenden. Einen breiten Überblick gibt hier beispielsweise [BPF16] oder im speziellen für die Anwendung in der Deflektometrie [Wer11].

Für eine Auswertung mit Methoden der Deflektometrie können zum Beispiel die lokalen Gradienten der gewonnenen Positionsinformation berechnet werden, wie in Abbildung 5.28 zu sehen ist. Im Gradientenbild werden starke lokale Änderungen der Oberflächenneigung als Maxima sichtbar, sodass hier unerwünschte Defekte detektiert werden können, wobei hier aber auch gewollte Kanten in der Oberflächengeometrie hervor treten.

5.5.2 Vergleich der Verfahren

Im Folgenden soll nochmal eine zusammenfassende Auflistung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren und ein direkter Vergleich der gewonnenen Daten gegeben werden.

Registrierung durch Synchronisation

Die Registrierung durch Synchronisation bietet den Vorteil eines schnellen Inspektionsverfahrens. Durch die separate Auswertung in Richtung der geschriebenen Zeilen und der Schritte in Schreibrichtung des Lasers, lässt sich mit nur einem angezeigten Muster die komplette Projektionsfläche codieren.

Da die Auswertung nur auf der Detektion des Intensitätsmaximums auf der aufgeheizten Oberfläche basiert, kann auch bei einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis noch eine rudimentäre Auswertung erfolgen. Beschränkt man das Verfahren nur auf eine zeilenweise Auswertung, wird mit der Anzeige von jeweils einem horizontalen und vertikalen Muster die kürzeste Zeit für eine Codierung erreicht.

Der größte Nachteil des Verfahrens ist der Aufwand zur Mustererzeugung, um die Synchronisation zwischen Kamera und Lasersystem zu erreichen. Außerdem ist der Ergebnis der Registrierung auf die Linienbreite, beziehungsweise Schrittweite des Lasers quantisiert. Je nach verwendeter Schreibgeschwindigkeit, kann man daher bei der Codierung in Schreibrichtung nur von einer groben Registrierung sprechen.

Positionscodierung über das thermische Profil

Eine Erweiterung der Registrierung durch Synchronisation ist die Positionscodierung über das thermische Profil und erbt daher auch deren Vor- und Nachteile. Über die Auswertung wird jedoch eine feinere, kontinuierliche Positionsbestimmung in Schreibrichtung des Lasers ermöglicht, wodurch dieser Nachteil des vorherigen Verfahrens etwas abgemildert wird. Die Auswertung des Profils erfordert keine zusätzlichen Codemuster und damit verbundenen Zeitaufwand.

Zur Auswertung des Profils ist jedoch ein möglichst genaues thermisches Modell erforderlich. Das hier verwendete, vereinfachte Modell ist insofern eingeschränkt, als dass es nur die beobachtete Aufheizphase zur Positionsermittlung benutzt und daher für eine möglichst kontinuierliche Codierung die Geschwindigkeit des Laserspots stark beschränkt ist.

Positionscodierung mittels Phasenschiebungsverfahren

Eine deutlich höhere Auflösung kann bei der Positionscodierung mittels Phasenschiebungsverfahren erzielt werden, wie die Auswertung im nächsten Abschnitt noch zeigt. Dabei ist die Phasenschiebecodierung für sich unabhängig von den vorherigen Verfahren und erfordert daher keine aufwendige Synchronisierung.

Diese wird erst für die Phasenentfaltung des Signals eingesetzt. Zwar können hier auch Standardverfahren, wie zum Beispiel *Flood-Fill-Algorithmen* verwendet werden, jedoch ermöglichen diese in der Regel nur eine Rekonstruktion

eines relativen Phasensignals. Der größte Nachteil bei diesem Verfahren ist der hohe Zeitaufwand zur Mustererzeugung, da bei den hier verwendeten Parametern insgesamt acht Codemuster angezeigt werden müssen. Außerdem bietet das Verfahren bei der hier verwendeten Mustererzeugung nicht die Robustheit gegenüber einer unscharfen Mustererzeugung wie bei der Phasenschiebecodierung in der herkömmlichen Deflektometrie.

Vergleich in Zahlen

Abbildung 5.29 zeigt im Vergleich die Ergebnisse der Verfahren bei der Positionscodierung als Abweichung von der idealen Geraden bei direkter Aufnahme der Projektionsfläche. Die Werte sind daher als untere Grenze im Idealfall für den hier verwendeten Aufbau zu verstehen. In Tabelle 5.1 sind dazu die resultierende Standardabweichung der ermittelten Position und der notwendige Aufwand für die Mustererzeugung gegenübergestellt. Die beobachteten Werte für die Standardabweichung entsprechen bei den Verfahren mittels Synchronisation den erwarteten Werten für den Quantisierungsfehler. Dabei betrug der verwendete Linienabstand $\ell = 9,2\text{mm}$ und die Schrittweite pro Einzelbild betrug 20mm . Durch die Ausnutzung des thermischen Profils kann die Abweichung der Position deutlich reduziert werden, wobei hier der Einfluss systematischer Fehler nicht berücksichtigt ist.

Bei dem Phasenschiebeverfahren führen die sporadischen Phasensprünge bei der Phasenentfaltung über die Synchronisation noch zu einer vergleichsweise hohen Standardabweichung. Hier kann der Wert der Phasenentfaltung mittels Flood-Fill-Algorithmen als untere Grenze angesehen werden. Eine mögliche Weiterentwicklung des hier vorgestellten Verfahrens wäre eine Kombination mit einer Flood-Fill-Phasenentfaltung, da diese allein noch keine absolute Codierung ermöglicht wird.

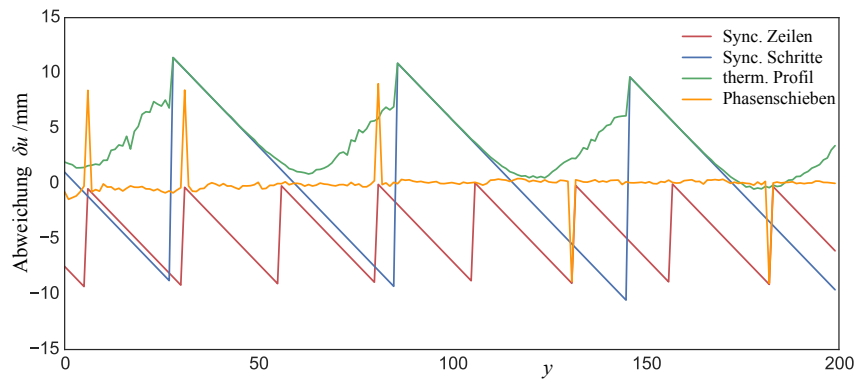


Abbildung 5.29: Vergleich der vorgestellten Verfahren zur Positionscodierung als Abweichung von der idealen Geraden bei direkter Aufnahme der Projektionsfläche. Die Codierv Verfahren durch Synchronisation zeigen die typische Abweichung durch Quantisierungsfehler, wobei die Ausnutzung des thermischen Profils hier zu einer geringfügigen Verbesserung führt. Die Phasenschiebecodierung zeigt hier bei idealen Aufnahmebedingungen bis auf Sprünge durch Fehler bei der Phasenfaltung die geringste Abweichung von der idealen Geraden.

Verfahren	Anzahl Codemuster	diskret/ kontinuierlich	Std. Abw. σ_u /mm
Sync. Zeilen	1 × horiz. 1 × vert.	diskret	2,66
Sync. Schritte	1 ×	diskret	5,89
Therm. Profil	1 ×	kontinuierlich	2,99
PSC + Sync.	4 × horiz. 4 × vert.	kontinuierlich	1,42
PSC + FloodFill	4 × horiz. 4 × vert.	kontinuierlich	0,33

Tabelle 5.1: Vergleich der Verfahren zur Codierung durch Synchronisation, über das thermische Profil und mittels Phasenschiebecodierung (PSC) anhand der Anzahl nötiger Codemuster und erzielter Standardabweichung bei der Positionsbestimmung.

5.6 Ausblick

5.6.1 Ansätze für weitere Codierv Verfahren

Mit den in diesem Kapitel vorgestellten Codierv Verfahren sind die Möglichkeiten zur Positionscodierung von durch Laser erzeugten thermischen Mustern lange nicht ausgeschöpft. Die vorgestellten Verfahren zeigen Richtungen auf, in die weitere Verfahren zur Codierung folgen können, wie die Anpassung der

Hardware und Nutzung des dynamischen oder statischen thermischen Profils der erzeugten Muster.

Korrelation des thermischen Profils über die Zeit

Das Ziel der Positionscodierung über das thermische Profil aus Kapitel 5.3 lässt sich beschreiben als die Ermittlung des Zeitpunkts eines Ereignisses in dem Intensitätssignal eines Pixels über die Zeit. Dabei wird die Kenntnis eines Modells, welches den Verlauf dieses Ereignisses beschreibt dazu genutzt, den gesuchten Zeitpunkt mit einer höheren zeitlichen Auflösung als das quantisierte Intensitätssignal aufweist, zu ermitteln. Ein Ansatz, der sich hierfür anbietet, jedoch in dieser Arbeit nicht verfolgt wurde, ist die Korrelation des Signals mit dem erwarteten Signalverlauf aus dem Modell.

Korrelation mit der Modellannahme

Als Muster für die Korrelation wird hierbei zum Beispiel das Modell des Temperaturverlaufs aus (5.10) benutzt oder, wenn vorhanden, ein detaillierteres Modell. Um ein möglichst exaktes Muster zu erhalten, sollten die Modellparameter vorher anhand von Messungen optimiert werden. Für das Modell aus Kapitel 5.3.1 sind dabei vor allem die Dauer der Aufheizphase t_H als Parameter relevant, da sie die charakteristische Länge des Temperaturverlaufs bestimmt, während alle anderen Parameter nur als Skalierungsfaktor einfließen.

Durch die Korrelation des Intensitätssignal I eines jeden Pixels mit dem optimierten Modell aus (5.10) erhält man so für jedes Pixel ein Korrelationssignal:

$$J(x, y, t) = k \cdot \sum_n I(x, y, [n]) T(0, nt_1 + t), \quad (5.34)$$

wobei die Konstante k hier für eine Anpassung der Einheiten sorgt. Da die Kamera zeitlich diskrete Intensitätswerte für I liefert, das thermische Modell für T aber eine kontinuierliche Funktion darstellt, sollte die Korrelation auch im Vergleich mit der Integrationszeit t_1 der Kamera in entsprechend kleineren Zeitschritten für t erfolgen, sodass J eine zeitlich feinere Quantisierung aufweist. So ist es möglich, die durch die Bildrate der Kamera quantisierten Positionen zeitlich feiner auszulösen. Zudem ist es empfehlenswert, die Funktion T für die Korrelation nur im unmittelbaren Bereich der Aufheizphase auszuwerten,

da hier nur dieses Ereignis im Signal von Interesse ist und der Einfluss von Rauschen außerhalb dieses Bereiches so unterdrückt wird.

Positionsermittlung

Die Ermittlung der Position erfolgt analog zu der Registrierung aus Kapitel 5.2.2. Mit dem Maximum der Korrelationsfunktion J erhält man den Zeitpunkt, an dem der Laserspot in dem Pixel zu sehen war:

$$J_{\text{amax}}(x, y) = \arg \max_t J(x, y, t). \quad (5.35)$$

Die Synchronisierung zwischen Kamera und Laser liefert für den ermittelten Zeitpunkt dann die entsprechende Laserposition, sodass sich die Registrierung $D_{\tilde{u}, \tilde{v}}$ in dem Fall definieren lässt als:

$$D_{\tilde{u}, \tilde{v}}(x, y) = \tilde{p}(J_{\text{amax}}(x, y)). \quad (5.36)$$

Erwartete Fehler

Bei der Registrierung der Position mittels Korrelation mit dem Modell ist mit dem gleichen Fehlerkatalog zu rechnen, wie er auch bei dem in Kapitel 5.3.3 vorgestellten Ansatz anfällt, außer dass hier die Registrierung nicht auf eine sichtbare Aufheizphase beschränkt ist. Durch die Annahme eines vereinfachten Modells werden immer dort Fehler entstehen, wo dieses Modell von dem tatsächlichen Verhalten des Prozesses abweicht.

Ein Vorteil gegenüber dem zuvor vorgestellten Ansatz ist zudem, dass je nach gewählter Musterfunktion, das Ergebnis der Korrelation auf mehr Einzelmessungen basiert und dadurch robuster wird.

Korrelation mit mehrfachen Ereignissen

Eine Erweiterung des Verfahrens wäre eine abgewandelte Mustergenerierung, bei der jede Position der Projektionsfläche von dem Laserstrahl mehrfach beschrieben wird. Dadurch entstehen im Korrelationssignal mehrere Maxima. Einerseits kann durch die Kombination der ermittelten Zeiten die Position robuster ermittelt werden. Gleichzeitig kann aber auch die relative Intensität der Maxima zueinander dazu genutzt werden, um die Position orthogonal zur Schreibrichtung zu erhalten. Die Position relativ zur zentralen Bewegungsachse

kann, abgesehen von der Registrierung, zur Kompensation des systematischen Fehlers durch die Strahlform (siehe Kapitel 5.3.3) genutzt werden.

Anpassung eines besseren thermischen Modells

Um für ein Pixel aus dem beobachteten Intensitätsverlauf auf eine Position in dem thermischen Profil zu schließen, ist zu jedem Zeitpunkt eine möglichst genaue Kenntnis des thermischen Modells auf der Projektionsfläche gesucht. Das vereinfachte, generalisierte Modell aus Kapitel 5.3 ermöglicht eine Approximation der Position in einem sehr begrenzten Zeitraum unter eingeschränkten Bedingungen. Ein spezialisierteres Modell, wie zum Beispiel das ideale Modell aus Kapitel 5.3.1, das den thermischen Prozess detaillierter abbildet, würde hier eine genauere Lokalisierung ermöglichen. Für jedes Pixel werden die Parameter des Modells auf die gemachten Beobachtungen optimiert, um daraus die aktuelle Position des Laserspots zu erhalten.

Der aktuelle Zustand des thermischen Modells auf der Projektionsfläche kann anstatt oder unterstützend zu einem Modell durch zusätzliche Messungen mit einer weiteren Kamera ermittelt werden. Die zweite Kamera würde dabei die Projektionsfläche direkt beobachten, sodass für jeden Punkt der Oberfläche der Temperaturverlauf tatsächlich gemessen wird. Durch pixelweise Korrelation der Intensitätsverläufe beider Kameras, kann danach einem beobachteten Intensitätsverlauf in der Reflexion eine Position auf der Projektionsfläche zugeordnet werden.

Alternative Muster zur Codierung

In den vorgestellten Ansätzen wurde stets das gleiche Streifenmuster verwendet und die Parameter nur geringfügig variiert. Das Lasersystem bietet jedoch durch die Vektorsteuerung die Möglichkeit komplexere Muster zu erzeugen.

Pseudozufallsmuster wären hier auch eine Möglichkeit, die zusammen mit der oben vorgestellten Codierung mittels Korrelation des thermischen Profils ein nachzuverfolgender Ansatz für weitere Forschung auf diesem Gebiet darstellt.

Weiterhin können mit dem Laser auch Prüfmuster für Standardverfahren der optischen Sichtprüfung simuliert werden. Werden quasi statische Linienmuster verwendet, können auch die Auswerteverfahren aus Kapitel 6.3 zur Gewinnung einer Registrierung angewandt werden. Linien- und Streifenmustern können

beispielsweise auch in der Reflexion zur Erkennung von Formdefekten der Oberfläche benutzt werden, indem lokal der Kontrast, Form, oder Ortsfrequenz ausgewertet werden. Eine weitere Möglichkeit wäre die Inspektion mittels inverser Muster, falls die Form und Lage der Oberfläche im Voraus bekannt ist [Wer11]. Auch wenn mit diesen Verfahren in der Regel keine Registrierungsdaten gewonnen werden, kann auf diese Weise zumindest eine Detektion und Lokalisierung von Defekten umgesetzt werden.

Eine deutliche komplexere Mustererzeugung könnte durch die Anpassung der Strahlform selbst erzielt werden. Die Gaußform des rohen Laserstrahls ist symmetrisch, sodass bei der Betrachtung nur eines einzelnen Punktes auf der Oberfläche das resultierende thermische Profil eventuell keine eindeutige Position liefert. Mittels sogenannter *diffraktiver optischer Elemente* kann der Laserstrahl in nahezu beliebige Form gebracht werden. Damit ließe sich das resultierende thermische Profil bei der Bewegung über einen Punkt auf der Projektionsfläche gezielt auf die Anwendung zur Codierung hin optimieren, sodass jede Stelle innerhalb des Laserspots ein individuelles Profil liefert.

5.6.2 Anpassungen des Aufbaus

In dem hier verwendeten Aufbau wurden größtenteils Standardkomponenten ohne Modifikationen verwendet. Die Erfahrungen mit dem Aufbau haben gezeigt, dass gezielte Optimierungen einiger Komponenten die Eignung als Musterprojektionssystem noch verbessern können.

Synchronisation der Hardware von Laser und Kamera

Die in Kapitel 5.1.2 vorgestellte Synchronisierung wurde auf die Gegebenheiten des Aufbaus abgestimmt und mit den zur Verfügung stehenden Mitteln der Hardware realisiert. Hierbei erfolgt die Synchronisierung nur spärlich im Zeilentakt und auch nur passiv, indem das Signal zur späteren Verarbeitung mit aufgezeichnet wird. Durch eine engere Kopplung der Hardware ließe sich hier eine leistungsfähigere Synchronisation hinsichtlich Flexibilität und Genauigkeit realisieren.

Beispielsweise kann die aktuelle Position des Laserspots direkt von der Lasersteuerung ausgelesen werden und als zusätzliche Information in den Datenstrom der Kamera eingefügt werden. Dadurch erhielte man eine Position mit

jedem Einzelbild, ohne das eine nachträgliche Rekonstruktion der Position nötig wäre.

Umgekehrt würde eine Synchronisierung der Bewegung des Lasers auf den Bildtakt der Kamera eine exakte Positionierung in jedem Einzelbild ermöglichen. So ist es nicht nötig die Geschwindigkeit des Lasers auf die Kamera abzustimmen, um einen Gleichtakt und damit zeilenweise gleiche Ausrichtung zu gewährleisten.

Adaptiver Fokus des Lasersystems

Das hier verwendete Lasersystem sieht vor, dass sich der Laserspot stets auf eine Arbeitsebene fokussiert bewegt. Daher besitzt das System eine Fokussachsführung, welche die Fokussierung abhängig von der aktuellen Position auf der Arbeitsebene nachjustiert, sozusagen eine zusätzliche z-Achse für die Steuerung des Laserstrahls. Im Normalbetrieb besteht über die Benutzerschnittstelle kein Zugriff auf die Fokussachsführung und diese wird ausschließlich intern von der Echtzeitsteuerung des Systems kontrolliert.

Mit direkter Kontrolle der Fokussachsdistanz, kann diese zusätzlich neben der Position des Lasers zur Mustererzeugung benutzt werden. Effektiv lässt sich so der Durchmesser des Laserspots auf der Arbeitsebene steuern, da bei den hier vorgestellten Mustererzeugung der Laser stets hinter die Arbeitsebene fokussiert wird. Vom Durchmesser hängt die Breite des Laserprofils senkrecht zur Schreibrichtung und die Stärke des Gradienten des Temperaturanstiegs in Schreibrichtung ab. Einerseits ermöglicht dies eine höhere Auflösung für die auf die Profildicke diskretisierte Positionscodierung mittels Synchronisation aus Kapitel 5.2. Daneben bedeutet dies für die Phasenschiebecodierung aus Kapitel 5.4 auch eine höhere Auflösung. Jedoch erhält man zusätzlich den Vorteil Muster unterschiedlicher Wellenlängen produzieren zu können. Kombiniert man die Phaseninformation mehrerer Wellenlängen, lässt sich die Mehrdeutigkeit der Phase mit Hilfe des *chinesischen Restsatzes* auflösen (siehe Kapitel 5.4.4).

Die Größe des Laserspots beeinflusst natürlich auch die Intensität der Laserstrahlung auf der Arbeitsfläche. Ein kleinerer Durchmesser bei gleichbleibender Laserleistung sorgt für eine stärkere Erwärmung der Oberfläche und damit ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis. Im Gegenzug dauert die Musteranzeige mit einem kleineren Spot entsprechend länger.

Musterzeugung durch direkte Laserstrahlung

Eine naheliegende Möglichkeit bei der Kombination eines CO₂-Lasers und einer Wärmebildkamera ist die direkte Nutzung der Laserstrahlung zur Musterzeugung. Statt nur indirekt die emittierte Wärmestrahlung nach Absorption der Laserstrahlung zu nutzen, würde dabei die an der Projektionsfläche gestreute Laserstrahlung direkt beobachtet.

Im Gegensatz zu dem hier verwendeten Lasersystem, ist für einen solchen Ansatz ein Laser mit einer geringeren Leistung ausreichend. Dabei ist zu beachten, dass selbst die gestreute Strahlung intensiv genug ist, um die Kamera zu beschädigen (siehe Kapitel 5.1.2), weshalb die gestreute Laserstrahlung auf ein für die Kamera verträgliches Maß begrenzt werden muss. Dies kann entweder durch einen optischen Filter erfolgen, der die Laserstrahlung dämpft oder durch eine Mustererzeugung, bei der die Laserleistung flächig verteilt wird. Beispielsweise mit einer Musterprojektion, wie sie im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass man mit erheblich geringerer Laserleistung eine deutlich höhere Strahlstärke der Musteranzeige erzielt. Zusätzlich müssten bei einer metallischen Projektionsfläche, die rau genug ist, um die Laserstrahlung zu streuen, keine thermischen Prozesse an der Oberfläche berücksichtigt werden. Hier wurde diesem Ansatz jedoch nicht nachgegangen, da mit dem verwendeten Lasersystem ein solcher Betrieb unter Berücksichtigung der Laserschutzvorschriften und der Schutz der Kamera vor direkter Lasereinstrahlung erhebliche Modifikationen des Aufbaus erfordern.

Projektion des Musters

Eine direkte Erzeugung des Musters durch eine Projektion würde das Problem der verzerrten Sinusmuster aus Kapitel 5.4.5 zumindest teilweise lösen, insofern dass bei der unscharfen Abbildung eines Sinusmusters als Ganzes, nur der Kontrast vermindert wird, das Sinusprofil an sich aber erhalten bleibt. Eine solche Mustererzeugung würde ein anderes Design für das Lasersystem erfordern, bei dem das Muster direkt durch eine Projektion entsteht, beispielsweise durch *diffraktive optische Elemente* (siehe Kapitel 2.2.1), oder Interferenz an eine Gitter, sodass der Laserstrahl weit aufgefächert ein Sinusmuster projiziert.

Damit würden sich zwei Möglichkeiten zur Erzeugung der thermischen Muster ergeben. Einerseits eine indirekte Mustererzeugung, bei der die Laserleistung

entsprechend erhöht werden müsste, um eine schnelle, flächige Erwärmung der Oberfläche zu ermöglichen, ohne dass der thermische Diffusionsprozess das Muster wieder zerstört. Andererseits kann das projizierte Muster auch direkt erzeugt werden, indem das Streulicht der Laserstrahlung an der Projektionsfläche direkt genutzt wird. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird dafür die Projektionsfläche so konzipiert, dass Sie das Laserlicht streut, anstatt es zu absorbieren. Die Erwärmung der Oberfläche spielt in dem Fall keine Rolle.

Optimieren der Eigenschaften der Projektionsfläche

Neben den Parametern des Lasers selbst, trägt auch das verwendete Material der Projektionsfläche erheblich zu dem Verhalten des thermischen Prozesses bei. Die Approximation des Temperaturverlaufs mit dem Modell aus Kapitel 5.3.1 zeigt die Abhängigkeit von den einzelnen thermischen Stoffwerten des Materials auf. So ist aus (5.7) ersichtlich, mit welcher Geschwindigkeit die Wärmediffusion ablaufen wird und (5.9) lässt den Einfluss auf die Maximaltemperatur abschätzen.

Durch Auswahl von Materialien mit entsprechenden Stoffwerten lässt sich so das thermische Profil gezielt anpassen, um die für die Mustererzeugung gewünschten Eigenschaften zu optimieren.

Rückseitenprojektion des Musters

Die derzeitige Konfiguration des Aufbaus, mit allen Komponenten vor der Projektionsfläche beschränkt die Freiheitsgrade bei der Positionierung des Prüfobjekts und der Kamera, da der Projektionskegel des Lasers stets frei bleiben muss. So können Prüfobjekt und Kamera immer nur unter oder neben diesem Bereich positioniert werden, sodass in der Regel nicht die optimale Prüfposition erreicht werden kann.

Abhilfe kann hier eine Rückseitenprojektion bringen, wobei der Laser die Projektionsfläche von hinten bestrahlt. Dabei muss das Material der Projektionsfläche vergleichsweise dünn sein und eine gute Wärmeleitfähigkeit durch das Material hindurch gewährleisten, sodass die rückseitig absorbierte Wärme mit möglichst geringen Verlusten auf der Vorderseite emittiert werden kann.

Diese Konfiguration erfordert zwar mehr Bauraum für den Aufbau, bringt im Gegenzug aber eine deutlich höhere Flexibilität für die Positionierung der Komponenten. Außerdem kann so ein gekapselter Betrieb des Lasers ermöglicht werden, sodass der Aufbau hinsichtlich der Laserschutzrichtlinien sicherer betrieben werden kann. Darüber hinaus kann die Kamera in dem Fall ohne einen Schutzfilter betrieben werden.

Skalierbarkeit des Verfahrens

Die Projektionsfläche bei dem hier verwendeten Aufbau bot eine maximale Projektionsfläche von 1 m auf 1 m, war dabei jedoch nur durch die verwendeten Spiegelscanner und Optik beschränkt. Mit einer anderen Optik wären durchaus Projektionsflächen von mehreren Quadratmetern denkbar. Außerdem bietet die Verfügbarkeit von deutlich leistungstärkeren CO₂-Lasersystemen die Möglichkeit, den höheren Zeitbedarf zum Beschreiben größerer Flächen zu kompensieren. So wäre, zumindest theoretisch, die Inspektion großer Prüfobjekte durch eine thermische Musterprojektion auf entsprechend große Projektionsflächen realisierbar.

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie die dynamische, thermische Muster mittels eines Laser auf einer Projektionsfläche erzeugt werden können. Darauf aufbauend wurden drei Verfahren vorgestellt, die mit unterschiedlicher Herangehensweise die erzeugten thermischen Muster für eine Positionscodierung auf der Projektionsfläche nutzen.

Der erste Ansatz in Kapitel 5.2 setzt auf eine enge Kopplung der Mustererzeugung und Bildaufnahme, sodass beide Prozesse synchron ablaufen und für jedes Einzelbild die Position des Laserspots bekannt ist. Dies ermöglicht eine schnelle und robuste Registrierung zwischen Kamerapixeln und Punkten auf der Projektionsfläche. Jedoch ist die ermittelte Position hierbei noch auf die Breite und Schrittweite des Laserspots quantisiert.

Ausgehend von der Registrierung des ersten Verfahrens wurde im zweiten Ansatz in Kapitel 5.3 das charakteristische thermische Profil dazu genutzt, um eine feinere Positionsbestimmung zu realisieren. Dazu wurde ein vereinfachtes

Modell für das thermische Verhalten der Oberfläche vorgestellt, anhand dessen sich der Einfluss physikalischer Größen abschätzen lässt und eine Modellierung des Temperaturverlaufs für kurze Zeiträume erlaubt. Auf Basis der Annahmen aus dem Temperaturmodell wurde ein einfacher Ansatz zur Positionsermittlung umgesetzt, der für jedes Pixel den Zeitpunkt der Erwärmung innerhalb der Integrationszeit eines Einzelbildes ermittelt und dadurch die Beschränkung durch die Bildrate der Kamera umgeht. Hier wurden auch die Fehler aufgezeigt, die mit den gemachten Modellannahmen in Kauf genommen werden und wie dieses für zukünftige Verfahren mit einem solchen Ansatz verbessert werden können.

Für den dritten Ansatz, der in Kapitel 5.4 beschrieben wird, wurde die Phasenschiebecodierung als ein Standardverfahren zur Positionscodierung in der Deflektometrie mit der Mustererzeugung durch den Laser realisiert. Dazu wurde die Ähnlichkeit des erzeugten thermischen Musters zu einem Sinusprofil ausgenutzt und mittels einer Optimierung die Musterparameter soweit angepasst, dass das resultierende, von der Kamera beobachtete Profil näherungsweise einem Sinus entspricht. Mit den Sinusmustern können dann Aufnahmen der Codemuster für eine herkömmliche Phasenschiebecodierung gemacht werden. Die notwendige Phasententfaltung wurde mit Hilfe der Registrierung aus dem ersten Ansatz ermöglicht, da mit dem Laser keine Sinusmuster mit unterschiedlichen Wellenlängen erzeugt werden konnten, die für die Anwendung sonst üblicher Verfahren notwendig sind.

Insgesamt zeigt sich der Laser als ein vielseitiges Werkzeug zur Positionscodierung mittels thermischer Muster. Es zeigt sich, dass die zunächst als Einschränkung erscheinenden dynamischen Eigenschaften der thermischen Muster selbst zur Positionscodierung herangezogen werden können, wenn man sie sich zunutze macht. Die unterschiedlichen Ansätze der hier vorgestellten Verfahren zeigen dabei verschiedene Wege für diese Nutzung auf. Dazu weisen die Verbesserungen des Aufbaus, wie sie in Kapitel 5.6.2 vorgeschlagen werden, oder die Weiterentwicklungen der Codierverfahren aus Kapitel 5.6.1 auf die Möglichkeiten für zukünftige Forschung und Entwicklung in dem Bereich der Positionscodierung durch Laser erzeugte, thermische Muster hin.

Statische Muster bei linearer Bewegung

Bei den in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Verfahren wurden jeweils dynamische thermische Prozesse zur Erzeugung der notwendigen thermischen Codemuster eingesetzt. Dabei ging es stets darum, veränderliche Muster anzeigen zu können. Der mit solchen Verfahren verbundene Nachteil ist die Kontrolle des Wärmetransports. Um Wärme in ein Material einzubringen und um es wieder abzukühlen, ist stets Energie und ein von den Stoffeigenschaften abhängiger Zeitaufwand nötig. Dazu ist der Wärmetransport nur schwer einzugrenzen und die Diffusion von Wärme ist dabei als Störfaktor zu berücksichtigen.

Für die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren wird ein anderer Ansatz verfolgt, bei dem ein statisches thermisches Muster verwendet wird. Solche Muster sind vergleichsweise einfach zu erzeugen und können problemlos mit hoher Intensität angezeigt werden. Da hierbei in der Regel ein thermisches Gleichgewicht besteht, herrscht auch nur ein statischer Wärmefluss, sodass kein dynamischer Diffusionsprozess berücksichtigt werden muss. In diesem Kapitel wird gezeigt, wie mit solchen Mustern eine Positionscodierung für die Deflektometrie realisiert werden kann. Dabei wird in verschiedenen Ansätzen die Relativbewegung von Muster, Kamera und Prüfobjekt zueinander ausgenutzt, um die zu prüfende Oberfläche zu inspizieren.

Zunächst werden in Kapitel 6.1 die verwendeten Aufbauten beschrieben und anschließend in Kapitel 6.2 die verschiedenen Möglichkeiten zur Konfiguration eines solchen Setups vorgestellt. Zur Auswertung der Bilddaten wird in Kapitel 6.3.2 ein Verfahren vorgestellt, das eine subpixelgenaue Registrierung der Position ermöglicht. Abschließend werden die Ergebnisse präsentiert und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen gegeben.

6.1 Versuchsaufbau

Bei allen hier verwendeten Konfigurationen besteht der Aufbau des deflektometrischen Sensors grundlegend immer aus den drei Komponenten: Ein Mustererzeuger, der stets aus einem statischen Muster besteht, der Kamera für die Bildaufnahme und einem mechanischen Aktor, welcher für eine Relativbewegung zwischen den Komponenten und dem Prüfteil sorgt.

6.1.1 Draht als Mustererzeuger

Zur Erzeugung des hier verwendeten Linienmusters wurde ein elektrisch geheizter Konstantan-Draht benutzt. Hinsichtlich des nötigen Materialaufwands bietet er eine sehr einfache und dennoch effiziente Möglichkeit zur Mustererzeugung. Dadurch dass der Draht problemlos freitragend und isoliert gespannt werden kann, lässt er sich ohne Wärmeverluste durch Wärmeleitung mit vergleichsweise geringem Energieaufwand konstant auf hohen Temperaturen halten. Durch die geringe Masse des zu heizenden Materials erreicht er zudem sehr schnell eine konstante Temperatur, sodass die Intensität des Musters mit möglichst kurzen Wartezeiten variiert werden kann. Bei den verschiedenen vorgestellten Verfahren wird der Draht in der Regel bei einer Temperatur von circa 200°C betrieben (bei 15 V Betriebsspannung und 3,5 A Stromfluss). In Abbildung 6.1 ist das Linienmuster des Drahtes und die resultierende Reflexion auf einer diffus spiegelnden Aluminiumoberfläche zu sehen.

Das maßgebende Entscheidungsmerkmal für den Einsatz eines Drahtes ist, neben der einfachen Umsetzbarkeit, die damit erzielbare Intensität der Muster. Wie in Kapitel 6.1.2 noch vorgestellt wird, kann damit die Kamera mit einer kleineren Blende versehen werden, was eine größere Tiefenschärfe für die Aufnahmen bringt. Ein Draht als Muster, beziehungsweise Linienmuster im

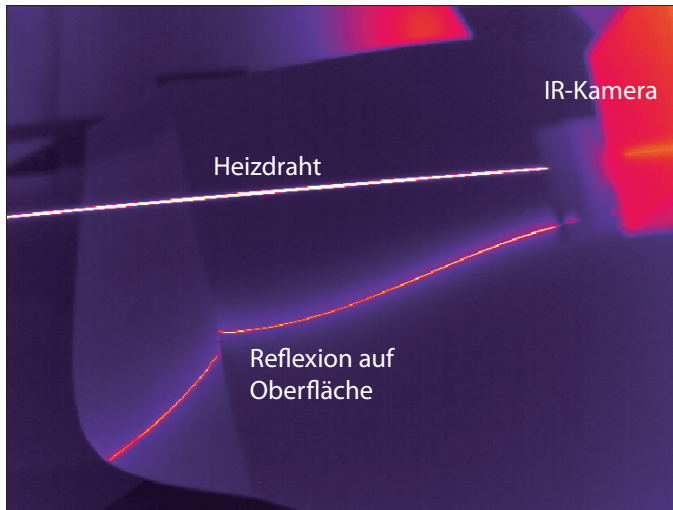


Abbildung 6.1: Draht als Linienmuster im thermischen IR-Spektrum. Der Konstant-Draht wird auf ca. 200°C erhitzt und ergibt ein sehr kontrastreiches Muster. Die Reflexion auf der Oberfläche eines Karosserierohblechs aus Aluminium darunter ist deutlich zu erkennen. Der zugehörige Aufbau ist in Abbildung 6.11 zu sehen. Das Bild wurde mit einer zweiten IR-Kamera aufgenommen.

Allgemeinen, haben darüber hinaus den Vorteil, dass die Reflexion des Musters für die Kamera vorwiegend im fokussierten Bereich der Oberfläche zu sehen ist, wenn die Konfiguration des Aufbaus eine starre Konstellation zwischen Kamera und Muster vorsieht. Die Position der Reflexion ist zwar abhängig von der Neigung der Oberfläche, jedoch zeigen viele praxisrelevante Oberflächen eine primär flache Geometrie, bei der eine solche Konfiguration einfach zu erzielen ist.

Für eine der hier vorgestellten Anwendungen ist eine Modulation der Intensität des Musters über die Zeit notwendig. Dazu wird über einen Mikrocontroller mit einer zusätzlichen Leistungselektronik die Versorgungsspannung und damit auch die Verlustleistung am Draht durch *Pulswellenmodulation* kontrolliert. So kann die Temperatur des Drahtes, oder über zusätzliche Kanäle auch die mehrerer Drähte, geregelt werden.

Um die Ausdehnung des Drahtes bei Erwärmung zu kompensieren, wird er durch Federn unter konstanter Zugspannung gehalten. Dadurch wird ein Durch-

hängen des Drahtes vermieden und gleichzeitig ein Schwingen des Drahtes bei Bewegung möglichst gering gehalten. Dennoch ist darauf zu achten, dass der Draht bei abrupten Bewegungen nachschwingt, sodass bei einem langen Draht eine zusätzliche Dämpfung oder Wartezeiten zwischen den Einzelaufnahmen vorgesehen werden müssen.

6.1.2 Kamera

Als Wärmebildkamera kommt ein System mit einem Mikrobolometersensor zum Einsatz (siehe Kapitel 3.4.1). Bei den hier eingesetzten Verfahren ist dabei die feste Integrationszeit t_i des Sensors teilweise ein limitierender Faktor. Da die Inspektion durch eine Relativbewegung erfolgt, bei der das lineare Muster kontinuierlich über die Oberfläche bewegt wird, hängt die Auflösung der Verfahren in Bewegungsrichtung von der Schrittweite pro Einzelbild der Kamera ab. Damit ist die maximal mögliche Auflösung durch Geschwindigkeit und Integrationszeit begrenzt.

Anwendungsspezifische Schlitzblende

Optiken für Wärmebildkameras weisen im Allgemeinen eine feste Brennweite bei einer kleinen Blendenzahl auf, da sie für einen maximalen Transmissionsgrad mit möglichst wenigen Linsenelementen gefertigt werden. Hier wurde eine Optik mit einer Blende von 1,0 verwendet. Die weite Blende sorgt für eine sehr eingeschränkte Schärfentiefe, die den scharf abgebildeten Bereich bei flachen Sichtwinkeln auf die betrachtete Oberfläche zunehmend einschränkt.

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird in diesem Kapitel bei einigen Verfahren eine zusätzliche Blende vor der Kamera verwendet. Ein solcher Ansatz wurde bereits in [Su+11] zur Erweiterung der Tiefenschärfe von Wärmebildkamerasystemen eingesetzt. Da die statischen Muster im Vergleich mit den Verfahren aus den vorherigen Kapiteln mit höheren Temperaturen betrieben werden können, kann die geringere Lichtempfindlichkeit der Kamera durch die kleinere Blende mit einer höheren Musterintensität kompensiert werden. Als Kompromiss zur Erhöhung der Tiefenschärfe bei möglichst geringem Intensitätsverlust kann statt einer einfachen Lochblende auch eine direktionale Blende verwendet werden. Die verwendeten Linien als Muster weisen eine vorwiegend eindimensionale Ausdehnung auf, sodass mit einer Schlitzblende die Öffnung der Blende nur in eine Richtung begrenzt werden muss.

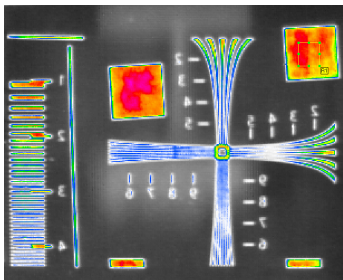


(a)

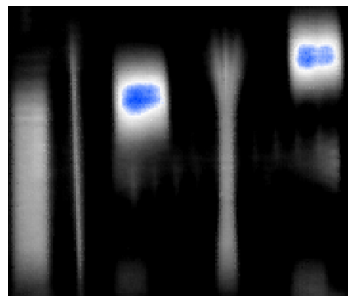


(b)

Abbildung 6.2: Die verwendete Wärmebildkamera (a) wurde mit einer zusätzlichen Schlitzblende vor der Optik ausgestattet (b), um eine richtungsabhängige Erhöhung der Schärfentiefe zu erhalten.



(a) Testmuster im Fokus.



(b) Unscharfe Abbildung bei weiter entferntem Testmuster.

Abbildung 6.3: Effekt einer vertikalen Schlitzblende vor der Kamera bei einem Testmuster. Während in Abbildung (b) in der Mitte des Musters an horizontalen Strukturen kein Kontrast mehr vorhanden ist, sind vertikale Strukturen noch zu erkennen. Die Farben im Thermogramm stehen für die Intensität der Bildpunkte.

Abbildung 6.2b zeigt die verwendete Schlitzblende. Je nach angewendetem Verfahren und Muster wird die Blende in Musterrichtung ausgerichtet, sodass sich eine höhere Schärfentiefe orthogonal zur Ausrichtung ergibt. Die Schlitzblende kommt hier jedoch nur zum Einsatz, wenn Kamera und Muster fest zueinander ausgerichtet sind. Bei wechselnder Musterrichtung muss auf die Blende verzichtet oder eine Lochblende verwendet werden. Der Effekt der Schlitzblende ist in Abbildung 6.3 zu sehen. Während die meisten Strukturen im Bild keinen Kontrast mehr aufweisen, bleiben Strukturen mit Kanten orthogonal zur Ausrichtung der Blende erhalten. Bei der verwendeten Blende mit einer Breite von 7,5mm kann auf diese Weise der Bereich der Schärfentiefe um fast das Dreifache vergrößert werden¹. Für ein Objektiv mit 30 mm Brennweite bei einem Fokusabstand von 250 mm vergrößert sich der Bereich bei einer Ortsfrequenz von $0,5 \frac{\text{Periode}}{\text{mm}}$ von 110 mm auf 290 mm und bei einer Ortsfrequenz von $1 \frac{\text{Perioden}}{\text{mm}}$ vergrößert sich der Bereich von 65 mm auf 190 mm.

6.1.3 Aktorik des Aufbaus

Es kamen zwei unterschiedliche Aktorsysteme zum Einsatz, um die nötige Relativbewegung zwischen den Komponenten zu realisieren: zum einen ein Industrieroboter und zum anderen eine Linearachse.

Roboter

Zur flexiblen Umsetzung verschiedener Prüfaufgaben stand ein *KUKA* Industrieroboter zur Verfügung, der in Abbildung 6.4 zu sehen ist. Das verwendete Modell ist ein *KR 60 HA* mit 6 Achsen, der bei bis zu 60 kg Traglast eine Positionswiederholgenauigkeit von $\pm 0,05$ mm erreicht.

Die Ansteuerung des Roboters erfolgte über eine *KUKA - KR C2* Steuerung. Über ein zusätzliches Softwaremodul zur Netzwerkkommunikation erhält der Roboter Befehle zur Positionierung von einem dedizierten Rechner zur Bildauswertung. So lassen sich Kamera und Muster gezielt positionieren oder es können Bahnen über dem Prüfobjekt gefahren werden.

¹ Gemessen mit dem Kontrasttestmuster aus Abbildung 6.3, indem der Nah- und Fernpunkt ermittelt wird, bei dem mit der Kamera kein Musterkontrast mehr feststellbar ist.



Abbildung 6.4: Der verwendete Industrieroboter: Ein *KUKA KR 60 HA* ermöglicht das Handling von Kamera und Mustererzeugern. Hier ist ein einfacher Draht zur Mustererzeugung zu sehen. Bei dieser Konfiguration stehen Kamera und Prüfobjekt unbewegt vor dem Roboter.

Linearachse

Eine Linearachse bietet im Gegensatz zu einem Roboter eine einfachere Aktorik zur Realisierung der Relativbewegung. Bei dieser Anwendung wird das Prüfobjekt mit der Linearachse bewegt, während Muster und Kamera darüber fest positioniert sind. Eine praxisrelevante Anwendung, bei der eine vergleichbare Konfiguration vorkommt, ist die Inspektion von Prüfobjekten an einem Förderband in der Produktion. In einem Werksversuch konnte ein solcher Aufbau mit dem hier vorgestellten Ansatz auch in einem Produktionsumfeld getestet werden.

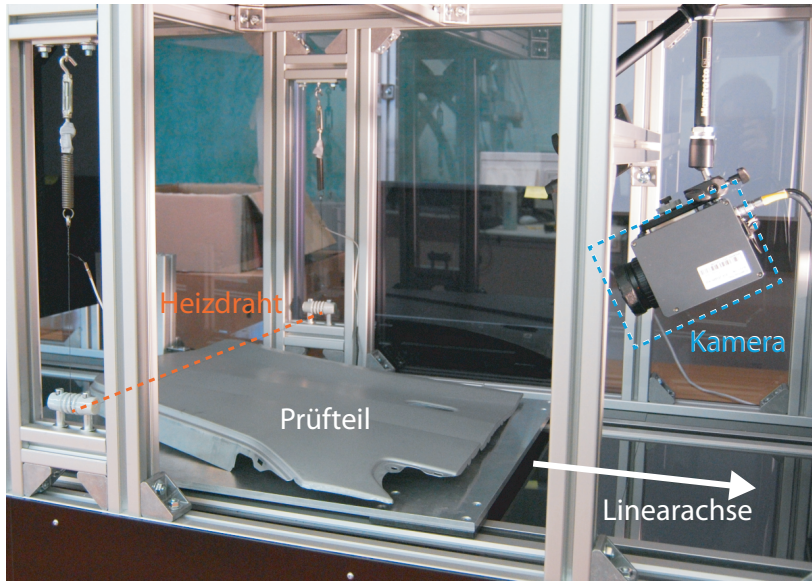


Abbildung 6.5: Versuchsaufbau mit einer Linearachse. Während die Kamera und der Heizdraht als Mustererzeuger starr montiert sind, wird das Prüfobjekt auf einem Schlitten linear unter dem Sensor entlang bewegt.

Für die Versuche im Labor wurde eine Linearachse verwendet, bei der eine Plattform mit dem Prüfobjekt motorbetrieben bewegt werden konnte (siehe Abbildung 6.5). Zur Synchronisierung wird mit einer Lichtschranke die aktuelle Position des Prüfobjekts erkannt, sodass unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit die relative Position von Sensor zu Prüfobjekt ermittelt werden kann.

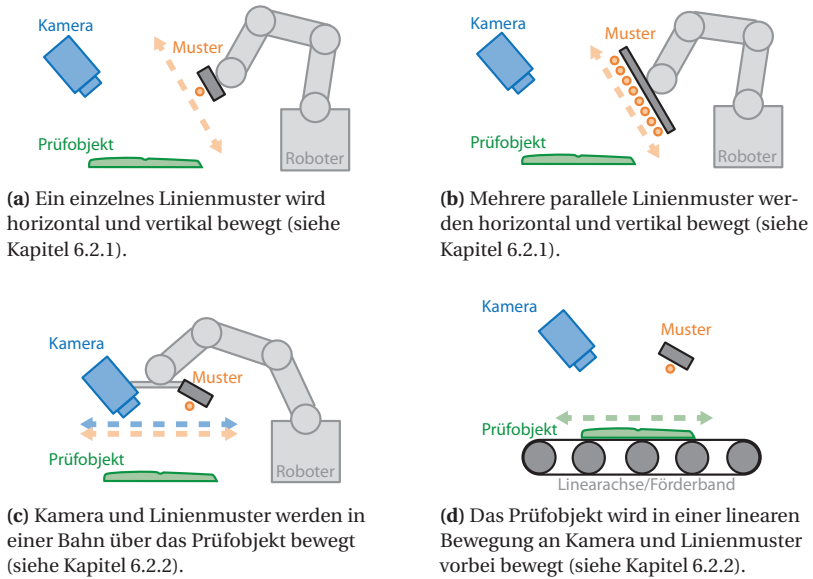


Abbildung 6.6: Die verwendeten Konfigurationen bei der Inspektion mit linearen Mustern. In Abbildung (a) und (b) wird eine virtuelle Monitorebene erzeugt, indem der Roboter die Muster in einer Ebene bewegt. Die beiden anderen Konfigurationen in (c) und (d) nutzen eine lineare Relativbewegung zwischen dem Prüfobjekt und der Kamera mit dem Muster.

6.2 Positionscodierung aus der Bewegung

Die Registrierung erfolgt mit einem linearen Muster durch die Relativbewegung der Komponenten Kamera, Muster und Prüfobjekt zueinander. Dabei wird jeweils nur eine der Komponenten relativ zu den anderen bewegt. Von den drei möglichen Kombinationen werden hier zwei angewendet: die Bewegung des Prüfobjekts relativ zu Kamera und Muster und die Bewegung des Musters relativ zu Prüfobjekt und Kamera. Abbildung 6.6 zeigt schematisch die unterschiedlichen Konfigurationen, die hier verwendet wurden und im Folgenden beschrieben werden.

6.2.1 Relativbewegung des Musters

Die meisten Verfahren zur Oberflächeninspektion mittels strukturierter Beleuchtung nutzen hauptsächlich Codemuster, die aus Streifenmustern bestehen, wie zum Beispiel Binärcodes oder Sinusmuster, bei denen die Position in horizontaler und vertikaler Richtung in der Regel jeweils mit einer eigenen Codesequenz codiert wird (siehe Kapitel 3.1.1). Da im Falle der Deflektometrie mittels der Positionscodierung Koordinaten auf einer Monitor- oder Projektionsfläche codiert werden, liegt es nahe, mit den hier verwendeten Linienmustern Koordinaten auf einer virtuellen Monitorebene zu codieren, indem die Linienmuster in einer Ebene bewegt werden. Durch die Registrierung zwischen Kamerapixeln und der Position auf einer Ebene ergibt sich der typische Aufbau eines Deflektometriesensors.

Mustererzeugung mit einer Linie

Der einfachste Ansatz einer reihen- und zeilenweisen Codierung auf einem Monitor ist, eine Linie auf jeder Spalte und Zeile des Monitors nacheinander anzuzeigen und im Kamerabild das Intensitätsmaximum zu registrieren. So kann jedem Kamerapixel der beobachtete Punkt P auf der Schirmfläche in Zeilenrichtung v beziehungsweise Spaltenrichtung u zugeordnet werden, um so die gesuchte Registrierung $D_{u,v}$ von Kamerapixeln (x, y) auf Musterkoordinaten (u, v) zu erhalten. Abbildung 6.7a veranschaulicht die Mustererzeugung.

Dieser Ansatz zur deflektometrischen Untersuchung wurde bereits in [Su+10] vorgestellt und unabhängig davon in [Fab12] als *Linienverschiebe-Deflektometrie* (engl.: *Line Shift Deflectometry*) eingeführt. In beiden Fällen wurde das Linienmuster mittels einer Linearachse bewegt, wobei die Anwendung, die Vermessung optischer Spiegel und Linsen, eine exakte Ausrichtung aller Komponenten voraussetzt. Hier soll die Mustererzeugung flexibler erfolgen, indem der Heizdraht aus Kapitel 6.1.1 als Musterquelle mit dem Robotersystem aus Kapitel 6.1.3 bewegt wird, sodass die codierte virtuelle Monitorebene in Position und Ausrichtung dem Prüfobjekt angepasst werden kann. Dieser Ansatz entspricht der in Abbildung 6.6a dargestellten Konfiguration des Aufbaus.

Bei dem Einsatz nur eines einzelnen Drahtes lässt sich dies mit einer einfachen Aufhängung für den Draht am Roboter umsetzen. Die Länge des Drahtes ist entsprechend der benötigten Mustergröße und dem zur Verfügung stehenden Arbeitsraum für den Roboter anzupassen. Abbildung 6.4 zeigt ein Beispiel für

eine kurze Musterquelle (mit einer Länge von 500 mm) zur Inspektion kleiner Prüfobjekte, während sich der Aufbau in Abbildung 6.11 (bei einer Länge von 1000 mm) zur Inspektion größerer Objekte eignet.

Mit einem so umgesetzten virtuellen Monitor liegt die Idee nahe, aus der Deflektometrie übliche Codierv Verfahren einzusetzen, und es ist auch durchaus möglich, Binärcodes oder Sinusmuster anzuzeigen, indem die Intensität des Drahtes über die Zeit moduliert wird und die Bilder über die Bildserie fusioniert werden. Jedoch wird durch die Verwendung von Mustersequenzen hier kein Vorteil erzielt. Da zur Erstellung eines Codebildes der Draht in jedem Fall jede Position des Musters anfährt, kann die Position des Drahtes selbst zur Codierung benutzt werden. Sequenzen von Codemustern würden hier die Aufnahmezeiten nur weiter in die Länge ziehen, ohne einen zusätzlichen Nutzen zu bringen. Die Kombination von Linienmustern mit solchen Codebildern ist dann sinnvoll, wenn mehrere Linien zur Mustererzeugung benutzt werden, wie in Kapitel 6.2.1 vorgestellt wird.

Mustererzeugung mit mehreren Linien

Da bei der Mustererzeugung mit nur einer Linie der Draht mechanisch über die komplette zu codierende Fläche bewegt werden muss, ist der Zeitaufwand abhängig von der Größe der Fläche und der benutzten Schrittweite entsprechend hoch. Bei den in diesem Kapitel gezeigten Aufnahmen liegt der Zeitaufwand in der Größenordnung von mehreren Minuten bis zu einer Stunde. Eine Möglichkeit, die Aufnahme zu beschleunigen, ist das Muster aus mehreren Linien aufzubauen, um so die zu codierende Fläche schneller abzudecken, was der Konfiguration in Abbildung 6.6b entspricht. Die Codierung erfolgt wie bei einer einzelnen Linie, nur dass sich der nötige Weg der Bewegung verkürzt. Bei einer äquidistanten Anordnung der Linien über die Fläche, wie sie in Abbildung 6.7b zu sehen ist, verkürzt sich damit die Bewegung auf den Abstand ℓ_D der Linien zueinander. Dabei wird jeder Punkt auf der Fläche nur einmal von einer Linie passiert. Ein entsprechender Aufbau am Roboter ist in Abbildung 6.9 zu sehen.

Das Problem bei der Decodierung mehrerer Linien ist, dass das Intensitätsmaximum sich nicht eindeutig einer Linie zuordnen lässt. Dadurch ist die Positionsinformation nur innerhalb der Bewegungsstrecke ℓ_D eindeutig und man erhält über die komplette codierte Strecke gesehen ein periodisches Signal, was durch eine Phasenentfaltung wieder rekonstruiert werden muss (siehe

Abbildung 6.8). Hier können die bereits in Kapitel 5.4.4 vorgestellten Verfahren zur Phasenfaltung eingesetzt werden. Eine Möglichkeit wäre mittels der *Flood-Fill-Algorithmen* aus Kapitel 5.4.4 die Phasensprünge im Signal aufzulösen, wenn der codierte Bereich im Bild eine zusammenhängende Fläche bildet. Durch die Möglichkeit, die Drähte zusätzlich in ihrer Intensität zu modulieren, wie im vorherigen Abschnitt angesprochen wurde, kann auch ein zusätzliches Phasensignal erzeugt werden (siehe Abbildung 6.10), um so die Phasenfaltung durch die Kombination mehrerer Wellenlängen, wie in Kapitel 5.4.4 erläutert wurde, zu realisieren.

Wenn auch der Einsatz mehrerer Drähte bei der Mustererzeugung Zeit erspart, wurden für die späteren Aufnahmen in diesem Kapitel hauptsächlich Muster mit einzelnen Drähten verwendet. Der Nachteil dieses Ansatzes ist die größere Fläche des Mustergenerators, wie in Abbildung 6.9 zu erkennen ist. Für großflächige Muster wird dadurch die Handhabung entsprechend umständlicher und durch die Größe auch eingeschränkt. Darüber hinaus war bei Experimenten mit mehreren Drähten die Erzeugung von flächigen Intensitätsmustern, wie sie in Abbildung 6.10b zu sehen sind, zu ungleichmäßig, um daraus ein Phasensignal zur Entfaltung zu gewinnen. Hier würde eine breitere Lichtquelle Abhilfe schaffen, die mehr Fläche abdeckt als nur ein dünner Draht. Da mit mehreren Drähten bis auf eine schnellere Codierung keine weiteren Vorteile erzielt werden, wird hier zugunsten einer einfacher zu handhabenden Codierung mit nur einem Draht gearbeitet.

6.2.2 Relativbewegung des Prüfobjekts

Wenn man davon absieht, den typischen Aufbau eines Deflektometriesensors umzusetzen, bieten sich weitere Möglichkeiten zur Oberflächeninspektion an, die dennoch auf dem Prinzip der Deflektometrie beruhen. Bei den beiden folgenden Ansätzen erfolgt die Inspektion der Oberfläche durch eine Relativbewegung zwischen Sensor (Kamera und Muster) und dem Prüfobjekt. Dabei ist die Messung nicht mehr auf das Blickfeld der Kamera beschränkt und der Sensor kann über die Oberfläche geführt werden oder umgekehrt das Prüfobjekt am Sensor vorbei, sodass die Inspektion in Bahnen erfolgt.

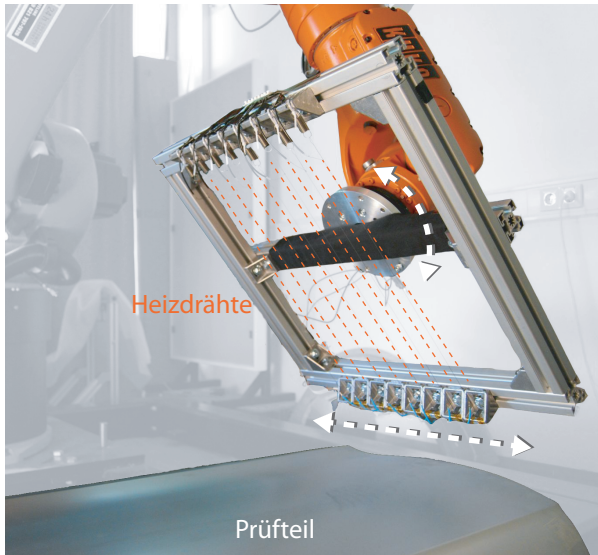
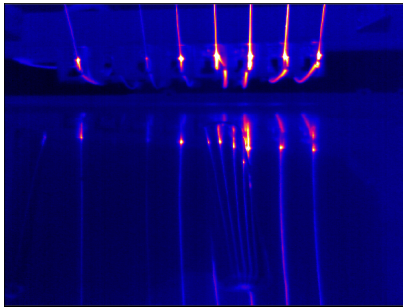
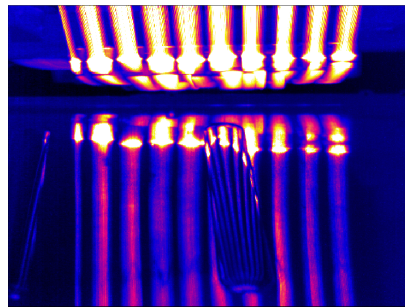


Abbildung 6.9: Muster mit mehreren Drähten am Roboter. Mittels des Roboters werden die Drähte in horizontaler und vertikaler Richtung linear bewegt, wobei die Intensität der Drähte einzeln variiert werden kann. So kann ein Muster in einer virtuellen Monitorebene erzeugt werden.



(a) Einzelbild aus der Bildserie mit intensitätsmodulierten Drähten.



(b) Aus der Bildserie fusioniertes Sinusmuster zur Codierung mittels Phasenschiebungsverfahren.

Abbildung 6.10: Codierung mit einem Mustererzeuger aus mehreren Drähten, wie er in Abbildung 6.9 zu sehen ist. Die oberen Hälften der Bilder zeigen den Mustererzeuger direkt, während in der unteren Hälfte die Reflexion in der zu inspizierenden Oberfläche zu sehen ist.

Durch die starre Anordnung von Kamera und Mustererzeuger, kann die Reflexion des Musters stets im Blickfeld der Kamera gehalten werden¹.

Hierbei kann der Vorteil der zusätzlichen Schlitzblende aus Kapitel 6.1.2 genutzt werden. Da die Ausrichtung des Musters konstant bleibt, kann die Blende dem Muster angepasst und damit die Tiefenschärfe erhöht werden. Der größte Vorteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass so eine quasi endlose Inspektion der Oberfläche möglich ist. Die im Folgenden vorgestellten Konfigurationen des Aufbaus zeigen zwei praxisnahe Einsatzmöglichkeiten dieses Konzepts.

Jedoch ist dieser Ansatz auch mit Nachteilen verbunden. Da das Linienmuster nur in einer Richtung über die Oberfläche bewegt wird, erhält man entsprechend auch nur eine eindimensionale Neigungsinformation der Oberfläche. Diese Information ist jedoch für die meisten Prüfanwendungen ausreichend, um Defekte und Formänderungen der Oberfläche zu erfassen. Eine Erweiterung wären hier Muster mit Linien in unterschiedlicher Ausrichtung, wie sie in Kapitel 6.5.1 vorgestellt werden, wobei jedoch der Vorteil der zusätzlichen Blende nicht mehr genutzt werden kann. Außerdem resultiert der Ansatz eines scannenden Sensors in einem nahezu isometrischen Kameramodell, im Gegensatz zu dem üblichen Lochkameramodell bei einem herkömmlichen Deflektometrie Sensor. Hierauf wird in diesem Kapitel noch eingegangen.

Robotergeführter Sensor

Der Einsatz eines Roboters ist eine Möglichkeit die Relativbewegung zwischen der Kamera mit dem Muster und dem Prüfobjekt umzusetzen. Wie das Konzept in Abbildung 6.6c zeigt, sind dabei Kamera und Muster fest miteinander verbunden und können mit dem Roboter positioniert werden. Ein entsprechender Laboraufbau ist in Abbildung 6.11 zu sehen. Mit einer solchen Konfiguration ist auch die Inspektion großflächiger Prüfobjekte möglich, indem die Oberfläche in mehreren Bahnen »abgescannt« wird.

Ein Nachteil einer solchen Führung des Sensors sind Vibrationen des Drahtes, die durch die Bewegung auftreten können. Für eine schnelle Inspektion

1 Natürlich kann das Muster bei starker Neigung oder falscher Positionierung des Sensors aus dem Blickfeld der Kamera reflektiert werden. Man kann jedoch davon ausgehen, dass bei bekannter Geometrie des Prüfobjekts die Position des Sensors im Vorfeld entsprechend angepasst werden kann.

großer Prüfobjekte sind diese eventuell vernachlässigbar, wenn jedoch Präzision erforderlich ist, muss der Draht hier mit einer Wartezeit zwischen den Einzelschritten bewegt werden.

Linear geführtes Prüfobjekt

Die umgedrehte Konfiguration zur Bewegung der Sensorik ist die Bewegung des Prüfobjektes relativ zum Sensor, wie in Abbildung 6.6d gezeigt. Diese Konfiguration bietet sich vor allem dann an, wenn die lineare Bewegung des Prüfobjekts, beispielsweise beim Transport auf einem Fließband, schon gegeben ist. Ohne zusätzliche Aktorik ist der Sensor damit auf eine Prüfposition beschränkt. Da bei einer Inspektion am Fließband meist das gleiche Prüfteil in gleicher Ausrichtung untersucht wird, kann der Sensor im Vorfeld entsprechend positioniert werden. Für größere Prüfteile können dabei mehrere Sensoren parallel angeordnet werden, um so die komplette Fläche abzudecken.

Sensormodell bei relativer Linearbewegung

Durch die Relativbewegung der Komponenten des Aufbaus zueinander kann das herkömmliche Modell eines deflektometrischen Sensors hier nicht mehr angewendet werden. Die übliche Konfiguration, wie sie in Kapitel 3.1 eingeführt wurde, sieht eine feste Zuordnung zwischen Kamerapixel, beobachtetem Punkt auf der Oberfläche und Position im Codemuster auf dem Bildschirm vor.

Hier repräsentiert zwar jedes Einzelbild für sich immer noch ein projektives Kameramodell, jedoch verschiebt sich in jedem Bild der beobachtete Bereich der Oberfläche und da als Codemuster eine einzelne Linie benutzt wird, kann auch immer nur für die Pixel, bei denen die Linie sichtbar ist, eine Information gewonnen werden. Über die ganze Bildsequenz gesehen erhält man dadurch eine Ansicht ähnlich der einer Zeilenkamera, bei der das Gesamtbild aus einzelnen Zeilen aufgebaut wird [BPF16]. Da jedoch die Reflexion an der Oberfläche zu einer nahezu beliebigen Form der Linie führen kann, verbirgt sich hierin ein komplexeres Sensormodell. Die Auswertung von Linienmustern in der Reflexion war bereits Bestandteil einer Reihe von Arbeiten, auf die im folgenden Abschnitt noch verwiesen wird. Da der Fokus dieser Arbeit nicht die Rekonstruktion der inspizierten Oberflächen ist, wird hier für die Auswertung der Daten ein vereinfachtes Modell benutzt.

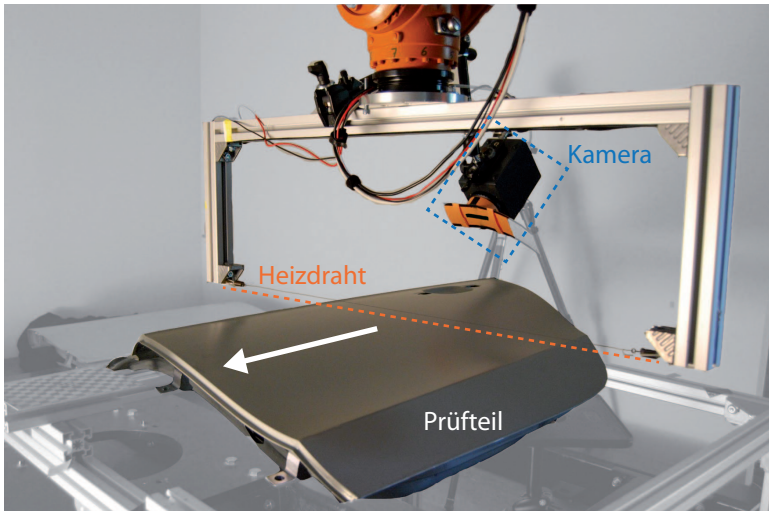


Abbildung 6.11: Draht zur Mustererzeugung und Kamera (mit Schlitzblende) am Roboter. In dieser Konfiguration können Oberflächen mit dem Sensor scannend erfasst werden, was eine quasi endlose, jedoch nur eindimensionale Registrierung erlaubt (siehe Kapitel 6.2.2). In einem anderen Arbeitsmodus steht die Kamera unbewegt neben dem Prüfobjekt, während der Roboter nur den Draht als Muster bewegt (siehe Kapitel 6.2.1).

Dazu wird angenommen, dass die inspizierte Fläche vor allem in Scanrichtung nur eine geringfügige Änderung der Oberflächenneigung aufweist. Eine Annahme, die bei vielen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Testobjekten zutrifft und die sich durch geeignete Wahl der abgescannten Bahn auch meist erreichen lässt. Abbildung 6.11 zeigt beispielsweise ein Karosserieteil, bei dem das Oberflächenprofil hauptsächlich senkrecht zur Scanrichtung ausgeprägt ist. Eine solche Fläche lässt sich in Bahnen scannen, welche sich gut mit einer Ebene approximieren lassen.

Ziel ist es, die beobachteten Ansichten der Oberfläche zueinander zu registrieren, um am Ende ein Gesamtbild der abgescannten Oberfläche zu haben. Die Bewegung der Oberfläche innerhalb der Bildsequenz wird dafür mit Hilfe von Markern, anhand von markanten Punkten auf der Oberfläche oder durch die Aufnahme eines Kalibrieramusters ermittelt.

Für eine einfache, qualitative Auswertung reicht zur Fusion der Bilddaten schon eine einfache Translation der Bilddaten um den ermittelten Bewegungsvektor.

Da mit dem Draht als Muster nur ein sehr schmaler Bereich der Oberfläche zu sehen ist und wenn die optische Achse der Kamera sich in einer Ebene orthogonal zum Draht befindet, lassen sich die Einzelbilder damit in der Regel bereits zueinander registrieren (siehe Abbildung 6.12 und 6.13). Um die Kameraperspektive jedoch korrekt auszugleichen, sollte zuvor eine *Rektifizierung* auf die Daten angewendet werden [HZ03; FLP04], sodass sich die Einzelbilder der Oberfläche durch einfache Translation zueinander registrieren lassen. Nach Anwendung der entsprechenden Verschiebung auf jedes Einzelbild können die in Kapitel 6.3 vorgestellten Auswerteverfahren angewendet werden. Man erhält so eine quasi isometrische Ansicht der Oberfläche. Das Resultat einer solchen Fusion der Einzelbilder ist in Kapitel 6.4 zu sehen, wo unterschiedliche Prüfteile auf diese Weise auf Formfehler hin untersucht wurden.

Verfahren zur Auswertung bewegter Linien

Verschiedenen Ansätzen für das zugrundeliegende Kameramodell bei Verfahren zur Auswertung bewegter Linien auf spiegelnden Oberflächen finden sich bereits in der Literatur. Diese können bei dem hier abgewandelten Sensormodell zur Fehlerdetektion oder auch zur Rekonstruktion der Oberfläche benutzt werden. Eine qualitative Detektion von Defekten auf spiegelnden Oberflächen wird in [Tor+12] vorgestellt, bei der die linienförmige Beleuchtung in einem Lichttunnel ausgenutzt wird. In [YJP09] werden spiegelnde Oberflächen anhand der Verzerrung von Linien rekonstruiert, indem die Oberfläche durch ein stückweise planares Dreiecksnetz approximiert wird. Für die Rekonstruktion vorwiegend ebener¹ Oberflächen wird in [Jac+13] die Verformung gerader Strukturen bei der Bewegung entlang der spiegelnden Oberfläche zur Rekonstruktion der Oberflächennormalen herangezogen.

¹ Als "vorwiegend eben" werden hier Oberflächen beschrieben, welche bis auf Welligkeiten und Defekte eine Ebene darstellen. In [Jac+13] ist die Anwendung die Erfassung der Geometrie von Glasfassaden an Gebäuden.

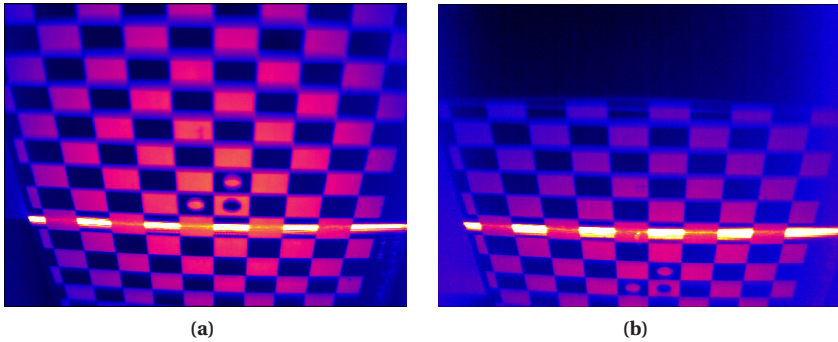


Abbildung 6.12: Einzelbilder einer Bildserie, die mit dem robotergeführten Sensor aus Kapitel 6.2.2 aufgenommen wurden. Zu sehen ist ein Schachbrett-Kalibrierungsmuster, das zur Ermittlung des Translationsvektors zwischen den Einzelbildern verwendet wurde. Eine fusionierte Gesamtansicht der Fläche zeigt Abbildung 6.13. Bei gleichen Bewegungsparametern lässt sich der einmal ermittelte Bewegungsvektor auf alle folgenden Aufnahmen anwenden.

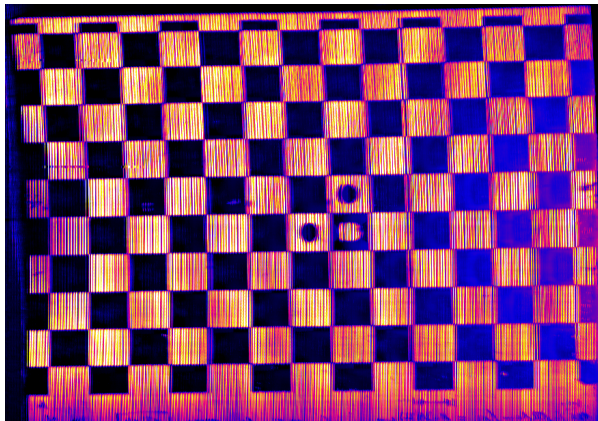


Abbildung 6.13: Fusionierte Gesamtansicht aus der zu Abbildung 6.12 gehörigen Bildserie. Die Bilder wurden zueinander registriert und über das Intensitätsmaximum zu einer quasi isometrischen Ansicht der Oberfläche fusioniert.

6.3 Auswertung der Muster

Zur Umsetzung einer Registrierung bei den hier vorgestellten Möglichkeiten zur Mustererzeugung ist stets eine Lokalisierung der verwendeten Linienmuster in den aufgenommenen Bildsequenzen notwendig. Durch die Zuordnung der aktuellen Position des Musters, welche das Aktorsystem liefert, zu den Pixeln des Kamerasystems erhält man so eine deflektometrische Registrierung.

Mit den im Folgenden vorgestellten Verfahren zur Auswertung der Linienmuster sind die Möglichkeiten noch lange nicht erschöpft. Für eine Diskussion alternativer Ansätze sei hier auf den Ausblick in Kapitel 6.5.2 verwiesen.

6.3.1 Position durch Ermittlung des Schwerpunktes

Der an einem Pixel zu beobachtende Intensitätsverlauf, wenn der Draht sich durch das Sichtfeld bewegt, zeigt ein deutliches Maximum, wenn die Mitte der Linie das Pixel passiert (siehe Abbildung 6.14). Bei einer hinreichend kleinen Schrittweite des Drahtes zwischen den einzelnen Aufnahmen ist das Profil des Drahtes in jedem Pixel für mehrere Einzelbilder zu sehen. Da es sich hier um ein symmetrisches Profil handelt, kann die dem Pixel zuzuweisende Position auf den Schwerpunkt des Intensitätsprofils reduziert werden. Ein solcher Ansatz wird beispielsweise auch in [Su+11; Su14] zur Positionscodierung mit einem scannenden Linienprofil benutzt.

Der gesuchte Schwerpunkt des Profils und damit die Position des Drahtes u_c berechnet sich aus den beobachteten Intensitätswerten $I(x, y, n)$ an dem Pixel (x, y) und den zugehörigen Positionen der Linie u_n aus:

$$u_c = \frac{\sum_n u_n I(x, y, n)}{\sum_n I(x, y, n)} \quad (6.1)$$

und ist gleichzeitig auch die gesuchte Registrierung $D_u = u_c$, hier für die Codierung in Richtung der u -Achse. Analog dazu wird dementsprechend die Position in v -Richtung codiert. Dabei ist hier hervorzuheben, dass der Schwerpunkt über die Einzelbilder und damit über die Zeit ermittelt wird. Um den Einfluss von Rauschen gering zu halten, sollte die Auswertung pixelweise nur für die Bildindizes unmittelbar vor und nach dem Intensitätsmaximum erfolgen.

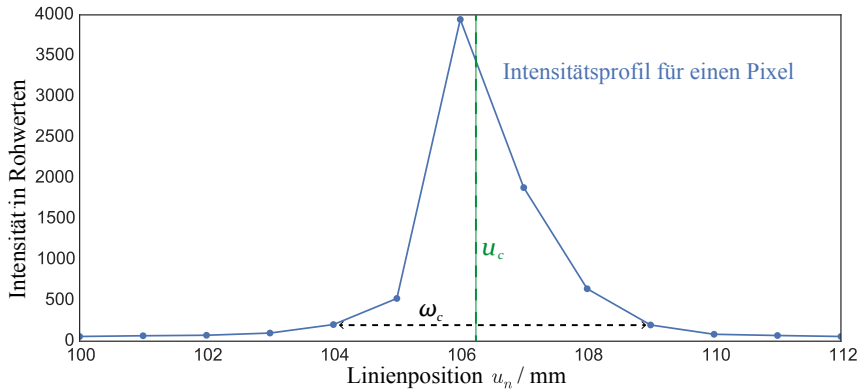


Abbildung 6.14: Ermittlung der Linienposition anhand des Schwerpunktes. Aus dem Intensitätsprofil eines Pixels über der Bildserie wird der Schwerpunkt gebildet. Dadurch kann die Position u_c auch zwischen den diskreten Positionsschritten liegen. Abgebildet ist ein gemessenes Intensitätsprofil mit dem berechneten Schwerpunkt.

Unsicherheit der Schwerpunktermittlung

Die Unsicherheit der ermittelten Position nach dem obigen Verfahren ist einerseits vom Rauschen der gemessenen Intensitätswerte als Eigenschaft der Kamera und andererseits von der Schrittweite des Drahtes pro Einzelbild bei der Mustererzeugung abhängig. Für die Berechnung des Schwerpunktes findet sich beispielsweise in [NCN02] oder [Mor+89] die Herleitung der Fehlerfortpflanzung aus dem Kamerarauschen. Danach berechnet sich die Standardabweichung der ermittelten Position σ_c aus der Breite des beobachteten Intensitätsprofils ω_c , der Anzahl der Messwerte N_{samples} und dem Signal-Rausch-Verhältnis der Kamera (SNR) nach:

$$\sigma_c = \frac{\omega_c}{\sqrt{N_{\text{samples}} \text{SNR}}}. \quad (6.2)$$

Für das in Abbildung 6.14 gezeigte Beispiel kann damit entsprechend die Unsicherheit berechnet werden. Die unscharfe Abbildung des Drahtes resultiert in einer Musterbreite von $\omega_c = 6 \text{ mm}$ bei $N_{\text{samples}} = 6$ Messwerten. Mit einer maximalen Intensität von $I_{\text{max}} \approx 4000$ und dem Rauschen der Kamera mit $I_{\text{NETD}} = 10$ erhält man einen SNR von 400, sodass die resultierende Standardabweichung $\sigma_c = 6 \mu\text{m}$ beträgt. Da die Beispieldaten unter idealen Aufnahmebedingungen

entstanden sind, sollte dieser Wert als untere Grenze für die Unsicherheit des Verfahrens betrachtet werden. Durch unscharfe Abbildung des Profils und Intensitätsverluste je nach benutzter Blende oder Reflektanz der Oberfläche, ist hier in der Regel mit einer größeren Abweichung zu rechnen.

6.3.2 Auswertung mittels Krümmungstensor

Für die Auswertung des durch den Draht erzeugten Linienmusters gilt es, die Position in den Kamerabildern über die Bildserie möglichst genau zu ermitteln. Mit langsamer Schrittweite des Drahtes, bei der das Profil in mehreren Einzelaufnahmen erfasst wird, liefert die Ermittlung des Schwerpunkts aus dem vorherigen Abschnitt zuverlässige Ergebnisse. Bewegt sich die Linie aber zu schnell durch das Bild, sodass die Linie pro Pixel nur in einem Einzelbild zu sehen ist, so liefert der Schwerpunkt die Position nur diskretisiert auf den Index des Einzelbildes. Das hier vorgestellte Verfahren soll die Position auch bei größeren Linienabständen ermitteln können, wenn Pixel nicht direkt auf eine Linie des Musters fallen. Dazu wird hier das Muster mit einem *Krümmungstensor* ausgewertet. Im Gegensatz zu einem *Strukturtensor* [Sze10; Jäh13], welcher auf der ersten Ableitung Bildfunktion operiert, wertet der Krümmungstensor die zweite Ableitung der Bildfunktion aus.

Der im Folgenden vorgestellte Ansatz basiert auf einem Liniendetektionsverfahren aus [Ste98], welches bereits in [Wed+12] Anwendung bei der Inspektion mittels *Reflektometrie*¹ fand. Basis des Verfahrens ist eine subpixelgenaue Detektion von Linien mit einem Tensor. Hier soll darauf aufbauend die Bildserie noch in der Zeitdomäne ausgewertet werden, um so eine robuste Registrierung zur Auswertung der hier verwendeten Linienmuster zu erreichen. Vor- und zugleich auch Nachteil dieses Verfahrens ist, dass für die Auswertung auch die Umgebung des Pixels mit berücksichtigt wird. Eine einzelne Linie liefert jedoch auch nach verzerrter Abbildung über eine spiegelnde Oberfläche meist noch eine erkennbare Linie und damit eine verwertbare Information über die Nachbarschaft eines Pixels.

¹ Im Gegensatz zur Deflektometrie, bei der die Kamera über die spiegelnde Oberfläche strukturierte Muster beobachtet, wird bei der Reflektometrie die Musterprojektion an der Oberfläche gespiegelt. Die Kamera beobachtet dann die projizierten, verzerrten Muster.

Subpixelgenaue Liniendetektion im Einzelbild

Die Berechnung der Linienposition erfolgt also zunächst für jedes Einzelbild $I(x, y)$. Im nächsten Abschnitt wird die Betrachtung dann auf die Bildserie $I(x, y, n)$ erweitert. Ausgangspunkt für die Berechnung sind die partiellen zweiten Ableitungen der Bildfunktion I_{xx} , I_{yy} , I_{xy} , wobei im Folgenden zur Übersichtlichkeit die explizite Angabe der Pixelkoordinate (x, y) weggelassen wird. Auf dieser Basis wird die Hesse-Matrix gebildet und durch Faltung mit der zweidimensionalen Gaußfunktion $g_{\sigma, 2D}$ als gewichtete Fensterfunktion wird ein Tensor H_I definiert als:

$$\begin{aligned}
 H_I(x, y) &= g_{\sigma, 2D} ** (\nabla \nabla^T) I(x, y) \\
 &= g_{\sigma, 2D} ** \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{pmatrix} I(x, y) \\
 &= g_{\sigma, 2D} ** \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{xy} & I_{yy} \end{pmatrix},
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

mit dem Nablaoperator $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)^T$ und dem Operator $**$ für die zweidimensionale Faltung. Mit dem Parameter σ lässt sich die Standardabweichung der Gaußfunktion und damit die Größe Einzugsbereichs des Tensors an die Breite der zu detektierenden Linien anpassen. Die Implementierung der Richtungsableitungen erfolgt durch eine diskrete Faltung mit den partiellen Ableitungen des zweidimensionalen Gaußkerns. Implizit erfolgt dadurch auch eine Glättung des Bildes, was die Berechnung der lokalen Gradienten robuster gegenüber Rauschen im Bildsignal macht [Flo+92].

Aus der Bestimmung der Eigenwerte des Tensors erhält man die Vorzugsrichtung der lokalen Gradienten, gegeben durch den Eigenvektor \mathbf{n} , der zu dem Eigenwert λ_{\max} mit dem größeren Absolutwert gehört (siehe Abb. 6.16a). Gleichzeitig sind die Eigenwerte auch ein Indikator dafür, ob lokal eine »passende« Struktur vorhanden ist [Jäh13], wenn $|\lambda_{\max}| \gg |\lambda_{\min}| \approx 0$.

Da mit \mathbf{n} die Richtung bekannt ist, in der potentiell die Linie liegt, gilt es den Abstand d zur Linie und damit die Subpixelposition \mathbf{p} auf der Linie zu ermitteln. Die Subpixelposition wird dazu jeweils relativ zur Pixelposition $\mathbf{x} = (x, y)^T$ berechnet, sodass man mit $\mathbf{x} + \tilde{d}\mathbf{n}$ die Position in Pixelkoordinaten erhält (siehe Abb. 6.15). Dazu gilt hier $\|\mathbf{n}\| = 1$ und für den Punkt

$$\mathbf{p} = \mathbf{x} + \tilde{d}\mathbf{n} = \mathbf{x} + \tilde{d}(n_x, n_y)^T. \tag{6.4}$$

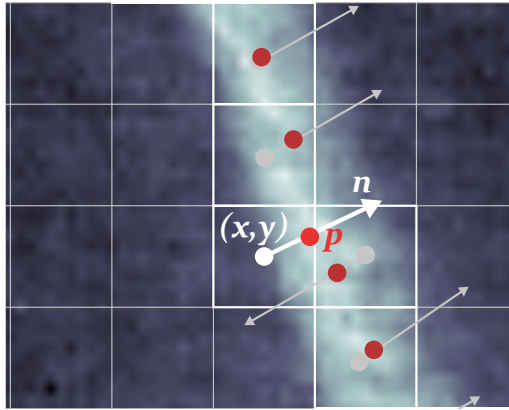
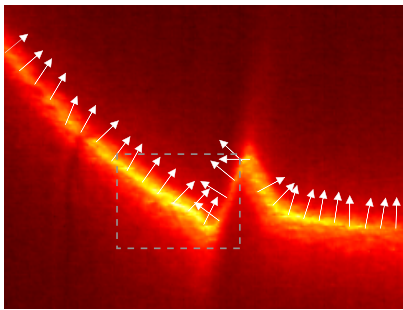
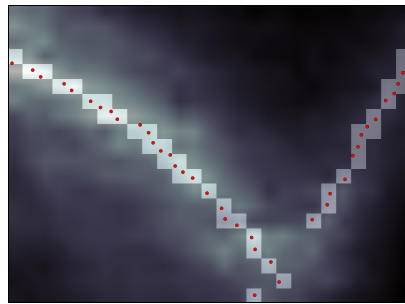


Abbildung 6.15: Schematische Darstellung der Liniendetektion im Bild. Das Raster stellt einzelne Pixel dar. Mit einem Tensor wird für jedes Pixel $(x, y)^T$ die Vorzugsrichtung der lokalen Gradienten \mathbf{n} und der Abstand zur Linie d ermittelt. Die Subpixelposition \mathbf{p} berechnet sich nach $\mathbf{p} = (x, y)^T + d\mathbf{n}$. Nur Pixel, bei denen \mathbf{p} innerhalb des Pixels zu liegen kommt, werden als Linienpixel gezählt.



(a) Ausschnitt des Wärmebilds mit detektierten lokalen Gradienten (weiße Pfeile).



(b) Ermittelte Pixel auf der Linie (hellgraue Pixel) und Subpixelpositionen (rote Punkte).

Abbildung 6.16: Ergebnis der subpixelgenauen Detektion der Linienposition. Für alle Pixel wird mit einem Krümmungstensor die Vorzugsrichtung der lokalen Gradienten ermittelt, sodass für Pixel nahe der Linie die Ausrichtung der Linie detektiert wird (a). Mit dem Abstand zur Linie in Richtung der Gradienten wird damit die Subpixelposition ermittelt (siehe Kapitel 6.3.2). Der markierte, 25×20 Pixel große Bereich in (a) entspricht dem gezeigten Ausschnitt in (b).

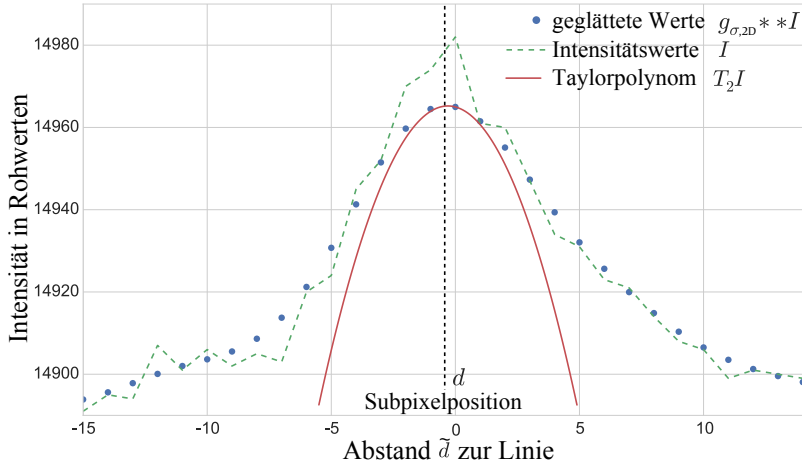


Abbildung 6.17: Berechnung des Abstands d zur Linie an einem Pixel im Einzelbild. Zur Veranschaulichung hier im eindimensionalen Fall als Schnitt in die Richtung von \mathbf{n} durch das Linienprofil. Der verwendete Tensor benutzt einen Gaußkern g_σ als gewichtete Fensterfunktion, sodass implizit eine Glättung der Intensitätswerte I mit $g_{\sigma,2D}$ erfolgt. An der Position des Pixels (bei $\tilde{d} = 0$) anhand der lokalen Ableitungen das Taylorpolynom $T_2 I$ gebildet. Befindet sich das Linienprofil im Einzugsbereich des Tensors, ergibt sich die Linienposition aus der Extremstelle von $T_2 I$. Der Scheitelpunkt der Parabel und damit die Linienposition ist hier bei $d = 0,3$.

Optimierung bezüglich \tilde{d} liefert dann den eigentlichen Abstand d . Dazu wird das Intensitätsprofil I der Linie mit einem Taylorpolynom zweiter Ordnung $T_2 I(\mathbf{p}; \mathbf{x})$ an dem Punkt \mathbf{x} approximiert:

$$T_2 I(\mathbf{p}; \mathbf{x}) = I(\mathbf{x}) + (\mathbf{p} - \mathbf{x})^T \nabla I(\mathbf{x}) + \frac{1}{2} (\mathbf{p} - \mathbf{x})^T H_I(\mathbf{x}) (\mathbf{p} - \mathbf{x}), \quad (6.5)$$

wobei bei $I(x, y)$ die Pixelkoordinaten (x, y) durch \mathbf{x} substituiert werden. Die nötigen Ableitungen von I zum Aufstellen des Polynoms können aus der Berechnung des Tensors übernommen werden. Am Scheitelpunkt des Linienprofils wird die Richtungsableitung entlang \mathbf{n} gleich Null.

Abbildung 6.17 zeigt ein Beispiel für das Profil in Richtung der Gradienten und das approximierte Taylorpolynom. Für die Ableitung des Polynoms nach \tilde{d} , an einem Pixel \mathbf{x} muss demnach gelten:

$$\frac{\partial T_2 I(\mathbf{p}; \mathbf{x})}{\partial \tilde{d}} \stackrel{!}{=} 0, \quad (6.6)$$

sodass sich der gesuchte Abstand d an der Nullstelle dieser Ableitung ergibt mit

$$d = -\frac{\mathbf{n}^T \nabla I}{\mathbf{n}^T H_I \mathbf{n}} = -\frac{I_x n_x + I_y n_y}{I_{xx} n_x^2 + 2I_{xy} n_x n_y + I_{yy} n_y^2}. \quad (6.7)$$

Zur Ermittlung der Subpixelposition der Linie wird nun einerseits anhand des Eigenwerts λ_{\max} gefiltert, ob der Tensor für ein Pixel in der Nähe der gesuchten Linie liegt. Beispielsweise wenn λ_{\max} signifikant vom Mittelwert aller Eigenwerte über das Bild abweicht. Andererseits muss für die danach berechnete Subpixelposition die Bedingung $(p_x, p_y) \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] \times [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ gelten, damit sie auch innerhalb eines Pixels zu liegen kommt. Abbildung 6.16b zeigt die so ermittelten Pixel auf der Linie und die zugehörigen Subpixelpositionen.

Liniendetektion in der Bildserie

Mit der subpixelgenauen Detektion der Linie aus dem vorherigen Abschnitt erhält man zwar eine präzisere Bestimmung der Position der Linie, allerdings ist diese immer noch diskretisiert auf die Schrittweite pro Einzelbild. Damit besteht immer noch das Problem, dass Pixel übersprungen werden und so Lücken entstehen, wenn die Linie nicht hinreichend langsam bewegt wird.

Im Folgenden soll für die Bestimmung der Zuordnung $D(x, y)$ von Kamerapixeln auf Musterkoordinaten (u, v) , aufbauend auf dem vorherigen Verfahren, die Position im Muster auch zwischen den diskreten Schritten der Einzelbilder bestimmt werden. Grundlage ist dafür der zuvor berechnete Abstand d eines Pixels zur detektierten Linie. Hierbei wird ausgenutzt, dass je nach Breite der Gaußfunktion in (6.3) als Fensterfunktion, der Tensor auch schon in der Nachbarschaft einer Linie sensitiv reagiert. Man erhält so für jedes Pixel die Richtung und den Abstand zur Linie über mehrere Einzelbilder, wobei nur Einzelbilder in Betracht gezogen werden, die eine gültige Subpixelposition liefern.

Die Berechnung der Liniendetektion wird im nächsten Schritt auf jedes Bild der Bildserie $I(x, y, n)$ angewendet, sodass für jedes Pixel (x, y) über die Bildserie der Abstand $d(n)$ und $\lambda_{\max}(n)$, der jeweilige Eigenwert mit dem größten Absolutwert, bekannt ist (s. Abbildung 6.18). In Abbildung 6.19 sind Beispiele für deren Verlauf über eine Bildserie zu sehen. Es ist zu erkennen, dass $\lambda_{\max}(n)$ eine Extremstelle aufzeigt, wenn sich die Linie im Einzugsbereich des Tensors befindet. Die Extremstelle gibt einerseits den Index des Einzelbilds n_0 an, bei dem die

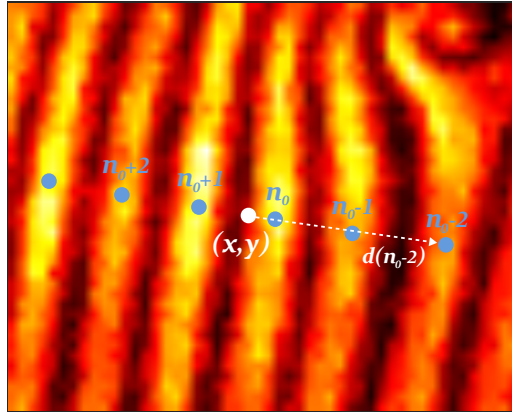
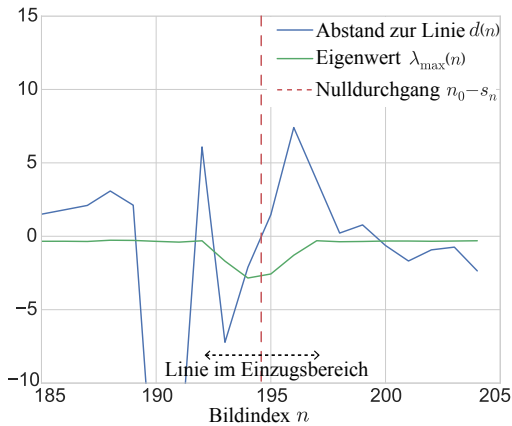


Abbildung 6.18: Berechnung des Abstands zur Linie über die Bildserie (siehe Kapitel 6.3.2). Für jeden Bildindex n wird die Subpixelposition und der Abstand $d(n)$ berechnet. Hier sind die Linien aus mehreren Einzelbildern und die ermittelte Subpixelposition zu sehen. Ausgehend von dem Frame n_0 mit dem kürzesten Abstand zum Pixel (x, y) werden die ermittelten Abstände mit einem Taylorpolynom approximiert und der »Subindex« s_n für $d(n_0 - s_n) = 0$ berechnet.

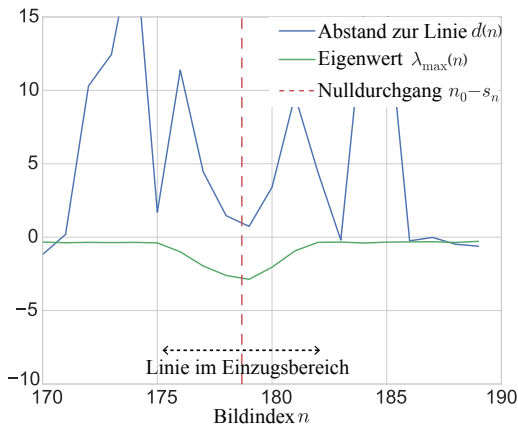
Linie das Pixel passiert, und gleichzeitig indiziert sie das Vorhandensein des Linienprofils und damit gültige Werte für $d(n_0)$ und umliegende Indizes. Die Auswertung beschränkt sich daher im Folgenden auf diesen Bereich.

Anschließend wird für alle Pixel der Bildindex ermittelt, an dem der Abstand gleich 0 ist, wenn die Linie das Pixel passiert. Da dieser Zeitpunkt für ein Pixel auch zwischen zwei Einzelbildern liegen kann, wird $d(n_0)$ nie exakt den Wert 0 annehmen. Daher wird eine *Subframe-Position* s_n berechnet, sodass $d(n_0 - s_n) = 0$ gilt. Dafür wird der gleiche Ansatz wie auch zuvor angewendet, indem die Abstandsfunktion mit einem Taylorpolynom $T_2 \tilde{d}(n_0 - s_n)$ approximiert wird.

In Abbildung 6.19 ist zu sehen, dass die Abstandsfunktion zwei Formen annehmen kann: Einmal einen linearen Verlauf (siehe Abbildung 6.19a), wenn die Richtung des Eigenvektors \mathbf{n} konstant bleibt, oder einen parabelförmigen Verlauf (siehe Abbildung 6.19b), wenn sich die Richtung beim Passieren der Linie umdreht. Beide Fälle lassen sich an dem Nulldurchgang der Abstandsfunktion unterscheiden.



(a) Linearer Verlauf des Abstands beim Nulldurchgang.



(b) Parabelförmiger Verlauf des Abstands beim Nulldurchgang.

Abbildung 6.19: Beispiel für den Verlauf der Abstandsfunktion $d(n)$ an einem Pixel beim Passieren der Linie in der Bildserie (siehe Kapitel 6.3.2). Der zugehörige Eigenwert $\lambda_{\max}(n)$ des Tensors indiziert, wann die Linie im Pixel sichtbar ist. Durch Approximation mit einem Taylorpolynom lässt sich der Nulldurchgang der Linie auch zwischen den diskreten Bildindizes bestimmen (siehe Kapitel 6.3.2).

Damit gilt es, für den linearen Fall die Position zu finden, an dem das Polynom den Wert 0 annimmt:

$$T_2 d(n_0 - s_n) \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.8)$$

und bei dem parabelförmigen Verlauf die Nullstelle der ersten Ableitung:

$$T_2' d(n_0 - s_n) \stackrel{!}{=} 0. \quad (6.9)$$

Entsprechend berechnet sich die gesuchte *Subframe-Position* im linearen Fall nach

$$s_n = \frac{d(n_0)}{d(n_0)'} \quad (6.10)$$

und für die Parabelform aus

$$s_n = \frac{d(n_0)'}{d(n_0)''}. \quad (6.11)$$

Unter der Annahme, dass die Mustererzeugung mit einem Draht bei konstant linearer Bewegung geschieht, kann die Position der Linie zwischen den Einzelbildern interpoliert werden:

$$u_s = u_n - s_n(u_n - u_{n-1}). \quad (6.12)$$

Da der *spekulare Fluss* von Punkten in der Reflexion auf spiegelnden Oberflächen im Allgemeinen eine Bewegung höherer Ordnung als einen einfachen linearen Verlauf aufweist, kann man hier nur von einer Interpolation der Daten sprechen. Allerdings lässt sich so eine lückenlose, glatte Registrierung erzielen, bei der mit dem Eigenwert λ_{\min} an jedem Punkt auch ein Maß für die Unsicherheit der Registrierung vorhanden ist [Sze10].

Parameterwahl

Als Parameter der Liniendetektion aus Kapitel 6.3.2 gilt es im Vorhinein die zu erwartende Linienstärke einzustellen. Dazu wird die Größe des Tensors in (6.3) mit dem Parameter σ angepasst. Nach [Ste98] und [Wed+12] muss für eine

Linie mit der Breite ω_L in Pixeln für die Größe des Einzugsbereichs des Tensors gelten:

$$\frac{\sqrt{3}}{6} \omega_L \leq \sigma \leq \frac{1}{2} \omega_L. \quad (6.13)$$

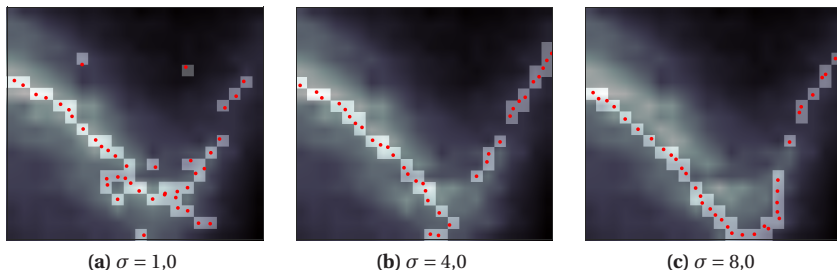


Abbildung 6.20: Einfluss der Größe des Einzugsbereichs des Tensors auf die Genauigkeit der Liniendetektion. Abbildungen (a) bis (c) zeigen den Einfluss des Parameters σ in (6.3) für die Fensterfunktion $g_{\sigma,2D}$. Zu kleine Werte führen dazu, dass viele Artefakte entstehen (a), während zu große Werte zu einer ungenauen Bestimmung der Position führen (c).

Hier wurde danach für σ stets ein entsprechender Wert gewählt, sodass die Signatur der Linie möglichst gut detektiert wurde, wie in Abbildung 6.20b zu sehen ist. In Abbildung 6.20 ist ebenfalls das Ergebnis bei ungünstigen Werten für σ zu sehen. Zu kleine Werte führen hier zur Erkennung kleinster Strukturen und Rauschen, was zur Artefaktbildung führt und zu große Werte führen zu einer ungenauen Bestimmung der Position. Allerdings kann es je nach Anwendung wünschenswert sein, die Fensterfunktion des Tensors möglichst groß zu dimensionieren, da die Größe gleichzeitig auch die Reichweite bei der Bestimmung des Abstands zu Linie vorgibt. Vor allem wenn die Schrittweite der Linie zwischen den Einzelbildern groß ist, sollte hier σ möglichst groß gewählt werden, sodass mindestens zwei Linienpositionen erfasst werden.

Nur in seltenen Fällen wird es möglich sein, die idealen Parameter für alle Aufnahmesituationen einstellen zu können. Da bei einer deflektometrischen Aufnahme die Oberfläche selbst ein optisches Element des Aufbaus mit teilweise nicht vorhersehbarer Form ist, kann die Abbildung der Linie in ihrer Form stark variieren, sodass die sichtbare Signatur nicht mehr zum gewählten Tensor passt. Zumindest für die Breite der Linie lässt sich dies kompensieren, indem die Auswertung mit den hier vorgestellten Verfahren in einem diskreten

Skalenraum erfolgt [Jäh13]. Dazu wird die Liniendetektion aus Kapitel 6.3.2 auf unterschiedlichen Skalen mit jeweils einem anderen Wert für σ ausgeführt und für jedes Pixel entschieden, welche Skala lokal am besten die Signatur der Linie erfasst. In der Regel sollte hierbei eine Auswertung mit wenigen Werten für σ (etwa 3-5) ein ausreichend breites Spektrum an Linienbreiten abdecken.

Die Fensterfunktion selbst kann hier auch als Parameter des Tensors gesehen werden. Im Falle des benutzten Linienmusters lässt sich dessen Profil mit einer Gaußfunktion approximieren, vor allem für den Fall, wenn das Linienprofil durch eine unscharfe Abbildung tiefpassgefiltert wird (siehe [Su14] und erkennbar in Abbildung 6.17). Die benutzte Gaußfunktion $g_{\sigma,2D}$ verleiht hier dem Tensor die entsprechende Sensitivität zur Detektion der Linie. Durch die Wahl einer anderen Funktion kann der Tensor entsprechend auf andere Muster angepasst werden. Die Verwendung alternativer Muster zusammen mit der Auswertung mit einem Krümmungstensor wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Eine Erweiterung des Verfahrens auf andere Linienmuster wird aber noch in Kapitel 6.5.2 diskutiert.

6.4 Ergebnisse

Alle möglichen Kombinationen der Verfahren zur Mustererzeugung und Auswertung aufzuführen, würde den Rahmen des Kapitels sprengen. Daher sollen im folgenden Abschnitt an ausgewählten Beispielen die Möglichkeiten der Verfahren zur Inspektion diffus spiegelnder Oberflächen gezeigt werden. Die Beispiele zeigen reale und synthetische Prüfobjekte, wobei die Defekte künstlich eingebracht wurden.

6.4.1 Prüfteil aus Rohblech

In Abbildung 6.21 sind Aufnahmen eines Automobilkotflügels aus Aluminium zu sehen, als ein praxisnahes Beispiel für ein Prüfobjekt aus der industriellen Produktion. Ein Foto des Prüfobjekts zeigt Abbildung 5.23. Die Mustererzeugung erfolgte mit dem robotergeführten Draht aus Kapitel 6.2.1, bei einer Schrittweite von 2 mm pro Einzelbild. Dabei wurden die Einzelbilder der Aufnahme mit dem Maximum über die Bildserie fusioniert, sodass man ein synthetisches Prüfmuster erhält.

Die Form des Objekts zeigt sich anhand der Linienrichtung und der lokalen Musterkompression und -expansion. Neben der Form sind auf dem Karosserieteil mehrere Dellen als Defekte anhand von Verzerrungen zu sehen, wobei nur der größte im Bild sichtbare Defekt bei der Sichtprüfung durch einen Menschen direkt erkennbar ist. Um alle Defekte zu finden, ist der aktuelle Stand der Technik bei solchen Oberflächen die Sichtprüfung unter Zuhilfenahme eines *Abziehsteins*, was arbeits- und zeitaufwändig ist. Abbildung 6.21 zeigt, dass allein schon der Einsatz eines einfachen Prüfmusters im thermischen IR-Spektrum hier eine einfachere optische Prüfung ermöglicht.

Eine interessante Stelle, welche die Unterschiede der verwendeten Verfahren zeigt, ist dabei der große Defekt, der in Abbildung 6.21 unten rechts zu sehen ist und in Abbildung 6.25 nochmal im Detail abgebildet ist. Der Ausschnitt hat jeweils eine Auflösung von 160 auf 130 Pixeln, wobei der Defekt einen Durchmesser von etwa 20 mm aufweist. Die Ergebnisse der Registrierung per Schwerpunktfindung zeigt Abbildung 6.23, während Abbildung 6.24 das Ergebnis der Liniendetektion mittels Tensor zeigt. Im folgenden Kapitel 6.4.4 wird noch detaillierter auf die Bewertung der Ergebnisse eingegangen. Als rein qualitative Beobachtung ist bereits zu erkennen, dass die Liniendetektion mittels Tensor in Abbildung 6.24b ein subjektiv glatteres Ergebnis erzielt, da für die Schwerpunktfindung in Abbildung 6.23b durch die große Schrittweite pro Pixel nur wenige Messwerte zur Berechnung der Position zur Verfügung stehen. Vor allem im Zentrum des Defekts zeigt sich der Unterschied, wo die Auswertung mittels Tensor den Defekt detaillierter erfasst. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass solche Resultate bei der hier vorgestellten Version des Verfahrens noch stark von der Parametrierung und den vorliegenden Daten abhängig sind, da in Abbildung 6.24b der Quantisierungseffekt lokal unterschiedlich stark zum Vorschein kommt.

Ein Beispiel für die Auswertung der erzielten Registrierung zeigt Abbildung 6.26, bei der der Betrag der lokalen Gradienten berechnet wurde. Defekte in der Oberfläche, aber auch Kanten des Objekts, zeigen sich als Extremstellen im Gradientenbild. Die eingebrachten Defekte lassen sich hier einfach erkennen und durch Detektion der lokalen Minima und Maxima auch automatisiert extrahieren [Wer11].

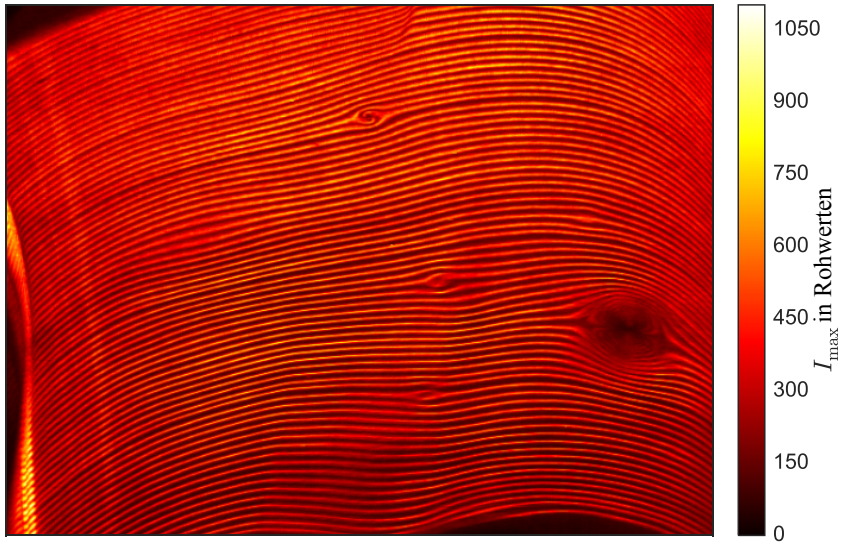


Abbildung 6.21: Fusionierte Aufnahmen aus den Einzelbildern mit einem scannenden Draht in vertikaler Scanrichtung und fester Kamera mit dem Aufbau aus Kapitel 6.2.1. Die Bildauflösung beträgt 640 auf 480 Pixel. Zu sehen ist ein etwa 400 mm auf 350 mm großer Ausschnitt des Autokarosserieteils aus Abbildung 5.23. In der Mitte und zum rechten Rand hin sind Beulen im Blech als Verzerrungen im Streifenmuster zu erkennen. Ein solches zu einem Gesamtmuster fusioniertes Bild eignet sich beispielsweise schon für eine Sichtprüfung durch einen Menschen.

6.4.2 Vergleich der Auflösung

Zum Test der Höhenauflösung unter normalen Inspektionsbedingungen wurden in ein raues Stahlblech definierte Defekte unterschiedlicher Ausprägung eingebracht. Das Blech wurde einerseits mit dem robotergeführten Sensor nach Kapitel 6.2.2 mit einer Schrittweite von 1 mm inspiziert und als Vergleich wurden die Defekte mit einem *Alicona - InfiniteFocus* Mikroskop durch Fokus-Variation vermessen. Dabei wurde die mittlere Rauigkeit des Blechs ebenfalls gemessen, die im Durchschnitt $R_q = 2,21 \mu\text{m}$ beträgt. Abbildung 6.29 zeigt die vermessenen Defekte, die von beiden Seiten des Blech mittels eines selbstschlagenden Körners eingebracht wurden. Die dadurch entstandenen Beulen und Dellen zeigen eine Ausprägung in der Höhe/Tiefe von $50 \mu\text{m}$ bei den kleinsten und bis $400 \mu\text{m}$ bei den größten Defekten.

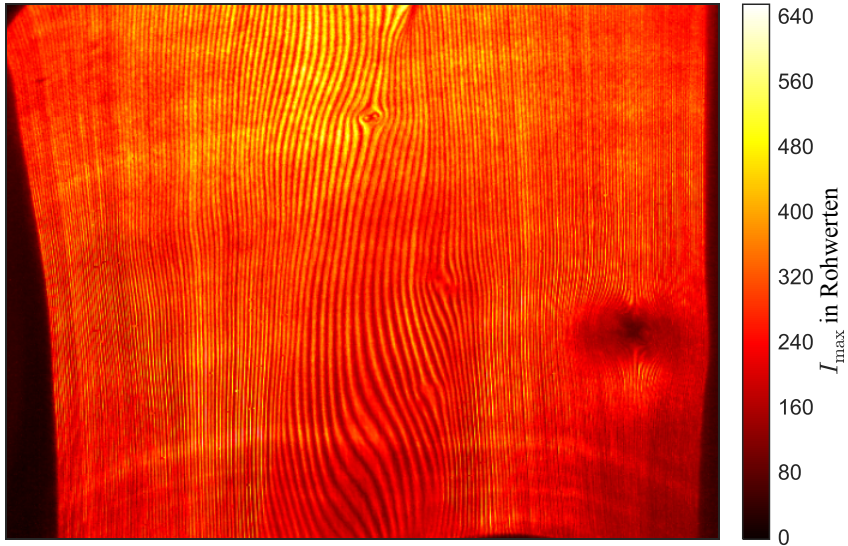
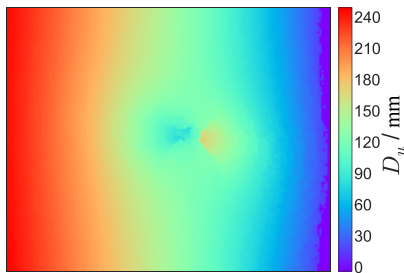
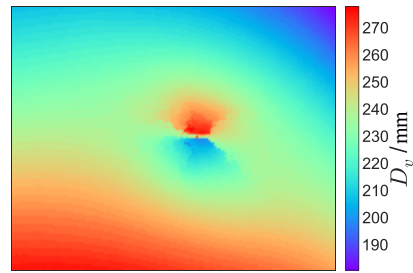


Abbildung 6.22: Fusionierte Aufnahmen aus den Einzelbildern mit einem scannenden Draht in horizontaler Scanrichtung und fester Kamera mit dem Aufbau aus Kapitel 6.2.1. Zu sehen ist der gleiche Ausschnitt der Oberfläche wie in Abbildung 6.21.

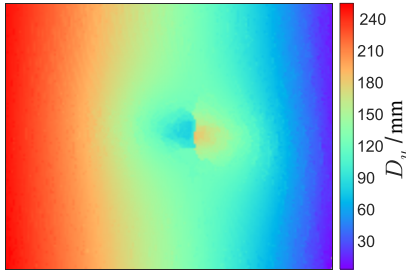


(a) Registrierungsdaten D_u in horizontaler Richtung.

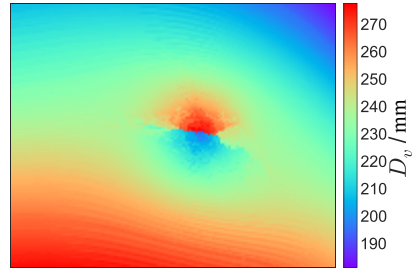


(b) Registrierungsdaten D_v in vertikaler Richtung.

Abbildung 6.23: Registrierung durch Auswertung einer scannenden Linie durch Ermittlung des Schwerpunktes nach Kapitel 6.3.1 mit dem robotergeführten Draht aus Kapitel 6.2.1. Zu sehen ist ein Detailausschnitt der Beule aus Abbildung 6.21 unten rechts.

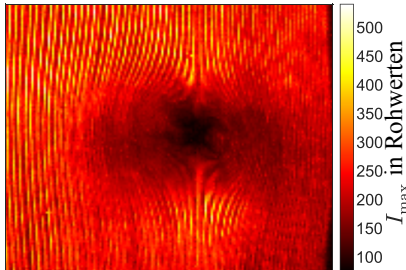


(a) Registrierungsdaten D_u in horizontal-
ler Richtung.

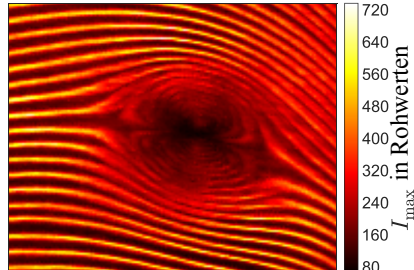


(b) Registrierungsdaten D_v in vertikaler
Richtung.

Abbildung 6.24: Registrierung durch Auswertung einer scannenden Linie durch einen Tensor basierten Liniendetektor aus Kapitel 6.3.2 mit dem robotergeführten Draht aus Kapitel 6.2.1. Zu sehen ist ein Detailausschnitt der Beule aus Abbildung 6.21 unten rechts.



(a) Fusionierte Einzelbilder bei horizonta-
ler Scanrichtung.



(b) Fusionierte Einzelbilder bei vertikaler
Scanrichtung.

Abbildung 6.25: Fusionierte Aufnahmen aus den Einzelbildern, hier als 160 auf 130 Pixel großer Detailausschnitt aus Abbildung 6.21. Der Defekt hat einen Durchmesser von etwa 20 mm.

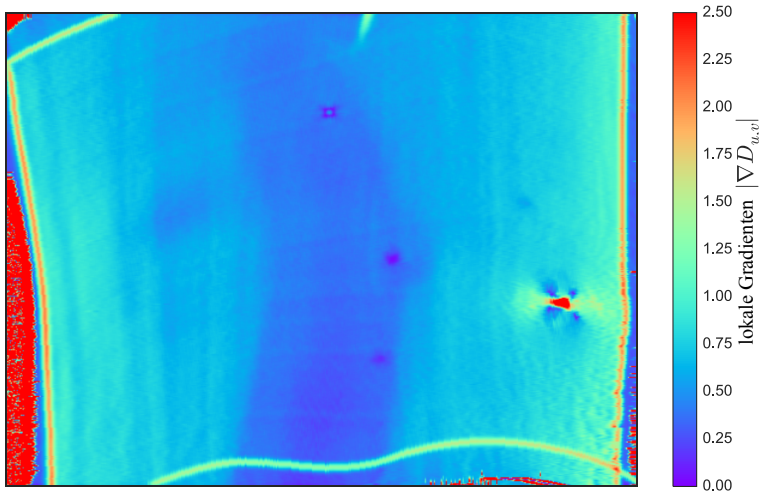


Abbildung 6.26: Auswertung der Registrierungsdaten zu der Aufnahme aus Abbildung 6.21. Gezeigt ist die Ausprägung der Gradienten in den Registrierungsdaten $|\nabla D_{u,v}|$. Defekte (und der Rand der codierten Fläche) zeigen sich deutlich als Peaks im Gradientenbild.

Abbildung 6.28 zeigt als Vergleich die Auswertung des Gradientenbildes nach einer Registrierung mittels Schwerpunktfindung. Alle Defekte sind im Gradientenbild als lokale Neigungsänderung zu identifizieren. Die kleinsten Defekte bei $50\ \mu\text{m}$ Höhenunterschied zeigen dabei eine Ausprägung in der Größenordnung der in der Messung noch auftretenden Artefakte. Durch weitere Verbesserung der Verfahren, wie sie in Kapitel 6.5 noch diskutiert werden, ist hier mit weniger Artefakten zu rechnen.

Für den hier verwendeten Aufbau lassen sich aus den Ergebnissen grobe Spezifikationen abschätzen. Mit der hier verwendeten Kamera mit 50 Einzelbildern pro Sekunde würden sich danach Defekte mit einer Höhenausprägung von $> 50\ \mu\text{m}$ bei einer Inspektionsgeschwindigkeit von $50\ \text{mm/s}$ und einer Bahnbreite von $200\ \text{mm}$ noch detektieren lassen.

6.4.3 Untersuchung großflächiger Prüfteile

Zum Test der kontinuierlichen Inspektion großer Flächen wurden auf einem Stahlblech mehrere Defekte unterschiedlicher Form auf einer $1\ \text{m}$ langen Bahn

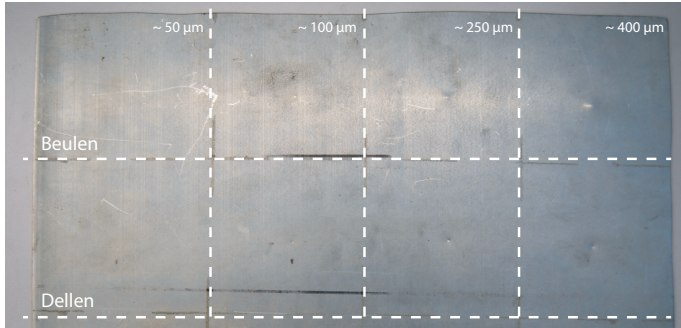


Abbildung 6.27: Testblech mit definiert eingebrachten Defekten. Die obere Reihe zeigt Beulen (Erhöhungen) und die untere Reihe Dellen (Vertiefungen) mit einer Ausprägung von 50 - 400 μm Höhenunterschied. Das Blech ist 400 mm lang und 200 mm breit.

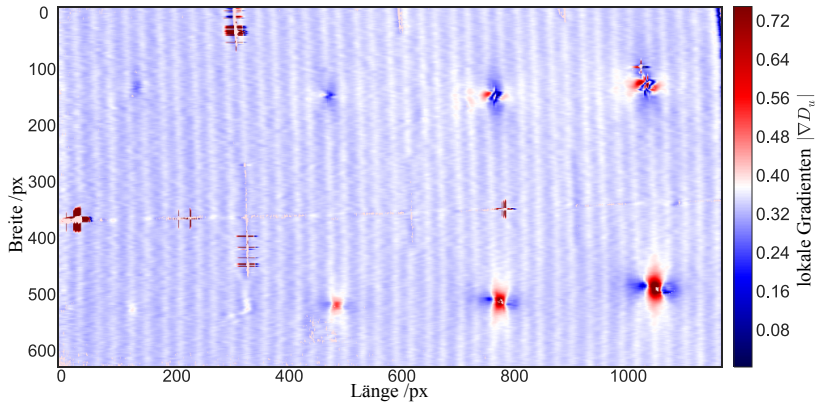


Abbildung 6.28: Ausprägung der Gradienten in den Registrierungsdaten D_u . Inspiziert wurde das Testblech aus Abbildung 6.27 mit einem scannenden Sensor nach Kapitel 6.2.2. Defekte sind deutlich sichtbar an der lokalen Änderung der Gradienten. Die obere Reihe zeigt Beulen (Erhöhungen) und die untere Reihe Dellen (Vertiefungen) mit einer Ausprägung von 50 - 400 μm Höhenunterschied. Auf dem ebenen Blech zeigt sich eine Restwelligkeit als Artefakt vom Zusammensetzen der Aufnahme aus einzelnen Scanlinien. Die Kreuze in der Mitte und links sind Artefakte von aufgemalten Hilfslinien auf der Oberfläche.

eingbracht. Die Oberfläche wurde danach mit dem scannenden Sensor am Roboterarm aus Kapitel 6.2.2 bei einer Schrittweite von 1 mm pro Einzelbild inspiziert. Hier liegt das Augenmerk nicht auf der Auswertung der Daten, sondern dass die Inspektion hierbei im Durchlauf erfolgte und theoretisch endlos weiterlaufen könnte, ohne dass die Auswertung dabei Einschränkungen unterworfen wäre. Durch die Aufnahme mehrerer Bahnen durch mehr Durchläufe oder mehrere parallel angeordnete Kameras am Sensor kann so die Inspektion großer Flächen realisiert werden.

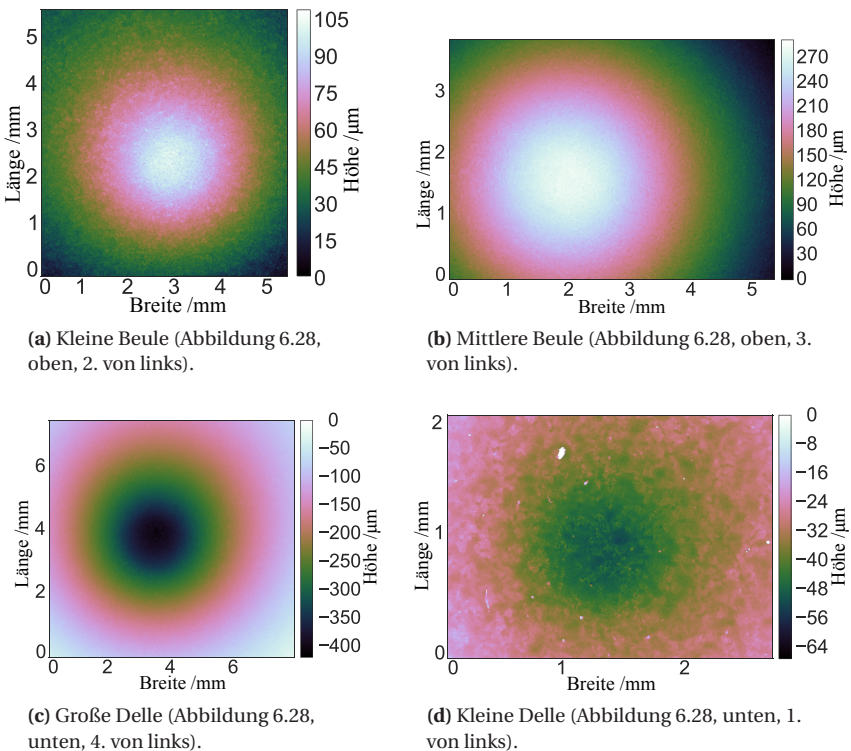


Abbildung 6.29: Detailmessungen einzelner Defekte. Gemessen wurde mittels Fokus-Variation mit einem *Alicona - InfiniteFocus* Mikroskop. Die Oberfläche reflektiert im sichtbaren Spektrum diffus bei einer Oberflächenrauigkeit von $R_q = 2,21 \mu\text{m}$. Die Defekte wurden mit einem selbstschlagenden Körner in ein Stahlblech eingebracht. Zu sehen sind Beulen (a)+(b) und Dellen (c)+(d) mit einer Höhenänderung von 50 - 400 μm .

Abbildung 6.30 zeigt die Aufnahme des Blechs nach der Fusion der Einzelbilder mit dem Maximum über die Bildserie. Unterschiedliche Defekte zeigen sich hier schon anhand der Änderung der Reflektanz. Formänderungen der Oberfläche zeigen sich auch hier durch Verzerrungen im Linienmuster, sodass eine einfache Sichtprüfung durch einen Menschen möglich ist. Vor allem aber in der Auswertung als Gradientenbild in Abbildung 6.31 zeigen sich die Defekte als deutliche Änderungen der Oberflächenneigung. Interessant ist in dem Beispiel in Abbildung 6.31a das Auftreten der vertikalen Linien, die, obwohl zunächst als Artefakte des Verfahrens bewertet, sich im Nachhinein als Welligkeit im Blech herausstellten, die ohne diese Aufnahme nicht zu erkennen war.

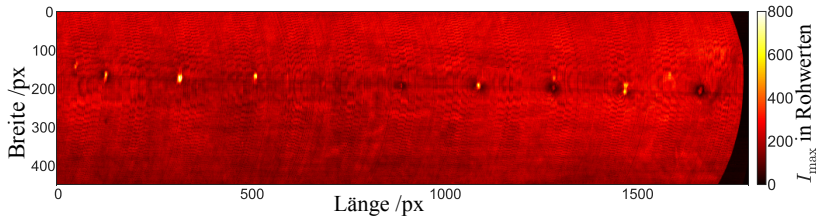
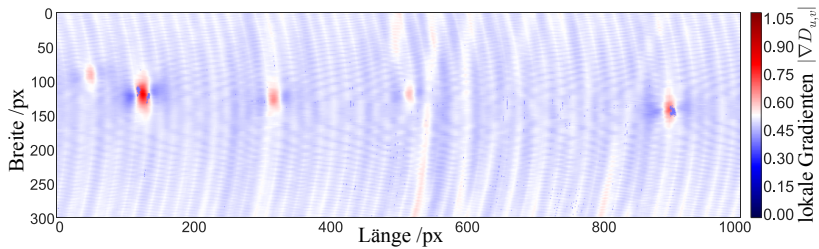
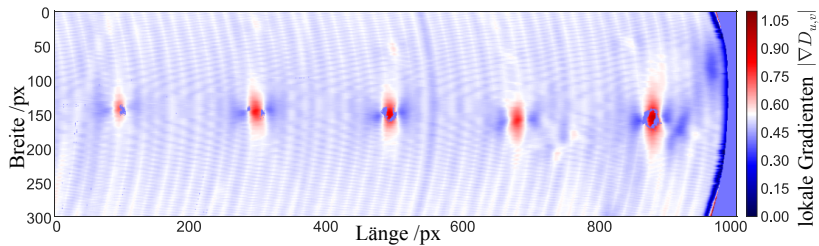


Abbildung 6.30: Fusionierte Aufnahme aus den Einzelbildern einer gescannten Bahn mit dem Aufbau aus Kapitel 6.2.2. Die Länge der Bahn beträgt etwa 1 m bei einer Breite des Sichtfelds von 200 mm. Zu sehen sind künstlich eingebrachte Defekte unterschiedlicher Form auf einem rohen Stahlblech, teilweise mit Reflektanzstörungen der Oberfläche. Viele Defekte lassen sich schon durch die Auswertung eines solchen Intensitätsbildes detektieren.



(a) Ausprägung der Gradienten zur linken Hälfte von Abbildung 6.30.



(b) Ausprägung der Gradienten zur rechten Hälfte von Abbildung 6.30.

Abbildung 6.31: Auswertung der Registrierung zur Aufnahme aus Abbildung 6.30 anhand der Ausprägung der Gradienten. Formänderungen der Oberfläche an Defekten zeigen sich deutlich an der lokalen Änderung der Gradienten. In Abbildung (a) sind Verzüge im Blech als vertikale Streifen zu sehen.

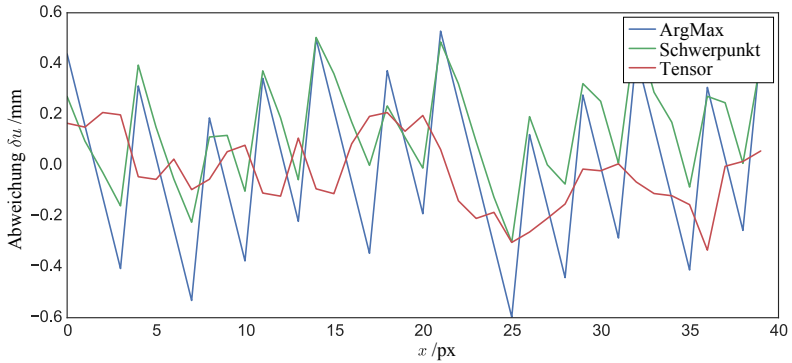


Abbildung 6.32: Profilschnitt aus der Registrierung D_u zu den zuvor gezeigten Aufnahmen des Karosserieteils aus Kapitel 6.4.1. Die Daten wurden mit einem Polynom approximiert und abgebildet ist die Abweichung der einzelnen Verfahren von dem Polynom. Die Schrittweite der einzelnen Linien ist hier so weit, dass die Registrierung über die Schwerpunktermittlung nur geringfügig besser als eine einfache Registrierung über ArgMax ist.

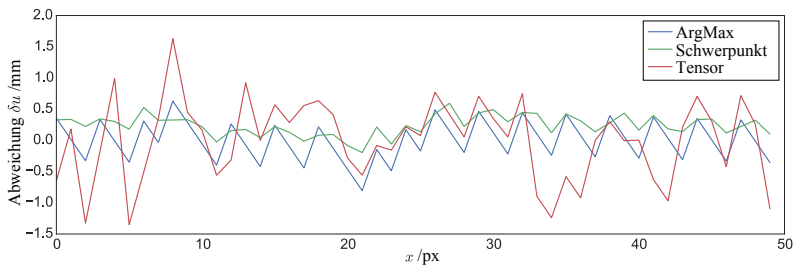


Abbildung 6.33: Profilschnitt aus der Registrierung D_v zu den zuvor gezeigten Aufnahmen des Testblechs aus Kapitel 6.4.2. Die Daten wurden mit einem Polynom approximiert und abgebildet ist die Abweichung der einzelnen Verfahren von dem Polynom. Die Auswertung mittels Tensor fällt bei diesem Beispiel deutlich schlechter aus.

6.4.4 Bewertung der Verfahren

Eine endgültige Bewertung der Verfahren kann bei dem frühen Entwicklungsstadium der hier neu vorgestellten Verfahren noch nicht gegeben werden. Insgesamt zeigt die Auswertung jedoch für gängige Prüfteile, zu denen auch die hier gezeigten Beispiele zählen, gute Ergebnisse zur Aufnahme deflektometrischer Messdaten und Detektion relevanter Formdefekte in den Daten.

Die Auswertung mittels Krümmungstensor aus Kapitel 6.3.2 ist darauf ausgelegt, bei Aufnahmen mit großer Schrittweite der Linie pro Einzelbild, wobei auf einen Punkt der Oberfläche nur wenige Sichtungen der Linie fallen, dennoch eine gute Interpolation der Registrierungsdaten zu ermöglichen. Bei den obigen Ergebnissen in Kapitel 6.4.1 zeigt sich dies an glatteren beziehungsweise vollständigeren Ergebnissen in Abbildung 6.24. Ein Profilschnitt aus der Registrierung zur gleichen Aufnahme ist in Abbildung 6.32 zu sehen. Sozusagen als *Baseline* wurden die Daten auch mittels einfacher Detektion des Intensitätsmaximums über die Bildserie ausgewertet, wie zuvor schon in Kapitel 5.2.2 vorgestellt wurde. Es zeigt sich, dass die Registrierung mittels Schwerpunktfindung bei diesen Beispieldaten nur eine geringfügig bessere Registrierung als das Argument des Maximums liefert. Nach der Abschätzung für die Unsicherheit der Schwerpunktermittlung nach Kapitel 6.3.1 ist dies hier auch zu erwarten, da durch die große Schrittweite weniger Messungen pro Punkt anfallen und N_{samples} dadurch klein ausfällt ($N_{\text{samples}} \approx 3$). Der Tensor ermöglicht hier durch Einbeziehen der Nachbarschaftsinformation eine stabilere Bestimmung der Linienposition zwischen den Einzelbildern. Dies führt auch zu dem optisch glatteren Eindruck der Registrierung von Abbildung 6.24 verglichen mit Abbildung 6.23.

In Zahlen ausgedrückt äußert sich das in dem Beispiel aus Abbildung 6.32 in einer Standardabweichung $\sigma_A = 0.31$ mm für die Baseline, während die Standardabweichung für die Schwerpunktermittlung $\sigma_C = 0.20$ mm und die Auswertung mittels Tensor $\sigma_T = 0.14$ mm entsprechend bessere Werte erzielt.

Allerdings muss auch angemerkt werden, dass die Ergebnisse der Liniendetektion mittels Tensor in der hier vorgestellten einfachen Form noch stark von den Daten und der Parametrierung abhängig sind. Dies zeigt sich bei der Auswertung der Aufnahmen des Beispiels in Kapitel 6.4.2, zu der das entsprechende Profil in Abbildung 6.33 zu sehen ist. Das Beispiel zeigt einen Ausschnitt, bei dem der Tensor für die lokale vorhanden Daten ungünstig parametriert ist. Durch die geringe Schrittweite liefert die Auswertung über den Schwerpunkt

hier gute Ergebnisse, während der Tensor deutlich schlechtere Ergebnisse als die Baseline erzielt. Die Standardabweichungen betragen hier entsprechend $\sigma_A = 0.32$ mm für die Baseline, $\sigma_C = 0.16$ mm für die Registrierung über den Schwerpunkt und $\sigma_T = 0.64$ mm für die Auswertung mittels Tensor.

Das Problem der passenden Parametrierung wurde bereits in Kapitel 6.3.2 angesprochen und wird nochmal in Kapitel 6.5.2 aufgegriffen. Insgesamt zeigt sich die Auswertung über die Schwerpunktfindung als ein bewährtes, robustes Verfahren und die bereits guten Ergebnisse mit dem Tensor zeigen das Potential für ein geeignetes Verfahren zur Auswertung der hier benutzten Linienmuster.

6.5 Ausblick

6.5.1 Mustererzeugung

Alternativen zum Draht als Mustererzeuger

Die Mustererzeugung mit einem Heizdraht aus Kapitel 6.1.1, wie sie hier durchgängig verwendet wurde, bietet eine einfache und flexible Möglichkeit, ein sehr kontrastreiches Linienmuster zu erstellen. Dennoch zeigt sich die Kombination von einem frei aufgehängten Draht und einem Aufbau, bei dem eine Bewegung des Musters notwendig ist, als nachteilig, da der Draht schwingen kann. Dies lässt sich durch Wartezyklen nach einer Bewegung vermeiden, jedoch erhöht sich die Aufnahmezeit dadurch erheblich. Auch die mögliche Verwendung alternativer Muster aus mehr als nur einer eindimensionalen Linie, wie sie in Kapitel 6.5.2 diskutiert werden, verlangt nach einer alternativen Mustererzeugung.

Eine praktikable Form der Mustererzeugung ist die Verwendung von flächigen Mustern mit variablem Emissionsgrad im thermischen IR-Spektrum (siehe Kapitel 3.2). Beispielsweise können auf einer metallischen Grundfläche, die einen sehr geringen Emissionsgrad aufweist, durch das Bedrucken mit einer Farbe mit deutlich höherem Emissionsgrad nahezu beliebige zweidimensionale Muster generiert werden. Dieser Ansatz wurde im Rahmen der Arbeit unter anderem zur Erstellung von Kalibriermustern, für die Testmuster aus Kapitel 6.1.2 und Vorversuche [Höf+11] benutzt. Für die in diesem Kapitel benutzten Muster kamen sie nicht zum Einsatz, da die Erstellung in der Größe der hier verwendeten Muster zu aufwendig ist. Zweidimensionale Muster lassen sich

auch durch Maskieren eines homogenen thermischen Strahlers generieren. Hier würde sich auch wieder blankes Metall als Maske eignen, da es selbst keine Wärme abstrahlt. Der Nachteil einer Maske gegenüber einem gedruckten Muster ist die aufwendigere Fertigung. Da die Wärmequelle hier jedoch direkt zu sehen ist, lassen sich einfacher höhere Temperaturen ausnutzen.

Bei beiden Ansätzen, sowohl bei gedruckten als auch maskierten Mustern, ist zu beachten, dass die metallischen Flächen im thermischen Spektrum spiegeln. Bei hohen Temperaturen des Musters können störende Reflexionen schwacher Intensität meist ignoriert werden. Bei der Anordnung der Komponenten muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Reflexion der Sichtstrahlen von der Kamera über die metallischen Flächen nicht auf heiße IR-Quellen in der Umgebung treffen.

Aber auch die Möglichkeiten der Mustererzeugung durch Heizdrähte ist mit der hier vorgestellten einfachen Verwendung noch nicht ausgeschöpft. Durch die einfache Handhabbarkeit lässt sich der Draht in beliebige Formen bringen, was beispielsweise die Konstruktion eines Musters in Form eines Tunnels ermöglichen würde. Komplex geformte Objekte, bei denen ein Sichtstrahl in einen weiten Bereich der Hemisphäre über dem Objekt reflektiert werden kann, lassen sich mit einer solchen Musterquelle schneller inspizieren, da fast alle Richtungen abgedeckt werden.

Zweidimensionale Codierung bei linearer Bewegung

Bei den hier vorgestellten Verfahren, welche die Registrierung aus einer linearen Bewegung heraus ermitteln, ist die Registrierungsinformation nur eindimensional. Auch wenn sich zeigt, dass diese Information für viele Inspektionsaufgaben schon ausreichend ist, fehlt für eine vollständige deflektometrische Inspektion die Registrierungsinformation senkrecht zur Bewegungsrichtung. Um dennoch mit den eindimensionalen Linienmustern eine zweidimensionale Registrierung zu erzielen, können zwei oder mehr Linienmuster orthogonal zueinander und diagonal zur Bewegungsrichtung angeordnet werden, sodass ein v-förmiges Muster entsteht. So können trotz nur einer linearen Bewegung zwei linear unabhängigen Koordinatenrichtungen codiert werden. Ein solcher Ansatz wurde in [Spr+10; Fab12] zur Erzeugung von Codemustern im UV-Spektrum benutzt, indem ein statisches Muster mit mehreren Linienprofilen linear über ein Testobjekt bewegt wurde.

Auf diese Weise kann auch der Ansatz zur Mustererzeugung mit einem robotergeführten Muster aus 6.2.1 erweitert werden. Mit dem oben erwähnten Linienmuster ließe sich die Codierung mit nur einer Bewegungsrichtung realisieren, sodass hier Zeit eingespart werden kann. Da das Muster damit jedoch nicht mehr eindimensional ist, kann die zusätzliche Schlitzblende nicht mehr eingesetzt werden. Bei ausreichender Intensität wäre alternativ der Einsatz einer Lochblende möglich.

6.5.2 Auswertung der Muster

Erweiterte Auswertung mit dem Krümmungstensor

Der Ansatz zur tensorbasierten Auswertung aus Kapitel 6.3.2 bietet noch einige Möglichkeiten zur Erweiterung. Eine Untersuchung aller hier verwendbaren Optionen würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Daher sei hier nur auf Erweiterungen verwiesen, die für zukünftige Arbeiten in diesem Gebiet interessant sein könnten.

In Kapitel 6.3.2 wurde bereits diskutiert, wie eine zusätzliche Anwendung des Krümmungstensors in einem diskreten Skalenraum die Robustheit des Verfahrens gegenüber Änderungen der Linienstärke verbessern kann. Dies wäre eine durchaus sinnvolle und je nach Oberfläche auch notwendige Erweiterung, um die entstehenden Verzerrungen des Musters kompensieren zu können.

Wenn man von einem einzelnen Draht als Musterquelle abkommt, bieten sich auch ausgedehntere Linienmuster zur Inspektion an. Durch entsprechende Anpassung der gewichteten Fensterfunktion in (6.3) kann die Empfindlichkeit des Tensor auf ein solches Muster abgestimmt werden [Big06; Jäh13]. Durch ein Muster, das mehr »Struktur« bietet, ließe sich die Position und Ausrichtung des Musters besser bestimmen. Hier würden sich beispielsweise Mehrlinienmuster anbieten, wobei beachtet werden muss, dass in Richtung der Gradienten im Muster (also orthogonal zu den Linien) die Position auch eindeutig ist, falls das Muster nicht vollständig zu sehen ist. Ein Muster aus mehreren einfachen Linien kann zum Beispiel mehrdeutig sein, wenn eine Linie nicht zu sehen ist. Eventuell wären hier Barcode-ähnliche Muster oder Sinusmuster mit mehreren Wellenlängen geeignet.

Bei komplexeren Mustern muss jedoch auch beachtet werden, dass durch Verzerrung bei der Spiegelung in der Oberfläche solche Muster eventuell nicht

mehr von dem Tensor detektiert werden. Während eine einzelne Linie nach der Reflexion in einer komplex geformten Oberfläche meist noch als Linie zu detektieren ist, geht bei ausgedehnteren Mustern, bei denen ein größerer Nachbarschaftsbereich zur Auswertung notwendig ist, die Lokalisierbarkeit verloren. Hier wäre eine Möglichkeit, die Information über die Unsicherheit der Detektion, anhand der Eigenwerte des Tensor zu nutzen. Ähnlich dem Ansatz eines Skalenraums, kann bei einer Detektion mit hoher Unsicherheit eine andere, einfachere Fensterfunktion für den Tensor benutzt werden, der eventuell eine geringere Genauigkeit bei der Detektion bietet, dafür aber robuster gegenüber Verzerrungen und unscharfer Abbildung ist. Ein interessantes Gebiet für weitere Arbeiten wäre, entsprechende Muster und Varianten des Tensors zu finden, die möglichst robust gegenüber den bei einer spiegelnden Oberfläche auftretenden Verzerrungen sind.

Eine weitere interessante Variante für den Einsatz eines Tensors ist die Erweiterung auf die Zeitdomäne [Jäh13; CL95]. Dadurch würde der Tensor nicht nur die Position der Linie wiedergeben, sondern über die Bildserie auch deren Bewegung. Im Grunde genommen entspricht dies der Auswertung des optischen Flusses. Dadurch könnten die beiden Schritte der Liniendetektion aus Kapitel 6.3.2 und der Bestimmung des Zeitpunkts der nächsten Annäherung aus Kapitel 6.3.2 zusammengeführt werden. Die Vorteile eines solchen Ansatzes, neben einer kompakteren Definition, bleiben zu untersuchen.

Auswertung der statischen Muster im Einzelbild

Neben der Auswertung mittels Deflektometrie, bei der eine Registrierung zwischen Kamerapixeln und Musterpositionen erfolgt, kann auch die Reflexion eines statischen Musters ausgewertet werden. Defekte in der Oberfläche äußern sich durch spezifische Verzerrungen des Musters. Solche statischen Prüfmuster können beispielsweise mit den Verfahren zur alternativen Mustererzeugung aus Abschnitt 6.5.1 generiert werden. Aber auch die hier verwendeten Linienmuster können zur Auswertung herangezogen werden, indem die Einzellinien über die Bildserie zu einem Muster fusioniert werden. Für die Anwendung in der Infrarotdeflektometrie wurde eine solche Auswertung statischer Muster bereits in [Sár+10c] untersucht.

Inverse Muster lassen sich hier auch zur Oberflächenprüfung nutzen [Li+04; WB07]. Dabei wird ein Muster verwendet, welches nach der Reflexion an einer

Referenzoberfläche des Prüfobjektes ein ungestörtes Muster ergibt. Abweichung von der Referenzfläche zeigen sich als Störungen im Muster. In dem Fall ist die Auswertung der Muster einfacher, da nur Abweichungen von einem fehlerfreien Muster erkannt werden müssen. Eine Reihe von Auswertestrategien zur Auswertung inverser Muster wird bereits in [Wer11] diskutiert.

Auch [Pér01] verfolgt die Auswertung von Sinusmustern im Fourierspektrum zur Detektion von Abweichungen der Oberfläche von einer Referenzform. Generell lassen sich hier eine Vielzahl von Verfahren zur Extraktion von Merkmalen aus periodischen Mustern anwenden [BPF16; Big06; Jäh13; Sze10], um so die Position fehlerhafter Stellen auf dem Prüfobjekt zu detektieren.

Auch die Auswertung mittels Tensor aus Abschnitt 6.3.2 lässt sich für solche Muster verwenden. Hierbei können lokale Abweichungen von der Vorzugsrichtung des Musters oder eine hohe Unsicherheit der Detektion als Merkmal für Störungen im Muster herangezogen werden.

6.5.3 Interaktive Inspektion

Eine interessante Möglichkeit zur Erweiterung der hier vorgestellten Inspektionsmethoden wäre die interaktive Inspektion von Oberflächen mit einem handgeführten Sensor. Dies ließe sich als Weiterentwicklung des Ansatzes aus Kapitel 6.2.2 umsetzen, indem die Sensorik aus Kamera und Mustererzeuger von einem Roboter getragen wird, der für die Mensch-Roboter-Kollaboration geeignet ist. Solche Systeme besitzen zusätzliche Sensorik zur Messung der Drehmomente an den Achsen oder Berührungssensoren außen am Roboter, sodass Kollisionen mit Menschen und Werkstücken registriert werden können. So ist ein sicheres Arbeiten von Mensch und Roboter in einem Arbeitsumfeld möglich.

Für eine interaktive Inspektion ist aber vor allem die Möglichkeit interessant, dass solche Roboter durch die aktive Kraftmessung auch von Menschen geführt werden können. In dem Szenario eines robotergeführten Sensors, der Oberflächen absキャンen soll, kann so zum Beispiel ein Mensch die Bewegung zur Inspektion vorführen, die der Roboter später an den Prüfobjekten selbstständig ausführen soll. Außerdem kann der Mensch auch bei der automatisierten Inspektion eingreifen und beispielsweise auffällige Stellen handgeführt noch

einmal intensiver inspizieren. Hierbei liefert das Robotersystem die notwendigen Positionsdaten von Sensor zu Prüfobjekt, die für die Berechnung einer Registrierung aus den aufgenommen Bilddaten notwendig ist.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Linienmuster als ein einfacher und dennoch effektiver Ansatz zur Erzeugung thermischer Muster für die Anwendung in der Infrarotdeflektometrie vorgestellt. Mit einem Heizdraht als Musterquelle wurde in Kapitel 6.2 in mehreren verschiedenen Verfahren eine flächige Positionscodierung realisiert.

Als Aktorik kommt hierbei einerseits ein Industrieroboter zum Einsatz, der je nach Ansatz nur die Musterquelle oder auch Muster und Kamera bewegt. Der Roboter bewegt dabei das Linienmuster auf einer virtuellen Monitorebene, sodass hiermit eine Konstellation des Messaufbaus wie auch bei der herkömmlichen Deflektometrie umgesetzt werden kann. Durch die Flexibilität des Roboters bei der Positionierung kann die Größe und Position der codierten Fläche dabei einfach angepasst werden.

Als Abwandlung der Konfiguration eines herkömmlichen Deflektometrieaufbaus bietet das Verfahren aus Kapitel 6.2.2 die Möglichkeit, die Kamera und ein linienförmiges Muster als Sensor zum Abscannen von Oberflächen zu benutzen. Dabei wird zwar die Oberflächenneigung nur in einer Richtung erfasst, jedoch erhält man im Gegenzug den Vorteil, Oberflächen quasi endlos im Durchlauf inspizieren zu können. Bei dem Ansatz aus Kapitel 6.2.2 kann dafür auch die Bewegung des Objektes selbst ausgenutzt werden, wenn es beispielsweise auf einem Förderband transportiert wird.

Zur Auswertung der hier verwendeten Muster wurden zwei Verfahren vorgestellt. Einerseits wurde die Positionsermittlung der einzelnen Linie mittels Schwerpunktfindung als bewährtes Verfahren in Kapitel 6.3.1 benutzt. Sie zeigt sich als einfaches und robustes Verfahren, um aus den Einzelschritten der Linienmuster eine kontinuierliche Position zu ermitteln. Als neues Verfahren wurde hier die Auswertung mittels eines Krümmungssensors in Kapitel 6.3.2 vorgestellt. Dabei ist das Ziel die Position und Ausrichtung der Linien zu ermitteln, um daraus eine Registrierung auch bei großen Schrittweiten des Musters

zu erzielen, wenn einzelne Pixel eventuell von dem Muster nicht abgedeckt werden.

Die Ergebnisse in Kapitel 6.4 zeigen, dass sich mit der Auswertung durch den Tensor durchaus Vorteile erzielen lassen. Es zeigt sich aber auch, dass die Resultate noch stark von der Parametrierung und den Daten abhängen. Hier eröffnet sich durch die Erweiterbarkeit des Verfahrens noch Raum für weitere Untersuchungen und Entwicklungen, um die Auswertung mit dem Tensor robuster zu gestalten und auf unterschiedliche Muster anzupassen. Insgesamt zeigt sich bei den Ergebnissen, dass sich durch die hier vorgestellten Verfahren zur Mustererzeugung und Auswertung eine Untersuchung diffus spiegelnder Metalloberflächen mit den Methoden der Deflektometrie umsetzen lässt.

Auch außerhalb des Labors kamen die Verfahren bereits bei Werksversuchen zum Einsatz und zeigten eine gute Eignung zur Inspektion von Rohblech als Stückgut. Hier zeigen sich die einfache Realisierbarkeit und die vielfältigen Möglichkeiten zur Umsetzung der Mustererzeugung mit den Verfahren aus Kapitel 6.2 als Vorteil. Das Inspektionsverfahren lässt sich damit einfach an die Gegebenheiten einer Prüfaufgabe anpassen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Inspektion diffus spiegelnder Metalloberflächen zeigt sich derzeit noch als ein Problem. Einerseits lassen sich solche Oberflächen zwar mit optischen Inspektionsverfahren wie zum Beispiel der Streifenlichtprojektion inspizieren, allerdings bietet diese nicht die nötige Empfindlichkeit gegenüber der Oberflächenneigung. Andererseits bieten solche Oberflächen keine ausreichende Reflexion, um herkömmliche Deflektometrie einsetzen zu können. Der Stand der Technik ist hier noch die manuelle Inspektion mit einem Abziehstein. Eine »100%-Prüfung« in der Produktion erfordert daher einen hohen Personal- und Zeitaufwand. Hier bietet sich ein großes Einsatzgebiet für die Infrarotdeflektometrie, um im Zuge der Automatisierung der Qualitätskontrolle eine Inspektion solcher Prüfteile in einem frühen Stadium der Produktion zu ermöglichen.

In dieser Arbeit wurde das Ziel, die Deflektometrie in das thermische Infrarotspektrum zu übertragen, mit drei unterschiedlichen Herangehensweisen umgesetzt. Jeder Ansatz wurde als Versuchsaufbau realisiert und die Eignung zur deflektometrischen Inspektion an praxisnahen Prüfteilen demonstriert. Zusätzlich zur Evaluation der jeweiligen Ergebnisse wurden Wege zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Verfahren aufgezeigt.

Das Konzept des *spektralen Konverters* bietet eine einfache Möglichkeit einen Monitor oder andere strukturierte Lichtquellen zu erweitern, um das angezeigte Bild in das thermische Infrarotspektrum zu übertragen. Durch die flache, modulare Bauform kann damit ein Mustergenerator flexibel in unterschiedlichen

Geometrien aufgebaut werden, sodass die Mustererzeugung an die Anforderungen von verschiedenen Inspektionsaufgaben angepasst werden kann. Am Prototypen zeigte sich, dass die Kontrolle der thermischen Diffusion noch eine Herausforderung darstellt, jedoch wurden wichtige Hinweise für die Entwicklung von pixelbasierten, thermischen Displays für zukünftige Anwendungen geliefert.

Zur Projektion großflächiger, thermischer Muster wurde die *dynamische Mustererzeugung mittels Laserlicht* vorgestellt, bei der ein leistungsstarker Laser die flexible Generierung von Mustern auf einer Projektionsfläche ermöglicht. Für die Auswertung der dabei entstehenden flüchtigen Wärmemuster wurden neue Auswerteverfahren entwickelt und die Phasenschiebecodierung als etabliertes Verfahren zur Positionscodierung auf die Mustererzeugung angepasst. Die Verfahren zur Auswertung demonstrieren, wie sich die Eigenarten des thermischen Prozesses bei der Mustererzeugung zur Positionscodierung ausnutzen lassen. Mit allen Verfahren konnte eine vollständige deflektometrische Codierung gezeigt werden und mit den vorgeschlagenen Weiterentwicklungen bietet die Mustererzeugung mit einem Laser ein vielversprechendes Verfahren für die Anwendung in der Infrarotdeflektometrie.

Die *linear bewegten, statischen Muster* zeigen sich als vielseitiger Ansatz zur Realisierung einer deflektometrischen Inspektion im thermischen Infrarotspektrum. Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Positionscodierung mit solchen Mustern umgesetzt, wobei ein Industrieroboter und eine Linearachse als Aktorik verwendet wurden. Dabei wurden einfache Linienmuster mit Hilfe des Roboters in einer virtuellen Monitorebene bewegt, um so eine großflächige Positionscodierung zu erzielen. In einem alternativen Ansatz wurde zur Inspektion die Linearbewegung zwischen Prüfobjekt und Sensor ausgenutzt. So kann mit einem robotergeführten Sensor eine Oberfläche abgefahren werden, oder umgekehrt Prüfteile auf einem Laufband im Durchlauf unter einem Sensor inspiziert werden. Zur Auswertung der aufgenommenen Bilder wurde ein neuartiges Verfahren präsentiert, das eine robustere Auswertung der aufgenommenen Daten ermöglicht.

Im Bereich der Infrarotsensorik ist durch die aktuelle Integration von Wärmebildkameras in Fahrzeugen und mobilen Geräten in Zukunft mit einer rapiden Entwicklung und geringeren Investitionskosten zu rechnen. Die Infrarotdeflektometrie wird durch die Verfügbarkeit von günstigerer und leistungsfähigerer Sensorik davon profitieren können. Passend dazu werden mit dieser Arbeit die

Werkzeuge zur Mustererzeugung und Auswertung geliefert, um die Infrarotdeflektometrie für zukünftige Inspektionsaufgaben umsetzen zu können.

Symbolverzeichnis

Indizes

- \square_{el} elektrisch
- \square_{th} thermisch
- \square_{λ} wellenlängenabhängig

Symbole

- α Absorptionsgrad
- A Fläche
- a_{ff} Füllfaktor eines Pixels
- B Binärbild
- C elektrische/thermische Kapazität
- c_p spezifische Wärmekapazität
- d Abstand zur detektierten Linie
- d_p Durchmesser der beobachteten Fläche im Muster
- $D_{\tilde{u}, \tilde{v}}$ Registrierung von Sensor- auf relative Musterkoordinaten

$D_{u,v}$	Registrierung von Sensor- auf Musterkoordinaten
ε	Emissionsgrad
E	Beleuchtungsstärke
F_{amax}	Index des Intensitätsmaximum über die Bildserie
G	Gradient der Intensitätsänderung über die Bildserie
g_P	Verstärkungsfaktor Fototransistor
g_σ	Gaußkern
h_{FE}	Verstärkungsfaktor Transistor
H_I	Krümmungstensor
$\Delta \hat{I}_{\text{heat}}$	Bild mit der normierten Intensität der Aufheizphase
ΔI_{heat}	Bild mit der Intensität der Aufheizphase
I	Intensitätsbild
I	Strom
i, j	Laufindizes
I_{NETD}	Entsprechung des NETD in Intensitätswerten
κ	Temperaturleitfähigkeit
K	Musterkontrast
Δl_i	Korrekturwert zur photometrischen Kalibrierung
ℓ	Abstand der Linien in Muster
ℓ_D	Abstand der Linien im Mustererzeuger
λ	Wellenlänge

λ_{\max}	Eigenwert mit dem größten Absolutwert
λ_{\min}	Eigenwert mit dem kleinsten Absolutwert
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit
L	Strahldichte
l_{sample}	Profilschnitt der Laserlinie
l_{th}	Diffusionslänge
l_i	Eingangssignal am Monitor
M	Ausstrahlung
M_{S}	Ausstrahlung eines Schwarzkörpers
\mathbf{n}	Vorzugsrichtung der lokalen Gradienten
\tilde{p}	relative Position des Laserspots zu einem Zeitpunkt
Φ	Strahlungsfluss
Φ	entfaltete Phaseninformation
φ	gefaltete Phaseninformation
\mathbf{p}	Subpixelposition
P	Leistung
P	Punkt im Muster
p	absolute Position des Laserspots zu einem Zeitpunkt
P_L	Laserleistung
\dot{Q}	Wärmestrom
Q	Wärme

ρ	Dichte
ρ	Reflexionsgrad
R	elektrischer/thermischer Widerstand
R_q	RMS Rauigkeit der Oberfläche
σ	Standardabweichung
σ	<i>Stefan-Boltzmann-Konstante</i>
s_n	Subframe-Index
τ	Transmissionsgrad
θ	Einfallswinkel bei der Reflexion
T	Temperatur
t	Zeit
T_2	2D Taylorpolynom
t_H	Einwirkzeit des Lasers
t_i	Integrationszeit der Kamera
T_{NETD}	NETD der Wärmebildkamera
(\tilde{u}, \tilde{v})	relative Musterkoordinaten auf der Anzeigefläche
(u, v)	Musterkoordinaten auf der Anzeigefläche
U	Spannung
u_c	Position des Linienmusters
u_s	Position des Linienmusters zwischen den Einzelbildern
v_L	Geschwindigkeit des Laserspots

(w, h)	Breite und Höhe des Musters
ω	Durchmesser des Laserspots
(x, y)	Pixelkoordinaten auf dem Sensor

Literaturverzeichnis

- [Baj+12] Alban Bajard u. a. »Three-dimensional scanning of specular and diffuse metallic surfaces using an infrared technique«. In: *Optical Engineering* (2012).
- [Bal+14] Jonathan Balzer u. a. »Cavlectometry: Towards Holistic Reconstruction of Large Mirror Objects«. In: *3D Vision (3DV), 2014 2nd International Conference on*. Bd. 1. IEEE. 2014, S. 448–455.
- [Bal08] Jonathan Balzer. »Regularisierung des Deflektometrieproblems – Grundlagen und Anwendung«. Diss. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), 2008, S. 124.
- [Bea+01] D. Brett Beasley u. a. »Dynamic IR scene projector based upon the digital micromirror device«. In: *Proceedings of SPIE* 4366 (2001), S. 96–102.
- [BG10] Helmut Budzior und Gerald Gerlach. *Thermische Infrarotsensoren : Grundlagen für Anwender*. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
- [BHB11] J. Balzer, S. Höfer und J. Beyerer. »Multiview specular stereo reconstruction of large mirror surfaces«. In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on*. IEEE, Juni 2011, S. 2537–2544.
- [BHW09] Jürgen Beyerer, Michael Heizmann und Stefan Werling. »Konzept zur Erzeugung eines räumlich und/oder zeitlich veränderbaren thermischen Strahlungsmusters«. In: *European Patent EP2322915 A1* (2009).
- [Big06] Josef Bigun. *Vision with direction : a systematic introduction to image processing and computer vision*. Berlin: Springer, 2006.

- [BK04] J.C. Brazas und M.W. Kowarz. »High-resolution laser-projection display system using a grating electromechanical system«. In: *Proceedings of SPIE* 5348 (2004), S. 65–75.
- [Bly82] Vincent T. Bly. »Passive visible to infrared transducer for dynamic infrared image simulation«. In: *Optical engineering* 21.6 (1982), S. 216079–216079.
- [BP61] H. E. Bennett und J. O. Porteus. »Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence«. In: *Journal of the Optical Society of America* 51.2 (1961), S. 123–129.
- [BP97] Jürgen Beyerer und Denis Pérard. »Automatische Inspektion spiegelnder Freiformflächen anhand von Rasterreflexionen«. In: *tm – Technisches Messen* 64.10 (1997), S. 394–400.
- [BPF16] Jürgen Beyerer, Fernando Puente León und Christian Frese. *Machine Vision - Automated Visual Inspection: Theory, Practice and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, S. 798.
- [BS07] Paul Bryant und Steve Solomon. »Infrared scene projection: Virtual reality for IR sensor testing«. In: *Photonics Spectra* 41.4 (2007), S. 58–60.
- [BS98] D. Brett Beasley und Daniel A. Saylor. »Current status of the laser diode array projector technology«. In: *Proceedings of SPIE* 3368. April (1998), S. 88–96.
- [BSJ06] Paul Bryant, Steve Solomon und Jay James. »Bolometers running backward: The synergy between uncooled ir sensors & dynamic IR scene projectors«. In: *Proc. SPIE Defense and Security Symposium*. 805. 2006, 62070J–62070J.
- [Car08] John Conrad Carslaw Horatio S. ; Jaeger. *Conduction of heat in solids*. 2. ed., re. Oxford science publications. Oxford [u.a.]: Clarendon Press, 2008.
- [CL95] Brian Curless und Marc Levoy. »Better optical triangulation through spacetime analysis«. In: , *Fifth International Conference on Computer Vision, 1995. Proceedings*. 1995, S. 987–994.
- [Dae87] Max Daehler. »Infrared display array«. In: *OE LASE'87 and EO Imaging Symp (January 1987, Los Angeles)*. 1987, S. 94–101.
- [Dan10] Arnold Daniels. *Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs*. Hrsg. von John E. Greivenkamp. 2nd Editio. The field guide series. Bellingham, Washington USA: SPIE Press, 2010.

- [Dav54] H. Davies. »The reflection of electromagnetic waves from a rough surface«. In: *Proceedings of the IEE-Part IV: Institution Monographs* 101.90 (1954), S. 209–214.
- [Ere+09] Gonen Eren u. a. »Scanning from heating: 3D shape estimation of transparent objects from local surface heating.« In: *Optics express* 17.14 (Juli 2009), S. 11457–68.
- [Fab12] Christian Faber. *New Methods and Advances in Deflectometry*. Erlangen Scientific Press, 2012.
- [Flo+92] Luc M.J. Florack u. a. »Scale and the differential structure of images«. In: *Image and Vision Computing* 10.1 (1992), S. 376–388.
- [FLP04] Olivier Faugeras, Quang-Tuan Luong und Theo Papadopoulos. *The geometry of multiple images: the laws that govern the formation of multiple images of a scene and some of their applications*. MIT press, 2004.
- [FPT11] Marc Fischer, Marcus Petz und Rainer Tutsch. »Phasenrauschen in optischen Messsystemen mit strukturierter Beleuchtung«. In: *XXV. Messtechnisches Symposium*. Lcd. 2011, S. 115–125.
- [Gio76] Colin M. Giorgi. *Variable contrast passive infrared target*. US Patent 3,986,384. 1976.
- [GP98] D.C. Ghiglia und M.D. Pritt. *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software*. Wiley, New York, 1998, S. 493.
- [Gra53] Frank Gray. *Pulse code communication*. US Patent 2,632,058. 1953.
- [Gro05] Herbert Gross, Hrsg. *Handbook of optical systems - 1: Fundamentals of technical optics*. Bd. 1. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [Har87] A.D. Hart. »Infrared scene displays and their use in detector and processor assessment«. In: *Infrared physics* 21.3 (1987), S. 153–158.
- [He+91] Xiao D. He u. a. »A comprehensive physical model for light reflection«. In: *Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '91*. Bd. 25. 4. New York, New York, USA: ACM Press, Juli 1991, S. 175–186.
- [Her+02] Miguel Arevallilo Herráez u. a. »Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a non-continuous path.« In: *Applied optics* 41.35 (2002), S. 7437–7444.

- [HK05] Jan W. Horbach und Sören Kammel. »Deflectometric inspection of diffuse surfaces in the far-infrared spectrum«. In: *Proceedings of SPIE* 5679.0 (2005), S. 108–117.
- [Höf+11] Sebastian Höfer u. a. »Verfahren und Vorrichtung zur Inspektion von Glasoberflächen«. In: *XXV. Messtechnisches Symposium des AHMT*. Hrsg. von Fernando Puente León. Shaker, 2011, S. 127–138.
- [Hor07] Jan Horbach. »Verfahren zur optischen 3D-Vermessung spiegelnder Oberflächen«. Diss. Universität Karlsruhe (TH), 2007, S. 120.
- [Hor90] Larry J. Hornbeck. »Deformable-Mirror Spatial Light Modulators«. In: *Proc. SPIE* 1150.1 (1990), S. 86–103.
- [Hor98] L.J. Hornbeck. »From cathode rays to digital micromirrors: A history of electronic projection display technology«. In: *Texas instruments technical journal* (1998), S. 7–46.
- [HRW13] Sebastian Höfer, Masoud Roschani und Stefan Werling. »Pattern coding strategies for deflectometric measurement systems«. In: *SPIE Optical Metrology 2013*. 2013, 879110–879110.
- [Hüg09] Helmut Hügel. *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*. 2nd. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2009.
- [HW10] Sebastian Höfer und Stefan Werling. »Neuartige Strategie zur vollständigen Kalibrierung eines Sensorsystems zur automatischen Sichtprüfung spiegelnder Oberflächen«. In: *Forum Bildverarbeitung* (2010), S. 25.
- [HZ03] Richard Hartley und Andrew Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [Ins08] Texas Instruments. *Using Lasers with DLP - DMD technology*. Techn. Ber. Texas Instruments, 2008. URL: <http://www.ti.com/lit/wp/dlpa037/dlpa037.pdf>.
- [Ins12] Texas Instruments. *Wavelength Transmittance Considerations for DLP - DMD Window*. Techn. Ber. May. Texas Instruments, 2012, S. 1–5. URL: <http://www.ti.com/lit/an/dlpa031c/dlpa031c.pdf>.
- [Iso10] DIN EN Iso. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. DIN EN ISO 4287. 2010.

- [Jac+13] Bastien Jacquet u. a. »Real-World Normal Map Capture for Nearly Flat Reflective Surfaces«. In: *2013 IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE, Dez. 2013, S. 713–720.
- [Jäh13] Bernd Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. 7. Aufl. Springer-Verlag, 2013.
- [Kam04] S. Kammel. »Deflektometrische untersuchung spiegelnd reflektierender freiformflächen«. Diss. Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [Kir94] James R. Kircher. »Laser scophony infrared scene project«. In: *Optical Engineering* 33.6 (1994), S. 2024–2028.
- [Kna06] Markus Christian Knauer. »Absolute Phasenmessende Deflektometrie«. Diss. Universität Erlangen - Nürnberg, 2006.
- [Lam04] Ralf Lampalzer. *Physikalische Grenzen von optischen 3D-Sensoren mit phasenmessender Triangulation*. München, Verlag Dr. Hut, 2004.
- [Lam07] Ralf Lampalzer. »Dreidimensionale Vermessung der Form und der lokalen Oberflächennormalen von spiegelnden Objekten«. In: *European Patent EP 1882896 B1* (2007).
- [LHS13] Miaomiao Liu, R. Hartley und M. Salzmann. »Mirror Surface Reconstruction from a Single Image«. In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on* 37.4 (2013), S. 129–136.
- [Li+04] Wansong Li u. a. »Object Adapted Pattern Projection - part I: Generation of Inverse Patterns«. In: *Optics and Lasers in Engineering* 41 (2004), S. 31–50.
- [LSF00] M. Lenz, G. Striedl und U. Fröhler. *Thermal Resistance, Theory and Practice*. Techn. Ber. Infineon Technologies AG, Munich, Germany, 2000, S. 1–20.
- [Mas+04] Suguiura Masahito u. a. *Inspection Method and Inspection Device for Surface Irregularity*. Japan Patent JP002005134362A. 2004.
- [MJ89] J. Everett Modisette und R. Barry Johnson. *Dynamic Infrared Simulation Cell*. US Patent 4,820,929. 1989.
- [Mor+89] J. S. Morgan u. a. »Centroid position measurements and subpixel sensitivity variations with the MAMA detector.« In: *Applied optics* 28.6 (1989), S. 1178–1192.

- [NCN02] David A. Daniel R. Neal, James Copland und David A. Daniel R. Neal. »Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy«. In: *Proc. SPIE 4779, Advanced Characterization Techniques for Optical, Semiconductor, and Data Storage Components*, 148. Bd. 4779. 2002, S. 148–160.
- [Pak14] Alexey Pak. »Stability of absolute depth reconstruction from deflectometric measurement data«. In: *SPIE Optical Engineering + Applications*. Hrsg. von Katherine Creath, Jan Burke und Joanna Schmit. International Society for Optics und Photonics, Aug. 2014, 92030E.
- [Pér01] Denis Pérard. »Automated visual inspection of specular surfaces with structured-lighting reflection techniques«. Dissertation. VDI-Verlag, Düsseldorf: Universität Karlsruhe (TH), 2001.
- [Pet06] M. Petz. »Rasterreflexions-Photogrammetrie - Ein neues Verfahren zur geometrischen Messung spiegelnder Oberflächen«. Dissertation. Shaker Verlag, Aachen: Technische Universität Braunschweig, 2006.
- [PT04] M. Petz und R. Tutsch. »Rasterreflexions-Photogrammetrie zur Messung spiegelnder Oberflächen (Reflection Grating Photogrammetry for the Measurement of Specular Surfaces)«. In: *tm – Technisches Messen/Sensoren* 71 (2004), S. 7–8.
- [Ren+09] Julia Rentz Dupuis u. a. »Two-band DMD-based infrared scene simulator«. In: *Proceedings of SPIE* (2009), 72100J–72100J–11.
- [Rin81] K. Rint. *Handbuch fuer Hochfrequenz-und Elektrotechniker*. 1981.
- [Sár+10a] Zoltán Sárosi u. a. »Evaluation of reflectivity of metal parts by a thermo-camera«. In: *InfraMation 2010 Proceedings*. 2010.
- [Sár+10b] Zoltán Sárosi u. a. »Detection of surface defects on sheet metal parts by using one-shot deflectometry in the infrared range«. In: *InfraMation 2010 Proceedings*. 2010.
- [Sár+10c] Zoltán Sárosi u. a. »Detection of Surface Defects on Sheet Metal Parts Using One-Shot Deflectometry in the Infrared Range«. In: *FLIR Technical Series* (2010), S. 1–10.
- [SCP05] Silvio Savarese, Min Chen und Pietro Perona. »Local Shape from Mirror Reflections«. In: *International Journal of Computer Vision* 64.1 (Apr. 2005), S. 31–67.

- [SKH04] C. Stiller, S. Kammel und J. Horbach. *Verfahren und Vorrichtung zur Analyse zumindest partiell reflektierender Oberflächen*. Offenlegungsschrift DE102004033526A1. 2004.
- [Spa+08] Kevin Sparkman u. a. »Performance improvements in large format resistive array (LFRA) infrared scene projectors (IRSP)«. In: *Proceedings of SPIE* 6942 (2008), 69420R–69420R–11.
- [SPB04] Joaquim Salvi, Jordi Pagès und Joan Batlle. »Pattern codification strategies in structured light systems«. In: *Pattern Recognition* 37.4 (2004), S. 827–849.
- [Spr+10] D. Sprenger u. a. »UV-Deflectometry: No parasitic reflections«. In: *Proc. DGaO*. Bd. 111. 2010, A19.
- [Ste06] D. Steiner. *VDI-Wärmeatlas : Berechnungsunterlagen für Druckverlust, Wärme- und Stoffübertragung*. 10., bearb. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure und Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2006.
- [Ste98] Carsten Steger. »An unbiased detector of curvilinear structures«. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20.2 (1998), S. 113–125.
- [STG05] Wolfgang Singer, Michael Totzeck und Herbert Gross, Hrsg. *Handbook of optical systems – 2: Physical image formation*. Bd. 2. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [Su+10] Peng Su u. a. »Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test.« In: *Applied optics* 49.23 (2010), S. 4404–12.
- [Su+11] Tianquan Su u. a. »Scanning Long-wave Optical Test System - a new ground optical surface slope test system«. In: *SPIE Optical Engineering & Applications*. Bd. 8126. 2011, 81260E–81260E.
- [Su14] Tianquan Su. »Asphercial Metrology for Non-Specular Surfaces with the Scanning Long-Wave Optical Test System«. Diss. The University of Arizona, 2014, S. 137.
- [Sur97] Y. Surrel. »Additive noise effect in digital phase detection.« In: *Applied optics* 36.1 (1997), S. 271–6.
- [Sze10] Richard Szeliski. *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.

- [Tor+12] Josep Tornero u. a. »Detección de Defectos en Carrocerías de Vehículos Basado en Visión Artificial: Diseño e Implantación«. In: *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 9.1 (Jan. 2012), S. 93–104.
- [Vis11] Vishay Beyschlag. *Thermal Management in Surface-Mounted Resistor Applications*. Techn. Ber. Vishay Intertechnology, Inc., 2011, S. 1–6.
- [Vro76] Leo O. Vroombout. *Passive infrared resolution target*. US Patent 4,058,734. 1976.
- [Wah84] Friedrich M Wahl. *A Coded-light Approach for 3-dimensional (3d) Vision*. IBM Thomas J. Watson Research Center, 1984.
- [WB07] S. Werling und J. Beyerer. »Automatische Inspektion spiegelnder Oberflächen mittels inverser Muster«. In: *Technisches Messen* 74.4 (2007).
- [Wed+12] Raphael D. Wedowski u. a. »A system for the dynamic industrial inspection of specular freeform surfaces«. In: *Optics and Lasers in Engineering* 50.5 (Mai 2012), S. 632–644.
- [Wer11] Stefan Werling. »Deflektometrie zur automatischen Sichtprüfung und Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen«. Diss. Universitätsverlag Karlsruhe, 2011, S. 262.
- [Wil05] Owen M. Williams. »History of resistor array infrared projectors: hindsight is always 100% operability«. In: *Proceedings of SPIE* 5785 (2005), S. 208–224.
- [Wil92a] Owen M. Williams. »Evaluation of emissive infrared projector radiant output parameters«. In: *Proc. SPIE, Characterization, Propagation, and Simulation of Sources and Backgrounds II* 1687 (1992), S. 402–414.
- [Wil92b] Owen M. Williams. »Performance characteristics of thin film resistor arrays for infrared projector applications«. In: *Aerospace Sensing*. Bd. 1687. International Society for Optics und Photonics, 1992, S. 71–81.
- [Wil98] O.M. Williams. »Dynamic infrared scene projection: a review«. In: *Infrared physics & technology* 39.June 1996 (1998), S. 473–486.
- [WT13] Ernst Wiedenmann und Jutta Thiel. »In neuem Licht - Infrarot-3d-Scanner macht Einsprühen von Bauteilen überflüssig«. In: *QZ - Qualität und Zuverlässigkeit* 58 (2013), S. 102–103.

- [WW83] Michael P. Wirick und James P. Wright. *Target for calibrating and testing infrared detection devices*. US Patent 4,387,301. 1983.
- [YJP09] Yuanyuan Ding, Jingyi Yu und Peter F. Sturm. »Recovering specular surfaces using curved line images«. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on*. IEEE. 2009, S. 2326–2333.

**SCHRIFTENREIHE AUTOMATISCHE SICHTPRÜFUNG UND BILDVERARBEITUNG
(ISSN 1866-5934)**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer

- Band 1 **JONATHAN BALZER**
Regularisierung des Deflektometrieproblems Grundlagen
und Anwendung. 2008
ISBN 978-3-86644-230-6
- Band 2 **IOANA GHEȚA**
Fusion multivariater Bildserien am Beispiel eines Kamera-Arrays. 2011
ISBN 978-3-86644-684-7
- Band 3 **STEFAN BRUNO WERLING**
Deflektometrie zur automatischen Sichtprüfung
und Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen. 2011
ISBN 978-3-86644-687-8
- Band 4 **JAN WASSENBERG**
Efficient Algorithms for Large-Scale Image Analysis. 2012
ISBN 978-3-86644-786-8
- Band 5 **MARTIN GRAFMÜLLER**
Verfahrensfortschritte in der robusten Echtzeiterkennung
von Schriftzeichen. 2013
ISBN 978-3-86644-979-4
- Band 6 **JÜRGEN BRAUER**
Human Pose Estimation with Implicit Shape Models. 2014
ISBN 978-3-7315-0184-8
- Band 7 **MARKUS MÜLLER**
Szeneninterpretation unter Verwendung multimodaler Sensorik
und Salienzmaßen. 2017
ISBN 978-3-7315-0240-1
- Band 8 **ROBIN GRUNA**
Beleuchtungsverfahren zur problemspezifischen Bildgewinnung
für die automatische Sichtprüfung. 2015
ISBN 978-3-7315-0313-2
- Band 9 **THOMAS STEPHAN**
Beitrag zur Unterwasserbildrestauration. 2017
ISBN 978-3-7315-0579-2

- Band 10 **JAN-PHILIP JARVIS**
A Contribution to Active Infrared Laser Spectroscopy
for Remote Substance Detection. 2017
ISBN 978-3-7315-0725-3
- Band 11 **MIRO TAPHANEL**
Chromatisch konfokale Triangulation – Hochgeschwindigkeits 3D-Sensorik
auf Basis der Wellenlängenschätzung mit optimierten Filtern. 2017
ISBN 978-3-7315-0646-1
- Band 12 **SEBASTIAN HÖFER**
Untersuchung diffus spiegelnder Oberflächen mittels
Infrarotdeflektometrie. 2017
ISBN 978-3-7315-0711-6

Bei der Deflektometrie handelt es sich um ein optisches Inspektionsverfahren für spiegelnde Oberflächen. Infrarotdeflektometrie bezeichnet wiederum die Anwendung des Messprinzips der Deflektometrie im thermischen Infrarotspektrum. Dadurch lässt sich ausnutzen, dass vor allem an technischen Oberflächen, welche im sichtbaren Spektrum diffus erscheinen, in diesem Spektrum eine deutliche Reflexion erzielt wird und so eine deflektometrische Inspektion ermöglicht wird.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Problem der Erzeugung der notwendigen thermischen Codemuster und deren Auswertung. Es werden drei verschiedene Verfahren zur Erzeugung flächiger Codemuster im thermischen Infrarot vorgestellt. Zur Positionscodierung werden entweder etablierte Verfahren an die Mustererzeugung angepasst oder neue Verfahren präsentiert.

