

**Speckle-Messtechniken mit unterschiedlicher Kohärenz
zur Diagnostik des mechanischen Verhaltens geschichteter
historischer Farbaufträge auf Kulturgütern**

Vom Fachbereich Physik der
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

angenommene Dissertation von

Arne Kraft

geboren am 7. Juli 1972

in Brake



Erstreferent: Prof. Dr. Klaus Hinsch

Korreferent: Prof. Dr. Karl-Heinz Maier

Tag der Disputation: 24.03.2003

1	EINLEITUNG	5
1.1	Technischer Hintergrund	5
1.2	Die Terrakotta-Krieger des Ersten Chinesischen Kaisers	7
1.2.1	Geschichtlicher Hintergrund	7
1.2.2	Das Ablösen der Farbschichten	11
1.3	Motivation	13
2	ELEKTRONISCHE SPECKLEMUSTER INTERFEROMETRIE (ESPI)	15
2.1	Grundlagen der Specklemesstechnik.....	15
2.2	Phasenschiebetechniken.....	18
2.2.1	Fourier Auswertung.....	22
2.2.2	Fazit der Phasenschiebetechniken	25
2.3	Mikroskop-ESPI.....	26
2.3.1	Theoretische Grundlagen bei Verwendung eines Mikroskops.....	26
2.3.2	Dekorrelation bei Verkipfung des Objekts	28
2.3.3	Dekorrelation bei Ganzkörperverschiebung	28
2.3.4	Experimentelle Bestätigung.....	30
2.3.5	Fazit Mikroskop-ESPI.....	32
2.4	Aufbau	33
2.5	Messung an konservierten Lackschichten und Originalfragmenten.....	36
2.5.1	Vormessungen zur Beurteilung der Systemparameter	36
2.5.1.1	GR10	36
2.5.1.2	Q-012.....	37
2.5.1.3	Fazit der Vormessungen	38
2.5.2	Messungen an Original-Fragmenten zur Beurteilung der Festigung	39
2.5.2.1	F012/98	39
2.5.2.2	F006/98	43
2.5.2.3	F007/98	44
2.5.2.4	Fazit der ersten Messungen zur Beurteilung der Festigung	46
2.5.3	Vergleichsmessungen nach einem Jahr	46
2.5.3.1	F011/98	47
2.5.3.2	F006/98	49
2.5.3.3	F012/98	49
2.5.3.4	Fazit der Vergleichsmessungen	50

2.5.4	Messungen zum Langzeitverhalten der Festigungsmethoden.....	51
2.5.5	Fazit der Mikroskop-ESPI-Untersuchungen an original Fragmenten.....	52
2.6	Diskussion.....	54
2.6.1	Mikroskop-ESPI.....	54
2.6.2	Alterscraquelé an Terracottafragmenten: die Rolle der Schichtungen.....	55
3	WEIßLICHTINTERFEROMETRIE.....	59
3.1	Kohärenzradar.....	59
3.1.1	Messungen.....	63
3.1.2	Fazit Kohärenzradar.....	68
3.2	Optische Kohärenz Tomographie (OCT).....	69
3.2.1	Messungen.....	72
3.2.2	Fazit OCT.....	74
4	KURZKOHÄRENZ ESPI (LCSI).....	75
4.1	Vorüberlegungen.....	75
4.2	Messaufbau.....	76
4.2.1	Wahl der Lichtquelle.....	77
4.2.2	Aufbau und Eigenschaften der SLD.....	78
4.2.3	Verschiebeeinheit.....	81
4.2.4	Detektor.....	83
4.2.5	Fasern.....	84
4.3	Charakterisierung des Aufbaus.....	84
4.3.1	Dispersion.....	84
4.3.2	Punktweise Messungen.....	87
4.3.3	Fazit der punktweisen Messungen.....	91
4.3.4	Flächige LCSI-Strukturmessungen.....	91
4.4	LCSI-Verformungsmessungen.....	97
4.4.1	Theoretische Betrachtung zur Auflösung bei LCSI-Verformungsmessungen.....	100
4.4.1.1	Anteil des zu einer Messung beitragenden Lichts.....	101
4.4.1.2	Messungen zur kohärenten Lichtintensität.....	104
4.4.1.3	Einfluss einer Bewegung der oberen Schicht auf die Korrelation.....	105
4.4.1.4	Messung des Einflusses der Verkipfung der oberen Schicht auf die Korrelation.....	108
4.4.1.5	Einfluss einer Bewegung der unteren Schicht auf die Korrelation.....	109
4.4.1.6	Messung der Dekorrelation bei Verkipfung der unteren Schicht.....	112
4.5	Fazit der Auflösungsabschätzung bei Verformungsmessungen.....	113
4.6	Messungen an Terrakotta-Fragmenten.....	114

4.6.1	Schichtenselektive Verformungsmessung an Terrakotta-Fragmenten	115
4.6.1.1	F006/98	115
4.6.1.2	F011/98	118
4.6.1.3	F005/98	121
4.7	Diskussion LCSi	122
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	125
6	LITERATURVERZEICHNIS	129
7	DANKSAGUNG	137

1 Einleitung

1.1 Technischer Hintergrund

Seit der Erfindung des Lasers durch Theodore Harold Maiman im Jahre 1960 hat sich die Optik rasant weiterentwickelt [Lau93]. Die Eigenschaften des Lasers, stark gerichtetes Licht mit hoher Kohärenz auszustrahlen, ermöglichten die Entwicklung verschiedenster neuer Techniken wie z.B. des CD-Spielers. Auch bei der Nachrichtenübertragung z.B. durch Glasfasern oder in der Medizin als Skalpell werden Laser eingesetzt. In der Messtechnik entstand das Gebiet der holografischen Interferometrie, in dem diejenigen Verfahren zusammengefasst werden, die auf der Kohärenz des Lasers basieren. Diese hochgenauen, berührungslosen Verfahren werden vor allem bei der Vermessung spiegelnder Oberflächen wie z.B. Teleskopspiegeln in der klassischen Interferometrie eingesetzt. Bei ihrer Anwendung an optisch rauen Oberflächen wurde lange Zeit das Auftreten von sogenannten Granulations- oder auch Specklemustern als unerwünschtes Übel betrachtet. Als dieses Phänomen statistisch erklärt werden konnte, entwickelte sich hieraus eine eigene Messtechnik, die mit der Entwicklung digitaler Bildaufnehmer weiter große Fortschritte machte. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dieser Methode der Videoholografie auch electronic speckle pattern interferometrie (ESPI) genannt [BL71]. ESPI ermöglicht es, an unterschiedlichsten Objekten berührungslos Verformungen vom Bruchteil einer Wellenlänge zu detektieren. Vor allem in der Industrie hat sich ESPI zu einem wichtigen Werkzeug entwickelt [BH00]. Aber auch auf anderen Gebieten, wie z.B. in der Denkmalpflege, hat die Videoholografie ihre Einsatzmöglichkeiten unter Beweis gestellt.

In der Arbeitsgruppe Angewandte Optik der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg werden seit mehr als fünfzehn Jahren ESPI-Verfahren für diesen Bereich entwickelt und erfolgreich angewendet [KN89], [GG93]. Die fortschreitende Umweltverschmutzung aber auch natürliche Alterungsprozesse führen zur Zerstörung der verschiedensten Kunstobjekte. Hier werden interferometrische Verfahren eingesetzt, um die Art und den Verlauf der Schadensprozesse zu klären und die Wirksamkeit von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen zu überprüfen. Der große Vorteil der ESPI liegt hierbei in ihrer Empfindlichkeit und darin, dass sie absolut zerstörungsfrei arbeitet. Die hohe Empfindlichkeit ist wichtig, um Verformungen der zu untersuchenden Objekte zu detektieren lange bevor das Auge diese erkennen kann. Meist reicht diese Genauigkeit aus, um Deformationen und Spannungen zu lokalisieren und gezielt Schutzmaßnahmen zu ergreifen bevor eine ernsthafte Schädigung auftritt. In vielen Fällen ist es möglich, die Messungen vor Ort durchzuführen, so dass eine Probenentnahme entfällt. Die Messungen erfolgen meist ohne mechanischen Kontakt zum Untersuchungsobjekt. Ein Beispiel, an dem dieser Vorteil deutlich auffällt, ist

die Detektion von Hohlstellen an Wandmalereien mittels Vibrations-ESPI [FB00]. Bei der herkömmlichen Art der Detektion muss der Restaurator in direkten mechanischen Kontakt mit der Wandmalerei treten, was immer das Risiko einer Schädigung mit sich bringt und zum Teil mit großem Aufwand verbunden ist. Wenn es sich z.B. um eine Wandmalerei in großer Höhe handelt, ist die Verwendung von Gerüsten unumgänglich. Die Vibrations-ESPI-Messung erfolgt dem gegenüber berührungslos und kann auch über größere Entfernungen arbeiten, solange der zu untersuchende Bereich optisch zugänglich ist. Ein wesentlicher Punkt aller ESPI-Verfahren ist die Kohärenz der verwendeten Lichtquelle. Damit eine interferometrische Messung durchgeführt werden kann, muss das vom Messobjekt reflektierte Licht mit dem Referenzstrahl kohärent überlagert werden. Der Wegunterschied zwischen Objekt- und Referenzstrahl darf somit nicht größer als die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle sein. Gebiete, für die diese Bedingung nicht gelten, tragen nicht zur Messung bei. Eine große Kohärenzlänge vereinfacht den Weglängenabgleich zwischen Objekt- und Referenzstrahl und ermöglicht die Vermessung von Objekten mit größeren geometrischen Abmessungen. Es kann aber auch erforderlich sein, die Kohärenzlänge einzuschränken, wenn z.B. der zu untersuchende Bereich nur einen kleinen Teil des betrachteten Bereichs ausmacht [CC93], [IK99] und [IK00]. Wird die Kohärenzlänge so gewählt, dass nur das Licht aus dem zu untersuchenden Bereich kohärent mit dem Referenzstrahl überlagert wird, kann das aus den übrigen Bereichen kommende Streulicht unterdrückt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Optische Kohärenz Tomographie (Optical Coherence Tomographie; OCT). Sie wird zur Zeit hauptsächlich zur Untersuchung von biologischem Gewebe [Bu98] aber auch an technischen Objekten [BD97] und [BD98] eingesetzt. Die OCT wird vor allem dafür verwendet, Strukturen der oberen Hautschichten oder des Auges zu vermessen, deren Größen unter der Auflösungsgrenze von Ultraschallmessungen liegen. Hierbei können Tiefenstrukturen von der Größenordnung der Kohärenzlänge aufgelöst werden. Die Forschung auf diesem Gebiet ist deshalb auf der Suche nach Lichtquellen mit immer kürzerer Kohärenzlänge.

In der vorliegenden Arbeit wird das Verhalten historischer Objekte auf Klimaänderungen und die Auswirkungen von Festigungsversuchen auf dieses Verhalten mittels interferometrischer Specklemesstechniken untersucht. Bei den Objekten, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird, handelt es sich um Teile der Terrakotta-Armee des Ersten Chinesischen Kaisers. Die Untersuchungen finden an den auf der Terrakotta aufgetragenen Lack- und zum Teil auch Pigmentschichten statt. Die komplizierte Struktur der Untersuchungsobjekte stellt höchste Ansprüche an die angewendeten Verfahren.

Zuerst werden ESPI-Messungen durchgeführt, die das Verhalten bei Feuchtigkeitsänderung erfassen und die Auswirkung verschiedener Festigungsmethoden charakterisieren. Aufgrund der Beschaffenheit der Untersuchungsobjekte wird eine hohe örtliche Auflösung benötigt. Es wird hierfür ein Mikroskop-ESPI-System aufgebaut und dessen Systemparameter bestimmt.

Als nächstes wird der Aufbau der Lackschichten mittels OCT-Messungen untersucht. Hierfür werden Messungen an einem bestehenden Aufbau durchgeführt.

Um den Einfluss des Aufbaus der Lackschichten auf das Verhalten der Proben zu beurteilen, wird ein neuartiges Verfahren entwickelt, das die Eigenschaften eines ESPI- und eines OCT-Systems vereint und Verformungsmessungen in verschiedenen Tiefen und somit an den einzelnen Lackschichten unabhängig voneinander ermöglicht. Hierbei wird eine dem System angepasste Kohärenz verwendet, die kürzer als die Kohärenz des ESPI-Systems ist, um die verschiedenen Schichten voneinander trennen zu können, aber länger als die Kohärenz im OCT-System ist, um eine einzelne Schicht im Ganzen erfassen zu können.

Im folgenden Abschnitt wird der geschichtliche Zusammenhang, in dem die Testobjekte stehen, kurz erläutert und auf die Problemstellung eingegangen, die mit zur Entstehung dieser Arbeit geführt hat.

1.2 Die Terrakotta-Krieger des Ersten Chinesischen Kaisers

1.2.1 Geschichtlicher Hintergrund

Bei Brunnenbauarbeiten stießen chinesische Bauern 1974 auf die Terrakotta-Armee des Ersten Chinesischen Kaisers (259 – 210 v.Chr.) [ETh93], [Bin94], [Wen96]. Sie zählt zu den berühmtesten archäologischen Funden des letzten Jahrhunderts und wird bisweilen als achtetes Weltwunder bezeichnet. Sie ist ein Teil der Grabanlagen, die sich der Erste Chinesische Kaiser, zu sehen in Abb. 1.1, von rund 700 000 Zwangsarbeitern hat errichten lassen.



Abb. 1.1: Erster erhabener Kaiser (Qin Shihuangdi) aus [IR00].

Ying Zheng war 13 Jahre alt, als er den Thron des Fürstentums Qin bestieg. Er brauchte 15 Jahre, die sechs eigenständigen Fürstentümer der Periode der Streitenden Reiche (475 - 221 v.Chr.) zu unterwerfen und zum ersten zentralistischen Reich der chinesischen Geschichte zu vereinen (Qin-Dynastie; 221 – 206 v.Chr.). Er ernannte sich selber zum „ersten erhabenen

Kaiser“ (Qin Shihuangdi). Während seiner Regierungszeit wurden die Schrift, das Währungssystem sowie die Maße und Gewichte vereinheitlicht. Die einzelnen Mauern, die zur Zeit der Streitenden Reiche errichtet worden waren, wurden zur weltberühmten Chinesischen Mauer zusammengefügt. Neben diesen nützlichen Neuerungen brachte er aber auch viel Leid über die Bevölkerung. Zeitweise wurden bis zu 10% von ihr als Sträflinge zum Bau seines Grabmals gezwungen, dessen Errichtung von 247 bis 210 v.Chr. dauerte und das sich über eine Fläche von 56 km² erstreckt. Es liegt am Fuß des Berges Li Shan ca. 35 km östlich von Xi'an. Dieses Gebiet war über 1000 Jahre lang das Zentrum der Macht und der Kultur. Zeitweilig war Xi'an (damals Chang'an) die größte Stadt der Welt. Das Grabmal, dargestellt in Abb. 1.3, besteht aus dem eigentlichen Grabhügel, unter dem sich das Mausoleum des Kaisers befindet, und zahlreichen darum herum liegenden Gruben. In alten Schriften wird von einem unterirdischen Palast, in dem sein gesamtes Reich als Modell nachgebaut sein soll, berichtet. Es wird von Flüssen und Meeren aus Quecksilber überragt von einem Sternenhimmel aus Edelsteinen gesprochen. Die Glaubwürdigkeit dieser Aufzeichnungen wird unter anderem dadurch bestärkt, dass bei Untersuchungen an Erdproben im Bereich der Grabanlage eine 10-fach erhöhte Quecksilberkonzentration nachgewiesen werden konnte. Das Mausoleum ist von zwei Mauern umgeben. Vor diesen Mauern wachen die Terrakotta-Krieger über ihren schlafenden Kaiser.

Die Terrakotta-Armee besteht aus ca. 7000 bis 8000 lebensgroßen Figuren, die individuell gearbeitet und bemalt sind. Neben gewöhnlichen Soldaten wie in Abb. 1.2 sind auch Generäle, Pferde und Wagen dargestellt. Kein Krieger gleicht dem anderen. Bei den seit 1998



Abb. 1.2: Farbige Terrakotta-Krieger in Grube 2 während ihrer Freilegung, noch halb in der Erde.

auch innerhalb der Mauern stattfindenden Grabungen wurden auch Artisten und Tänzer geborgen.

Die lebensnahe Darstellung aller Figuren ist bemerkenswert und wegen ihrer Detailtreue nicht nur für Historiker von unschätzbarem Wert. Es wurde auf noch so kleine Details wie Gesichtszüge, Gürtelschnallen oder Fußsohlen geachtet. Ein großer Teil der ausgegrabenen Figuren zeigt diese Bemalung auch noch während der Freilegung. Schon kurze Zeit später zeigte sich aber, dass die Farben dem raschen Klimawechsel, der mit dem Auslösen der Terrakotta-Figuren aus dem feuchten Lehm Boden verbunden ist, nicht gewachsen sind.

1.2.2 Das Ablösen der Farbschichten

Die genaue Zusammensetzung der Terrakotta, der einzelnen Lackschichten und der farbigen Pigmente werden in [Thie93],[IR00] und [CB01] erklärt. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung über die Zusammensetzung der bemalten Terrakotta-Krieger, sowie den Prozess, der zur Ablösung der Farbfassungen führt, und die bisher durchgeführten Konservierungsmethoden gegeben.

Die lebensgroßen Krieger bestehen aus einer bei ca. 950 °C gebrannten Terrakotta. Diese wurde mit ein bis zwei Lackschichten grundiert. Bei dem Lack handelt es sich um Qi-Lack, auch ostasiatischer Lack genannt. Auf diesen Lack wurde dann die farbige Pigmentschicht aufgebracht. Der Qi-Lack wird aus dem Milchsaft des Lackbaums gewonnen. Die Gewinnung und Zubereitung ist sehr zeitaufwendig. Die Qualität des Lacks wird dadurch bestimmt, ob er aus dem Stamm oder aus den Ästen gewonnen und wie lange er gelagert wird. Am hochwertigsten ist der Stammlack, der nach einer licht- und feuchtigkeitsfreien Lagerung von drei bis vier Jahren als oberste Schicht dekantiert wird. Der Lack härtet nur bei einer sehr hohen Luftfeuchtigkeit von 75–90 % r.F. und Temperaturen von 15- 20 °C. Damit der Lack gut durchhärten kann, wird er in sehr dünnen Schichten von einigen 10 µm Dicke aufgebracht. Qi-Lack war schon zur Zeit der Herstellung der Terrakotta-Armee ein viel verwendeter Lack und stand in großen Mengen zur Verfügung. Trotzdem wurde für die unterste der zwei Lackschichten ein recht schlechter Lack, der zumeist noch mit Reiskleister verdünnt wurde, verwendet. Schädlich für den Lack sind zum einen Luftfeuchten unter 30% und zum anderen direkte Einwirkung von UV-Licht. Beides kann zu einem Zerreißen und Abpulvern der Lackschichten führen. Andererseits fängt der Lack bei zu feuchter Lagerung an, sich allmählich zu zersetzen. Gerade dieses Zersetzen, dass mit dem Herauslösen wasserlöslicher Substanzen im Lack zusammenhängt, kann vor allem bei der unteren der beiden Lackschichten beobachtet werden. Dieses Zersetzen der Lackschicht hängt mit der Lagerung der Terrakotta-Soldaten über die letzten 2000 Jahre zusammen. Die Terrakotta-Soldaten stehen in unterirdischen Kasernen, wie sie exemplarisch in Abb. 1.4 dargestellt sind.

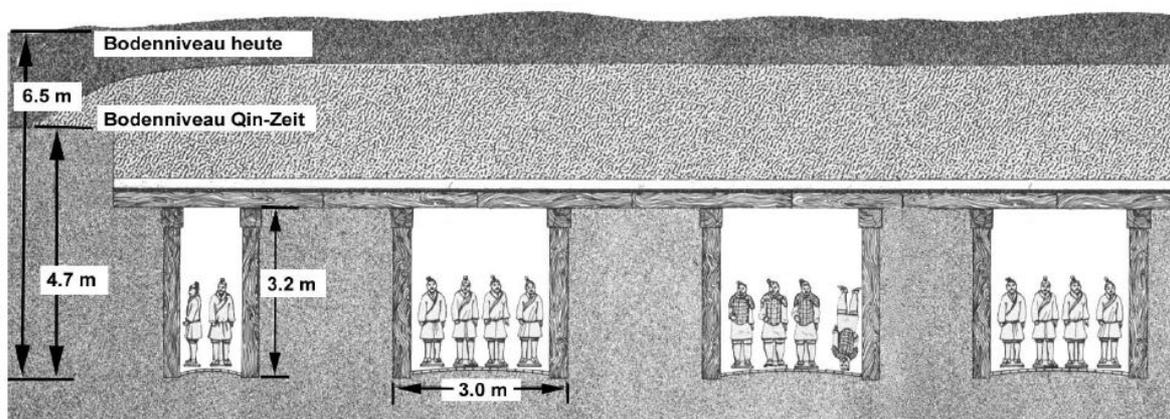
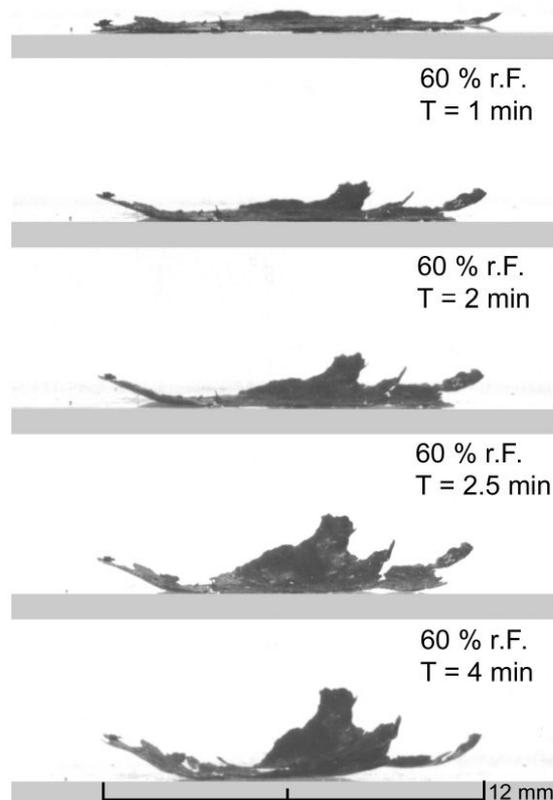


Abb. 1.4: Blick in eine der unterirdischen Gruben aus [IR00].

Leider kam es schon früh zu Plünderungen. Zum einen, da die gesamte Armee mit echten Waffen ausgerüstet war, die zum damaligen Zeitpunkt dem modernsten Stand entsprachen und zum anderen, da ein Umsturz gegen das vom Ersten Chinesischen Kaiser aufgebaute Regime stattfand, bei dem auch die monumentalen Denkmäler des Ersten Chinesischen Kaisers zum Teil zerstört wurden. Somit zertrümmerten die Plünderer einen großen Teil der Terrakotta-Soldaten. Nach den Plünderungen wurden Feuer gelegt, so dass die Gruben zusammenbrachen. Mehrere Überschwemmungen führten dazu, dass die verbliebenen Hohlräume mit Lehm zugespült wurden. In diesem feuchten Lehm ruhten die Krieger über 2000 Jahre. Durch die feuchte Lagerung verlor der Grundierungslack die Haftung zur Terrakotta. Sobald nun der Lack einer Luftfeuchtigkeit von unter 84% ausgesetzt wird, findet ein starker Volumenschwund statt. Es bildet sich ein craqueléartiges Rissssystem und der Lack beginnt sich aufzurollen und fällt schließlich von der Terrakotta ab. Das Aufrollen eines solchen Lackfilms ist in Abb. 1.5 dargestellt. Der Prozess des Aufrollens ist reversibel, so dass eine Befeuchtung wieder zu einer Glättung und einer Zunahme der Elastizität führt. In einer Zusammenarbeit zwischen dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD), der Materialprüfungsanstalt Bremen (MPA), der Universität Oldenburg und dem Museum der Terrakotta-Armee unter Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMB+F) wird an einem Verfahren gearbeitet, die Farbschichten zu erhalten. Eine geeignete Konservierung muss das Wasser in der Lackschicht durch einen nicht flüchtigen Stoff ersetzen, um bei einer Feuchtigkeitsabnahme einen Volumenschwund zu verhindern, und



gleichzeitig die Lackschichten wieder an der Terrakotta befestigen.

Es werden zur Zeit zwei Methoden favorisiert [CB01]. Bei der ersten Methode wird das Wasser durch hochmolekulares Polyethylenglycol (PEG 200) ersetzt, dem ein wenig Polyurethan (PU) zugesetzt wird. Das PEG 200 sorgt dafür, dass bei trockener Lagerung kein Volumenschwund eintritt. Das PU klebt lose Teile der Lackschicht wieder an die Terrakotta [CB01]. Bei der zweiten Methode wird das Wasser durch das Monomer Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) ersetzt, das im Weiteren durch einen Elektronenstrahl polymerisiert wird, womit eine Festigung erreicht wird [CB01],[IR00]. HEMA wird auch bei der Herstellung von Kontaktlinsen verwendet. Im ausgehärteten Zustand ist es immer noch feuchtigkeitsdurchlässig. Beide Methoden sorgen dafür, dass eine Bewegung des Lackes bei Feuchtigkeitsänderung mit bloßem Auge nicht mehr erkennbar ist. Um dennoch eine Beurteilung der einzelnen Konservierungsmethoden zu gewährleisten, werden ESPI-Messungen durchgeführt.

1.3 Motivation

Erste Testmessungen an unpräparierten Lackschichten [GG95] zeigen, dass der Einsatz von ESPI nicht nötig ist, um bei großen Feuchtigkeitsänderungen eine Deformation erkennen zu können. Ändert man die Feuchte jedoch vorsichtig im Bereich von einigen Zehntel-Prozent, um das Verhalten der Lackschicht genauer beurteilen zu können, so ist die auftretende Verformung nur noch mit ESPI zu detektieren. Die Verformung bei Trocknung gleicht sich vom Rande her aufwölbenden Schüsseln, wie es auch schon in Abb. 1.5 zu erkennen ist. Bei Befeuchtung legen sich die Ränder der Schüsseln wieder. Dieses Verhalten scheint auf einem Bi-Metall ähnlichen Effekt zu beruhen, bei dem sich die beiden Lackschichten gegeneinander verformen. Ein großer Teil der Verformungsgebiete kann jedoch mit dem verwendeten System nicht aufgelöst werden, da ihre Ausdehnung mit einigen zehn bis hundert μm zu klein ist. Diese Vormessungen werden als Grundlage zur Entwicklung eines dem Problem angepassten Messsystems genommen. Das System muss schnellveränderliche Prozesse detektieren können. Eine hohe laterale Auflösung wird benötigt. Es muss gezielte Klimaänderungen zulassen und die Bewegung der einzelnen Lackschichten getrennt voneinander ermöglichen.

In Kapitel 2 werden zuerst die wesentlichen Grundlagen der ESPI erläutert. Besonderer Wert wird hierbei auf die Verwendung eines räumlichen Phasenshifts (Spatial Phase Shift; SPS) gelegt, der sich hier als besonders geeignet herausgestellt hat. Es wird auf die Eigenheiten eines mikroskopischen Aufbaus eingegangen. Dann werden Messungen an verschiedenen gefestigten Lackproben bei Variation der Umgebungsfeuchte durchgeführt. Aus den Messungen an gefestigten, lackierten Original-Fragmenten werden erste Schlussfolgerungen über die verwendeten Festigungsmethoden gezogen. Aus der Betrachtung der auftretenden Verformungen folgt, dass eine Vermessung der Verformungen in Abhängigkeit von der Tiefe

und damit für jede der beiden Lackschichten unabhängig voneinander nützliche Ergebnisse über den Schadensprozess liefern wird. Kapitel 3 behandelt die Grundlagen einiger weißlichtinterferometrischer Verfahren, wie der OCT oder dem Kohärenzradar, mit deren Hilfe eine Strukturanalyse der Lackschichten der Terrakotta-Proben durchgeführt wird. In Kapitel 4 geht es um die Vereinigung von ESPI und Weißlicht-Interferometrie zu einem eigenständigen Messverfahren, mit dem es möglich wird, bei mehrschichtigen Objekten die Schichten getrennt voneinander zu untersuchen. Es werden Messungen an selbst gefertigten Testobjekten vorgestellt und hieran die Einsatzmöglichkeiten und die Grenzen des neuen Systems im Vergleich mit den diesem System zugrunde liegenden Systemen, der ESPI und der Weißlicht-Interferometrie, aufgezeigt. Danach werden Messungen an den Lackschichten der Terrakotta-Krieger vorgestellt. Abschließend wird eine kurze Zusammenfassung mit einem Ausblick für weitere Arbeiten gegeben.

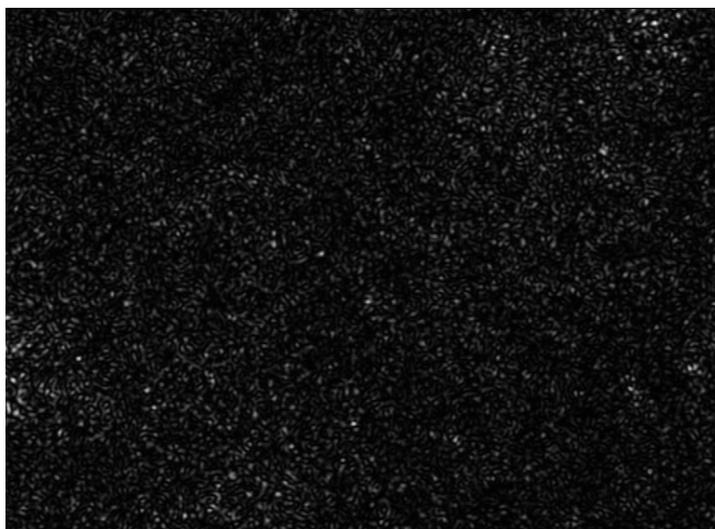
2 Elektronische Specklemuster Interferometrie (ESPI)

In diesem Kapitel wird auf die durchgeführten ESPI-Messungen eingegangen. Da es viele Arbeiten gibt, die sich ausschließlich mit diesem Thema beschäftigen, werden hier nur die wichtigsten Grundlagen, die zum weiteren Verständnis dieser Arbeit notwendig sind, kurz erläutert und dann auf weiterführende Literatur verwiesen [KC85], [BL71], [JW83] und [Do00]. Es werden Messungen an einem Mikroskop-ESPI-System mit der Möglichkeit einer gezielten Klimatisierung der Untersuchungsobjekte vorgestellt. Die speziell an diesem Aufbau auftretenden Eigenheiten werden erläutert. Die Ergebnisse der Messungen an farbigen Terrakotta-Fragmenten werden ausgewertet und eine Bewertung der verwendeten Festigungsmethoden vorgenommen. Diese Ergebnisse stellen dann die Motivation für das weitere Vorgehen dar.

2.1 Grundlagen der Specklemesstechnik

Die Objekte, die im Folgenden untersucht werden, sind optisch rau, das heißt, ihre Rauigkeit ist größer als die Wellenlänge λ des für die Untersuchungen verwendeten Laserlichts. Wird eine optisch raue Oberfläche gleichmäßig mit einem Laserstrahl ausgeleuchtet, so erscheint diese nicht gleichmäßig hell, sondern wie mit einem meist feinen Granulationsmuster überzogen, in dem es viele schwarze aber auch einige sehr helle Stellen gibt. Dieses Granulationsmuster, zu sehen in Abb. 2.1, wird im Allgemeinen als Specklemuster bezeichnet. Seine Entstehung kann wie folgt beschrieben werden:

Das Licht, das von den n einzelnen Punkten der Oberfläche reflektiert wird, kann nach dem Huygenschen Prinzip als eine Überlagerung von n einzelnen, voneinander unabhängigen Kugelwellen betrachtet werden. In einer ersten Näherung wird davon ausgegangen, dass die



Kohärenzlänge des verwendeten Lichts unendlich ist und die einzelnen Kugelwellen alle in der gleichen Richtung linear polarisiert sind. An einem beliebigen Punkt P im Raum ergibt die Überlagerung der n Kugelwellen in skalarer Schreibweise die Gesamtfeldstärke

$$E_p = \sum_n \frac{A_n}{r_n} e^{ik \cdot r_n}, \text{ für } r > 0. \quad (2.1)$$

Hierbei ist A_n/r_n die Amplitude der Elementarwellen im Abstand r_n vom jeweiligen Streuzentrum und $k = 2\pi / \lambda$ die Wellenzahl. Die relativen Phasen der Einzelwellen ergeben sich aus $\phi_n = k \cdot r_n$. Da die Oberfläche eine zufällige Rauigkeit aufweist, ist auch die Phasenlage der sich überlagernden Elementarwellen rein zufällig. Statistisch kann diese Überlagerung deshalb als „random-walk“-Problem in der komplexen Ebene aufgefasst werden [Goo75]. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(I)$ der Intensität I an jedem Ort P ergibt sich zu

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{-\frac{I}{\langle I \rangle}}, \text{ für } I \geq 0. \quad (2.2)$$

Hierbei bezeichnet die eckige Klammer $\langle \rangle$ das Ensemblemittel einer Größe. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(\phi)$ der Phase ϕ von E_p ergibt sich zu

$$p(\phi) = \frac{1}{2\pi}, \text{ für } -\pi \leq \phi \leq \pi. \quad (2.3)$$

Die Intensitäten in einem Specklemuster gehorchen also einer negativen Exponentialverteilung. Somit kommen niedrige Intensitäten am häufigsten vor. Die Phasen im Specklemuster sind hingegen gleichverteilt.

Wichtig für die weiteren Betrachtungen ist der mittlere Speckledurchmesser d_{sp} und die Specklelänge l_{sp} . Hierbei wird zwischen subjektiven und objektiven Specklen unterschieden. Die objektiven Speckle entstehen direkt durch die Überlagerung des vom Beleuchtungsfleck reflektierten Lichts in der Beobachtungsebene. Bei einem runden Beleuchtungsfleck [HT92] mit Durchmesser L und dem Abstand s zur Beobachtungsebene ergibt sich für die mittlere Specklegröße

$$d_{sp} = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{s}{L}, \quad L \ll s \quad (2.4)$$

und für die Specklelänge

$$l_{sp} = 8 \cdot \lambda \cdot \frac{s^2}{L^2}, \quad L \ll s. \quad (2.5)$$

Subjektive Speckle entstehen bei der optischen Abbildung des Beleuchtungsflecks. Hierbei sind die für die Specklegröße wichtigen Komponenten der Durchmesser der verwendeten Linse D und der Abstand s_i zwischen Linse und Abbildungsebene. Sie sind direkt gegen L und

s einzutauschen. Besser handhabbar wird die Formel, wenn sie in Abhängigkeit von der Blendenzahl $\#F = f/D$, mit f als der Brennweite der Linse und der Vergrößerung $M = (s_i - f)/f$ dargestellt wird

$$d_{sp} = 1,22 \cdot \lambda \cdot (1 + M) \cdot \#F . \quad (2.6)$$

Die Specklelänge errechnet sich somit zu

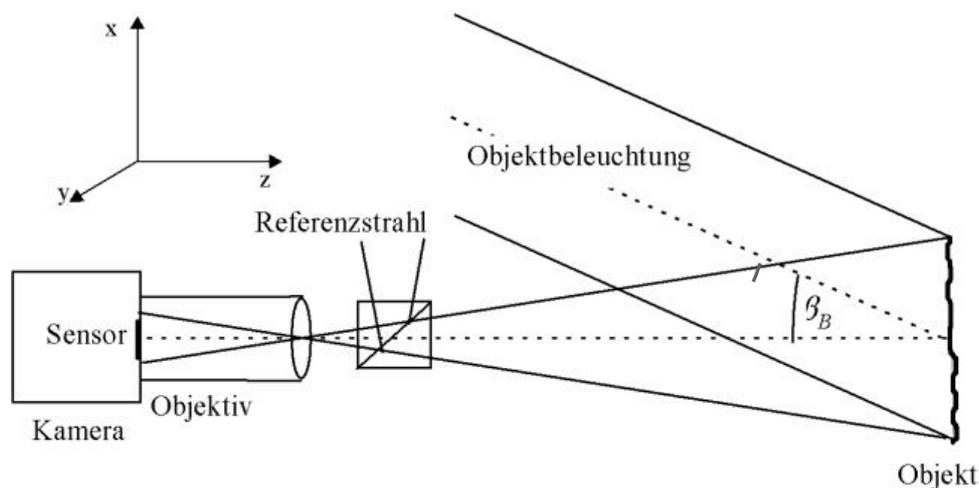
$$l_{sp} = 8 \cdot \lambda \cdot \#F^2 \cdot (1 + M)^2 . \quad (2.7)$$

In Abb. 2.2 ist der prinzipielle Aufbau eines ESPI-Systems dargestellt. Das zu untersuchende Objekt wird mit kohärentem Licht beleuchtet. Das vom Objekt erzeugte Specklemuster I_{Obj} wird mit einer Referenzwelle I_{Ref} überlagert. Das so entstehende Speckleinterferogramm wird mittels eines CCD-Sensors aufgezeichnet. Dieses Interferogramm enthält die phasengenaue Information $\phi(x, y)$ über die einzelnen Punkte der Oberfläche. Es lässt sich mathematisch wie folgt beschreiben:

$$I(x, y) = I_0(x, y) \cdot (1 + \gamma(x, y) \cdot \cos(\phi(x, y))) \quad (2.8)$$

- x, y Ortskoordinate in der Bildebene,
- I_0 Grundintensität des Interferogramms; $I_0 = I_{Ref} + I_{Obj}$,
- γ Modulationsgrad des Interferogramms; $\gamma = 2\sqrt{I_{Ref} I_{Obj}} / (I_{Ref} + I_{Obj})$, $0 \leq \gamma \leq 1$.

Verformt sich nun das Objekt, ändern sich die Phasen im Interferogramm. Hierbei ist die Richtung des Empfindlichkeitsvektor, der sich aus dem Winkel β_B zwischen Objektbeleuchtung und Beobachtungsrichtung ergibt, zu beachten. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass dieser Winkel sehr klein ist und somit mit einer Empfindlichkeit senkrecht zur Oberfläche, dem sogenannten „out-of-plane-ESPI“, gearbeitet wird. Wird ein Interferogramm vor und ein Interferogramm nach der Objektveränderung aufgenommen, so lässt sich die Phasenänderung senkrecht zur Oberfläche aus diesen beiden Interferogrammen



errechnen. Eine erste Möglichkeit besteht in der simplen betragsmäßigen Subtraktion der beiden Interferogramme. Dem hieraus entstehenden Korrelationsstreifenmuster kann direkt die Objektverformung entnommen werden. Orte gleicher Verformung erhalten den selben Helligkeitswert. Die Richtungsinformation geht hierbei jedoch verloren.

Um die Richtung der Verformung eindeutig bestimmen zu können, müssen Vorinformationen in die Berechnung mit einbezogen werden. So besteht die Möglichkeit, gezielte Phasenänderungen einzuführen. Dies führt zu den Methoden des Phasenschiebens.

2.2 Phasenschiebetechniken

Wie bereits erwähnt ermöglicht die Technik des Phasenschiebens oder „Phaseshiftings“ die eindeutige Bestimmung der Richtung der Verformung. Gleichzeitig erhöht sich die Messgenauigkeit. Grundlage für das Phasenschieben ist die Einführung einer bekannten Phasenänderung α_i zwischen Referenz- und Objektstrahl [KC85], [BL93]. Für die Intensitätsmodulation in den Interferogrammen ergibt sich dann

$$I_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = I_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cdot (1 + \gamma(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cdot \cos(\phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \alpha_i)). \quad (2.9)$$

In dieser Gleichung tauchen drei Unbekannte auf:

1. die Grundintensität $I_0(\mathbf{x}, \mathbf{y})$,
2. der Modulationsgrad $\gamma(\mathbf{x}, \mathbf{y})$,
3. die relative Phase der Wellenfronten $\phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$.

Es werden damit mindestens drei verschiedene Messungen i benötigt, um die Gleichung lösen zu können. Die Phase berechnet sich dann zu:

$$\phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^N I_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cdot \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^N I_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cdot \cos \alpha_i} \right), \quad (2.10)$$

mit $\alpha_i = 2 \cdot \pi \cdot \frac{i}{N}$. Durch die Betrachtung des Vorzeichens von Zähler und Nenner kann

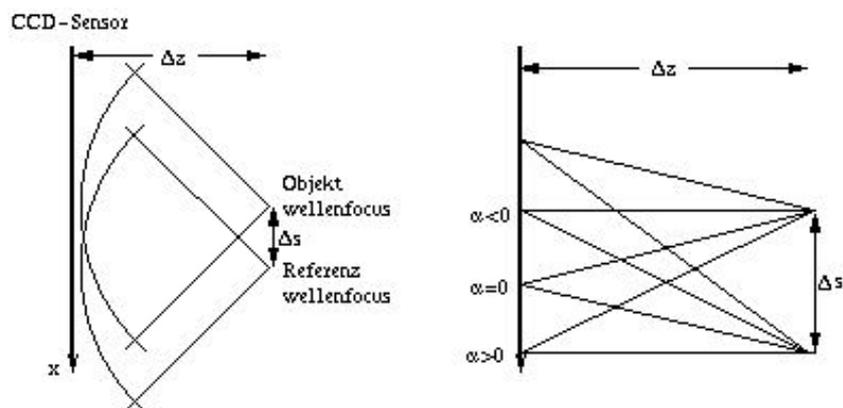
diese Darstellung, in der die Phase Modulo π vorliegt, auf einen Bereich Modulo 2π erweitert werden. Die entsprechende Zuordnung ist in Tabelle 1 dargestellt. Aus den einzelnen Interferogrammen werden somit Phasenkarten berechnet. Werden zwei Phasenkarten subtrahiert ergibt sich die Differenzphase. Diese ist umzurechnen in die zugrundeliegende Verformung. Da die Darstellung nur Modulo 2π erfolgt, ergibt sich für eine kontinuierlich ansteigende Phasendifferenz ein sogenanntes Sägezahnmuster. Die Darstellung der Differenzphase wird somit auch Sägezahnbild genannt.

Tab.1: Zuweisung der berechneten Phasenwerte ϕ aus dem Intervall $[-\pi/2, \pi/2]$ in das Intervall $[-\pi, \pi]$.

ϕ	0	0 bis $\frac{1}{2}\pi$	$\frac{1}{2}\pi$	$\frac{1}{2}\pi$ bis π	π	π bis $\frac{3}{2}\pi$	$\frac{3}{2}\pi$	$\frac{3}{2}\pi$ bis 2π
$\sin\phi$	0	+	+	+	0	-	-	-
$\cos\phi$	+	+	0	-	-	-	0	+
ϕ_{neu}	0	ϕ_{alt}	$\frac{1}{2}\pi$	$\phi_{\text{alt}} + \pi$	π	$\phi_{\text{alt}} + \pi$	$\frac{3}{2}\pi$	$\phi_{\text{alt}} + 2\pi$

Zur Realisierung des Phasenschiebens können die Messungen der Intensitäten I_i zeitlich nacheinander oder gleichzeitig aber räumlich versetzt erfolgen. Das erste Verfahren wird Temporal Phase Shifting (TPS), das zweite Spatial Phase Shifting (SPS) [BB95], [BB97], [KW97] und [JB00] genannt. Beim TPS wird zwischen den Aufnahmen von z.B. einzelnen Interferogrammen durch gezielte Veränderung der Weglänge entweder des Objekt- oder des Referenzstrahls die Phase im gesamten Interferogramm um α_i verändert. Für $i = 3$ ergeben sich 3 einzelne Interferogramme, aus denen sich für jeden Punkt die Phase berechnen lässt. Für das SPS-Verfahren müssen gleichzeitig drei um jeweils α_i verschiedene Interferogramme aufgenommen werden. Dies kann z.B. auf drei unterschiedlichen CCD Targets erfolgen oder aber auf drei unterschiedlichen Bereichen des selben CCD Targets.

Ändert sich die Phase stufenweise und wird während der Aufnahme eines Interferogramms konstant gehalten, wird vom stepping-Verfahren gesprochen, was der oben aufgeführten Formel entspricht. Wird die Phase kontinuierlich geändert und somit bei der Aufnahme der Interferogramme über die Phasenänderung integriert, heißt das Verfahren Integrating-bucket-Verfahren. Das Integrieren über einen Phasenschritt führt zu einer Verringerung der

**Abb. 2.3:** Erstellung eines räumlichen Phasenshifts. Links: Versatz der Foci. Rechts: resultierender Phasenversatz auf dem Sensor aus [AE99].

Modulation in den einzelnen Interferogrammen um einen Faktor $\text{sinc}\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)$ wobei $\Delta\alpha$ die Größe des Phasenschrittes ist, über den integriert wird.

Die Erzeugung eines räumlichen Phasenshifts mit dem Integrating-bucket-Verfahren, wie in Abb. 2.3 dargestellt, ist relativ einfach zu realisieren. Durch den gezielten Versatz des Quellpunkts der Referenzwelle zum Objektwellenfokus wird ein konstanter Phasengradient über dem CCD-Sensor erzeugt. Der Abstand der Foci zum CCD-Sensor Δz und damit die Krümmung der Wellenfronten ist gleich. Der laterale Versatz Δs bestimmt somit den Phasenvorschub

$$\alpha(x) = \left(\sqrt{(x + \Delta s)^2 + \Delta z^2} - \sqrt{x^2 + \Delta z^2} \right) \cdot \frac{360^\circ}{\lambda}. \quad (2.11)$$

Der Phasengradient $F_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x}$ berechnet sich somit zu

$$F_\alpha = \left(\frac{x + \Delta s}{\sqrt{(x + \Delta s)^2 + \Delta z^2}} - \frac{x}{\sqrt{x^2 + \Delta z^2}} \right) \cdot \frac{360^\circ}{\lambda}. \quad (2.12)$$

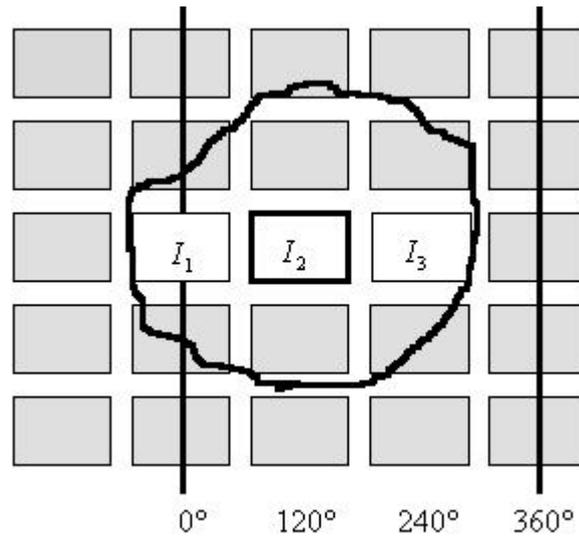
Unter der Annahme, dass $x \ll \Delta z$ und $x \ll \Delta s$ ist, errechnet sich für den Versatz des Referenzwellenfokus

$$\Delta s = \frac{\Delta z^2}{\sqrt{\left(\frac{360^\circ}{\lambda \cdot F_\alpha}\right)^2 - 1}}. \quad (2.13)$$

Normale Werte für Δs liegen im Millimeterbereich.

In [BB95] ist ein Beispiel für einen typischen Aufbau mit einem 120° -Phasenshift gerechnet. Dieser Phasenshift gilt als besonders geeignet. In Abb. 2.4 ist er schematisch dargestellt. Die Phase zwischen benachbarten Pixeln ändert sich jeweils um 120° . Aus drei benachbarten Pixeln kann so jeweils die Phase berechnet werden. Die Abweichung des Phasenvorschubs von der Linearität beträgt für $\Delta s = 3,7$ mm, $\Delta z = 150$ mm und einer Sensorbreite von ca. 6,4 mm weniger als $0,25^\circ$ über den gesamten Sensor. Wichtig ist die Specklegröße. In einem Specklefeld sind die Phasen zufällig verteilt. Nur innerhalb eines Speckles kann die Phase als annähernd konstant angesehen werden. Dies führt dazu, dass die Speckle bei diesem Verfahren mindestens entlang des Phasenshifts eine Ausdehnung von 3 Pixeln haben müssen. In [JB00] wird der Phasengradient innerhalb eines Speckles mit 110° angegeben. Dies ist nach [KW97] jedoch für die SPS Methode ausreichend klein.

Da sich die Phase im Interferogramm über die einzelnen Pixel nicht stufenweise sondern kontinuierlich ändert, verringert sich die Modulation bei einem 120° -Phasenshift unter der



Berücksichtigung des Faktors $\text{sinc}\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)$ auf 83 %. Wichtig für diese Berechnung ist der Füllfaktor der Kamera. Der Wert 83 % gilt nur für eine Kamera mit 100 % Füllfaktor. Bei einer Vielzahl von Kameras beträgt der Füllfaktor nur 50 %. Dies bedeutet im vorliegenden Fall, dass in einen Pixel nur über ein $\Delta\alpha$ von 60° gemittelt wird. Der Korrekturfaktor beträgt somit nur noch 0,95. Nach [BB95] kann der Modulationsverlust durch die Verstärkung der Kamera ausgeglichen werden. Ein kleiner Nachteil bleibt trotzdem noch, da eine Verstärkung an der Kamera zu einem erhöhten Rauschen führt. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Verstärkung korrekt eingestellt ist. Die Phase berechnet sich somit zu

$$\phi = \arctan\left(\sqrt{3} \cdot \frac{I_3 - I_2}{2 \cdot I_1 - I_2 - I_3}\right). \quad (2.14)$$

Diese Formel ist recht anfällig gegenüber einem falschen Phasenvorschub. Es ist deshalb möglich, den gleichen Ansatz zu machen aber die Intensität I_4 , die eigentlich wieder den gleichen Phasenwert wie I_1 aufweisen sollte, mit zu berücksichtigen. Hierzu ist in [SF93] folgende Formel vorgeschlagen worden, die den Phasenvorschub in I_1-I_3 mit dem in I_2-I_4 vergleicht und somit einen linearen Phasenfehler kompensieren kann.

$$\phi_2 = \arctan\left(\frac{2(I_3 - I_2)}{I_1 - I_2 - I_3 - I_4}\right). \quad (2.15)$$

Die Verbesserungen, die hierdurch bei der Phasenrekonstruktion erreicht werden können, sind in [FB01] aufgeführt. Ein linearer Phasenfehler von 10° kann bei Anwendung von Gl. 2.14 zu einem Fehler in ϕ von mehreren Grad führen. Bei Anwendung von Gl. 2.15 kann eine Verbesserung um einen Faktor 1,5 erreicht werden. Im Idealfall lassen sich hiermit Verformungen mit einer Genauigkeit von $1/25$ der verwendeten Wellenlänge messen.

Eine weitere Möglichkeit, Interferogramme mit einem räumlichen Phasenshift auszuwerten, ist die Fourier-Transformations-Methode (FTM).

2.2.1 Fourier Auswertung

Ein Specklemuster wird mit einem Referenzstrahl überlagert, dessen Quellpunkt zum Quellpunkt des abbildenden Systems lateral verschoben ist. Es entsteht ein Interferogramm mit einem räumliche Phasenshift. Mit $r(x, y)$ der komplexen Amplitude des Referenzstrahls und $o(x, y)$ der komplexen Amplitude des Objektstrahls ergibt sich aus Gl. 2.9 für einen räumlichen Phasenshift mit der Frequenz (ν_{0x}, ν_{0y}) :

$$I(x, y) = |o|^2 + |r|^2 + \gamma \left[o^* r \exp(-2\pi i(\nu_{0x}x + \nu_{0y}y)) + o r^* \exp(2\pi i(\nu_{0x}x + \nu_{0y}y)) \right]. \quad (2.16)$$

Rein rechnerisch ergibt die Fouriertransformation dieses Speckleinterferogramms

$$\begin{aligned} \tilde{I}(\nu_x, \nu_y) = & \left[F[|o|^2] + F[|r|^2] + \gamma O^*(-\nu_x, -\nu_y) * R(\nu_x + \nu_{0x}, \nu_y + \nu_{0y}) \right. \\ & \left. + \gamma O(\nu_x, \nu_y) * R^*(-\nu_x + \nu_{0x}, -\nu_y + \nu_{0y}) \right] \cdot H(\nu_x, \nu_y) \end{aligned}, \quad (2.17)$$

mit $R = F[r]$ dem Spektrum des Referenzstrahls, $O = F[o]$ dem Spektrum des Objektlichts und $H = F[h]$ der Transferfunktion der Kamera. $F[|o|^2]$ entspricht dem Specklehalo und $F[|r|^2]$ einem hellen Punkt in der Mitte des Bildes. Die beiden weiteren Terme in Gl. 4.4 entsprechen den beiden Seitenbändern, deren Mittelpunkt bei (ν_{0x}, ν_{0y}) bzw. der Punktspiegelung davon liegen. Für die weiteren Rechnungen werden einige Vereinfachungen angenommen. Es wird von einer gleichmäßigen Helligkeit im Referenzstrahl ausgegangen, dann entspricht $F[|r|^2]$ einer Deltafunktion multipliziert mit der Helligkeit des Referenzstrahls am Koordinatenursprung $|r_0|^2 \delta(\nu_x, \nu_y)$ und R wird somit zu r_0 . Der Modulationsgrads γ wird mit 1 angenommen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Kohärenzlänge unendlich ist und γ somit unabhängig von einem Weglängenunterschied zwischen Objekt- und Referenzstrahl ist. Die Transferfunktion der Kamera wird vernachlässigt. Sie spielt laut [FB01] nur in bestimmten Extremfällen eine Rolle. Ein Beispiel hierfür wird im Laufe des Abschnitts erwähnt. Es ergibt sich

$$\tilde{I}(\nu_x, \nu_y) = F[|o|^2] + |r_0|^2 \delta(\nu_x, \nu_y) + r_0 O^*(-\nu_x - \nu_{0x}, -\nu_y - \nu_{0y}) + r_0^* O(\nu_x - \nu_{0x}, \nu_y - \nu_{0y}). \quad (2.18)$$

Wird mit einem geeigneten Filter eines der Seitenbänder ausgeschnitten und in den Ursprung des Frequenzraums zurückverschoben, so ergibt die inverse Fouriertransformation

$$F^{-1}\left[r_0^* \mathcal{O}(v_x, v_y)\right] = r_0^* |o(x, y)| \exp(i\phi(x, y)). \quad (2.19)$$

Aus dieser Gleichung lässt sich direkt die Phase ϕ oder die Intensität des Objektlichts I_{Obj} berechnen. Die Intensität des Objektlichts entspricht direkt dem zugrundeliegenden Specklemuster.

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{\text{Im}\left(F^{-1}\left[r_0^* \mathcal{O}(v_x, v_y)\right]\right)}{\text{Re}\left(F^{-1}\left[r_0^* \mathcal{O}(v_x, v_y)\right]\right)}\right). \quad (2.20)$$

$$I_{Obj}(x, y) = |o(x, y)|^2. \quad (2.21)$$

In Abb. 2.5 ist die FTM schematisch dargestellt. Ein Specklemuster, zu sehen in Abb. 2.5 links oben, wird mit einem Referenzstrahl überlagert. Das Interferogramm, in dem der räumliche Phasenshift gut zu erkennen ist, ist in Abb. 2.5 rechts oben dargestellt. Die Fouriertransformation dieses Interferogramms ist in Abb. 2.5 unten links dargestellt. Der helle Punkt direkt in der Mitte wird vom Referenzstrahl erzeugt. Um ihn herum ist der Specklehalo zu erkennen. In den Seitenbändern links und rechts vom Specklehalo steckt die gesuchte

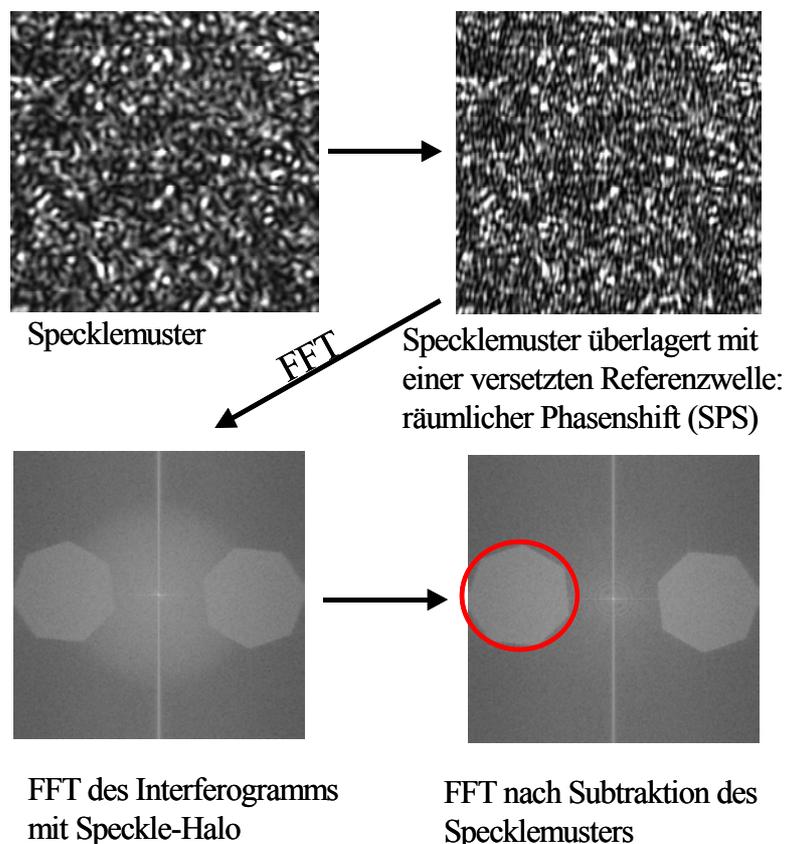


Abb. 2.5: Schematische Darstellung der FTM.

Information. Da der Specklehalo mit der gesuchten Information überlappt, kommt es zu Fehlern in der Berechnung der Phasen. Der Specklehalo kann beseitigt werden, indem vom Interferogramm das zugrunde liegende Specklemuster abgezogen wird. Es gibt zwei Möglichkeiten, an dieses Specklemuster zu gelangen. Zum einen kann der Referenzstrahl bei der Bildaufnahme ausgeblendet werden und das Specklemuster jetzt zu jedem Interferogramm separat aufgenommen werden. Zum anderen kann das Specklemuster wie bereits erwähnt aus dem Interferogramm herausgerechnet werden. Für diese Berechnung wird das Einbeziehen von H der (Modulations Transfer Funktion) MTF der Kamera wichtig. Das Übertragungsverhalten von Kameras zeigt meistens die Eigenschaft, Modulationen mit zunehmender Ortsfrequenz schlechter zu übertragen. Wird nun aus dem Seitenband eines Interferogramms das zugehörige Specklemuster berechnet, so werden kleinere Strukturen unterdrückt. Das Resultat ist nicht mehr das originale Specklemuster. Wie in [FB01] beschrieben kann die MTF einer Kamera gemessen und damit dieser Fehler korrigiert werden.

Durch Subtraktion des errechneten Specklemusters vom zugehörigen Interferogramm ist bei einer erneuten Fouriertransformation nur noch ein kleiner Teil des Specklehalos zu erkennen. Da ein Teil des Specklehalos mit der Filterfunktion mit ausgeschnitten worden ist, korreliert das rekonstruierte Specklemuster nicht zu 100% mit dem ursprünglichen Specklemuster, sondern nur zu ca. 90%. Wird das Verfahren jedoch iterativ weitergeführt, kann die Ähnlichkeit oder auch die Korrelation zwischen dem zugrunde liegenden und dem rekonstruierten Specklemuster weiter gesteigert werden.

Da über die FTM ein direkter Zugriff auf das zugrunde liegende Specklemuster besteht, kann eine weitere Technik, die Specklefotografie, angewendet werden. In Abb. 2.6 wird die Kreuzkorrelation zweier Unterbereiche eines Specklemuster gezeigt. Die Höhe des Maximums des normierten Korrelationspeaks zeigt an, wie hoch die Korrelation der beiden zugrunde liegenden Specklemuster ist. Die Lage des Maximums gibt an, wie die beiden Specklemuster gegeneinander verschoben sind. Aus diesen beiden Informationen kann zum einen auf Veränderungen von Oberflächen z.B. durch Korrosion geschlossen werden, welche zu einer Verringerung der Korrelation führt [FB02]. Zum anderen kann aus der Messung der Verschiebung die in der Ebene stattgefundenene Bewegung, die In-Plane-Bewegung, errechnet werden. In Kapitel zwei wird angeführt, welchen Einfluss In-Plane-Bewegungen vor allem beim Mikroskop-ESPI auf die Korrelation und damit auf die Qualität der Sägezahnstreifen haben. Durch die Specklefotografie kann diese In-Plane-Bewegung bestimmt und aus den Interferogrammen herausgerechnet werden [FB01], [FB02] und [MB02].

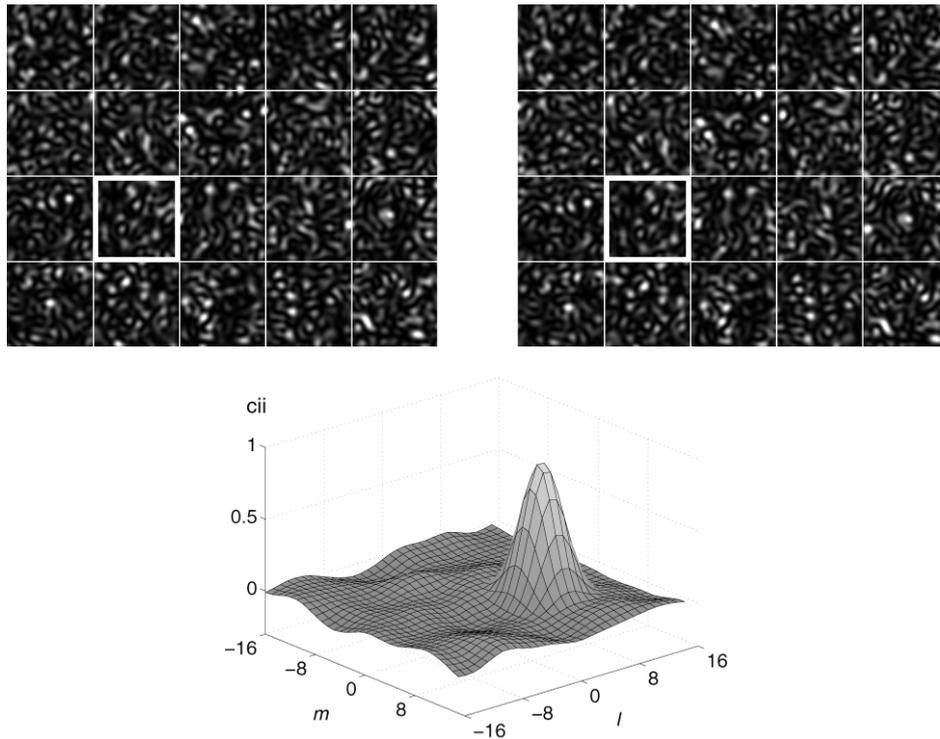


Abb. 2.6: Oben: zwei gegeneinander verschobenen Specklemuster, in Unterbereiche zerlegt. Unten: Darstellung der Kreuzkorrelation der beiden weiß umrandeten Specklemuster, aus [FB02].

2.2.2 Fazit der Phasenschiebetechniken

Für das weitere Vorgehen wird zumeist mit einem räumlichen Phasenshift von 120° und einer Auswertung nach Gl. 2.15 gearbeitet. Die SPS-Methode ist besonders geeignet für Messungen, bei denen schnellveränderliche Prozesse beobachtet werden. Im Gegensatz zur TPS-Methode können mit nur einer Bildaufnahme alle nötigen Informationen aufgezeichnet werden. Da sich in den Vormessungen gezeigt hat, dass die bei den zu untersuchenden Objekten auftretenden Verformungen sehr spontan erfolgen können, wird die SPS-Methode gewählt. Der Nachteil der SPS-Methode gegenüber der TPS-Methode liegt darin, dass die Speckle hier 3-mal größer sein müssen. Dies bedeutet sowohl einen Auflösungsverlust als auch einen Verlust in der Intensität des Objektlichts, da, wie aus Gl. 2.6 zu entnehmen ist, die Blende des abbildenden Systems verkleinert werden muss, um die Speckle zu vergrößern. Wie im folgenden Abschnitt aufgezeigt wird, ist dies für ein Mikroskop-ESPI-System nicht so gravierend. Durch die Vergrößerung des Abbildungsmaßstabs M kommt es zu einer Vergrößerung der Speckle. Dieser Effekt ist so groß, dass das Hauptproblem hier darin liegt, die Speckle nicht größer als 3 Pixel werden zu lassen.

2.3 Mikroskop-ESPI

Normalerweise werden mit ESPI Flächen von einigen Quadratzentimetern bis hin zu Quadratmetern vermessen. Zum Teil werden jedoch auch kleinere Flächen, wie zum Beispiel die Basilarmembran im Innenohr [NS81] oder mikroelektromechanische Systeme (MEMS), vermessen [AH99]. Hierbei ist die Verwendung eines Mikroskops unumgänglich. Das Problem ist, dass die verwendeten CCD-Sensoren nur eine begrenzte Auflösung haben und somit der zu untersuchende Bereich formatfüllend abgebildet werden muss, um eine gute Auflösung der sich verformenden Strukturen zu erhalten. Eine Faustregel [OL97] besagt, dass mindestens ein Gebiet von 5×5 Speckle betrachtet werden muss, um eine Verformung erkennen zu können. Im vorliegenden Fall sind, wie Vormessungen zeigen, die sich verformenden Gebiete nur einige hundert Mikrometer im Durchmesser groß. Die Abbildung der Messflächen erfolgt deshalb unter Zuhilfenahme eines Mikroskops, welches eine bis zu 6,4-fache Vergrößerung erlaubt. Die Erstellung des Aufbaus, die Berechnung der theoretischen Grundlagen und die exakte Vermessung seiner Eigenschaften können [AE99] entnommen werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Grundlagen kurz skizziert

2.3.1 Theoretische Grundlagen bei Verwendung eines Mikroskops

In der Literatur wird das Thema Mikroskop-ESPI recht spärlich behandelt. Ein Artikel, der sich mit den grundlegenden Eigenheiten beschäftigt, ist [OL97]. In Abb. 2.7 ist der für die weiteren Betrachtungen wichtige Teil eines Mikroskops dargestellt. Das Objekt befindet sich im Abstand s_0 vor der Linse mit der Brennweite f . Im Abstand s_i hinter der Linse wird in der Zwischenebene ein umgekehrtes, vergrößertes Bild erzeugt. Für die transversale und die longitudinale Vergrößerung ergeben sich folgende Zusammenhänge:

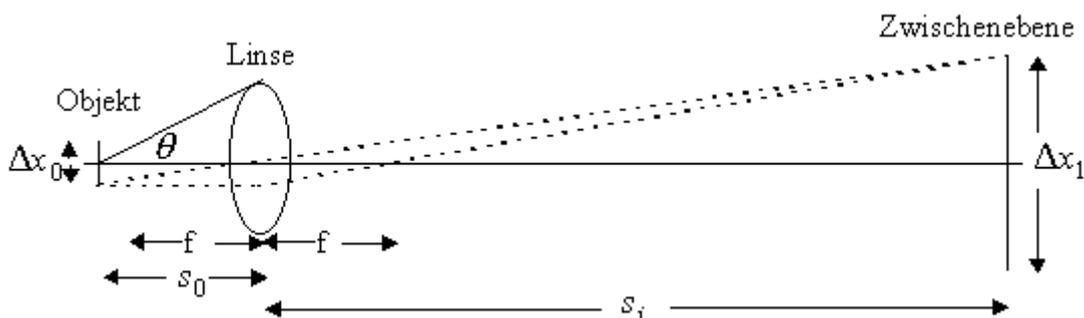


Abb. 2.7: Prinzipskizze eines Mikroskops mit den wichtigsten Größen aus [OL97].

$$M_T = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_0} = \frac{s_i}{s_0}, \quad (2.22)$$

$$M_L = \frac{\Delta z_i}{\Delta z_0} = M_T^2, \quad (2.23)$$

mit

- s_0 : Objektweite, Arbeitsabstand,
- s_i : Bildweite, Abbildungsabstand,
- Δx_0 : Objektgröße,
- Δx_i : Bildgröße,
- Δz_0 : Objekttiefe,
- Δz_i : Bildtiefe.

Eine weitere wichtige Größe ist die effektive Apertur F_{eff} . Sie beinhaltet nicht wie die numerische Apertur $NA = \sin \Theta$ nur die Winkelbeziehung für das einfallende Licht zwischen optischer Achse und den Randstrahlen der Linse, sondern ist der Quotient aus der Bildweite s_i und dem effektiven Durchmesser der Linse D . Für große NA ergibt sich

$$\frac{s_i}{D} = F_{\text{eff}} \approx \frac{M}{2 \cdot NA}. \quad (2.24)$$

Dieser Zusammenhang eingesetzt in die Specklegröße Gl. 2.6 mit den dort aufgeführten Definitionen von $\#F$ und M ergibt:

$$d_{sp} = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{M}{2 \cdot NA}. \quad (2.25)$$

Aus dieser Formel ist direkt ein wesentlicher Grundsatz der Mikroskop-ESPI abzuleiten. Starke Vergrößerungen bedeuten große Speckle. Dies ist nur durch eine große NA oder ein kleines λ einzuschränken. Da die Auflösung eines ESPI-Systems direkt mit der Specklegröße im Zusammenhang steht, ist es einsichtig, dass sehr schnell der Bereich erreicht ist, in dem nur noch eine Leervergrößerung erfolgt. Dies ist auch einer der Gründe, warum ein räumlicher Phasenshift verwendet werden kann. Da die Speckle bei mikroskopischer Abbildung schnell sehr groß werden, führt die Verwendung eines räumlichen Phasenshifts in den meisten Fällen zu keinem weiteren Auflösungsverlust, da die Speckle nicht mehr zusätzlich vergrößert werden müssen.

2.3.2 Dekorrelation bei Verkippung des Objekts

Bei reiner out-of-plane Geometrie führt die Höhenänderung eines Objekts während der Messung von $\lambda/2$ über den betrachteten Bereich zu einem Sägezahnstreifen. Der einfachste Fall einer kontinuierlichen Höhenänderung entspricht einer Verkippung. Für Untersuchungsgebiete, die im Zentimeterbereich liegen und damit sehr groß gegenüber der verwendeten Wellenlänge sind, bedeutet dies einen sehr kleinen Kippwinkel ε . Wenn der betrachtete Bereich aber immer kleiner wird, so wird der Kippwinkel ε , der zu einem Sägezahnstreifen führt, immer größer. Die Höhenänderung beträgt:

$$h_G = \tan \varepsilon \cdot a, \quad (2.26)$$

wobei a der Kantenlänge des betrachteten Bereichs entspricht. M. Owner-Petersen hat sich in [OP91] näher mit der Dekorrelation bei Verkippung beschäftigt. Vollständige Dekorrelation liegt demnach dann vor, wenn das vom Objekt reflektierte Licht, das vor der Verkippung die Eingangsapertur des abbildenden Systems passiert hat, nach der Verkippung diese nicht mehr passiert. Der maximale Verkippungswinkel berechnet sich damit zu

$$\varepsilon_{\max} = \frac{D}{s_0 \cdot (\cos \beta_B + 1)} \approx \frac{2 \cdot NA}{\cos \beta_B + 1}. \quad (2.27)$$

Hierbei bezeichnet s_0 die Objektweite, D den Blendendurchmesser und β_B den Beleuchtungswinkel, der im vorliegenden Fall für reines out-of-plane-ESPI vernachlässigbar ist. Für den maximalen Gesamthöhenunterschied ergibt sich

$$h_{G,\max} \approx \frac{2 \cdot NA}{\cos \beta_B + 1} \cdot a \sim \frac{NA}{M} \sim \frac{1}{d_{sp}}. \quad (2.28)$$

Für eine konstante Specklegröße ist $h_{G,\max}$ somit unabhängig von M . Es bleibt zu berücksichtigen, dass bei einer Verkippung auch eine Translation der Punkte der Oberfläche stattfindet. Diese Ganzkörperverschiebung ist, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, sehr wohl vom Abbildungsmaßstab M abhängig.

2.3.3 Dekorrelation bei Ganzkörperverschiebung

Eine Verkippung kann in eine x- und eine z-Verschiebung zerlegt werden. Mit der dadurch auftretenden Dekorrelation und der damit einhergehenden Kontrastverringerung der Korrelationsstreifen in der Interferometrie haben sich sowohl M. Owner Petersen [OP91] als auch R. Jones und C. Wykes [JW77] beschäftigt. Es wird im Folgenden der Fall für out-of-plane-ESPI betrachtet. Näheres zur Dekorrelation bei in-plane-ESPI ist in [JW83] zu finden.

Wie bereits erwähnt können Korrelationsstreifen erzeugt werden, wenn zwei Interferogramme voneinander abgezogen werden. Wird zwischen der Aufnahme der beiden Interferogramme das betrachtete Objekt verkippt, so ergeben sich cosinusförmig modulierte, parallele Streifen.

Der Kontrast V wird aus der Intensität I_{\min} im Minimum und I_{\max} im Maximum der Streifen berechnet

$$V := \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (2.29)$$

Bei reinem out-of-plane-ESPI mit einer konstanten Referenzwelle wird der Kontrast der Korrelationsstreifen durch den Korrelationskoeffizient c und das Verhältnis von Objekt- zu Referenzlichtintensität Q bestimmt. Nach [OP91] ergibt sich für den Kontrast

$$V = \frac{2 \cdot |c|}{Q \cdot (1 - |c|^2) + 2}, \quad (2.30)$$

wobei der Quotient Q im Weiteren als konstant angesehen und nicht mehr berücksichtigt wird.

Der Korrelationskoeffizient c für zwei identische Specklefelder, die um den Betrag d_B gegeneinander verschoben sind, berechnet sich zu

$$c(d_B) = 2 \cdot \frac{J_1(q)}{q}, \quad (2.31)$$

mit

$$q = d_B \cdot \frac{D \cdot \pi}{\lambda \cdot s_i}. \quad (2.32)$$

$J_1(q)$ stellt hierbei die Besselfunktion erster Ordnung dar. Die erste Nullstelle dieser Besselfunktion gibt somit an, wann das Specklefeld vollständig dekorreliert ist

$$d_{B,0} = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{s_i}{D} =: d_{sp}. \quad (2.33)$$

Dies entspricht gerade der Definition des mittleren Speckledurchmessers. Die Verschiebung des Specklemusters in der Abbildungsebene d_B hängt über den Abbildungsmaßstab M mit der Verschiebung des Objekts in der Ebene zusammen

$$d_G = \frac{d_B}{M}. \quad (2.34)$$

Für die kleinste Verschiebung des Objekts bis zur vollständigen Dekorrelation ergibt sich somit

$$d_{G,0} \approx 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{1}{2 \cdot NA}. \quad (2.35)$$

Für die Dekorrelation bei einer Verschiebung des Objekts in Richtung z berechnet sich unter Berücksichtigung der Specklelänge analog die maximale Verschiebung zu

$$l_{G,0} = 8 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{s_i}{D}\right)^2 \cdot \frac{1}{M^2} \approx 2 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{NA}\right)^2. \quad (2.36)$$

Die Bedingung, dass die Specklegröße konstant bleiben soll, führt dazu, dass der Quotient aus M und NA konstant bleibt. Je größer M wird, um so größer wird auch NA . Dies bedeutet $d_{G,0}$ wird linear mit M kleiner und $l_{G,0}$ sogar quadratisch kleiner mit M , wobei $l_{G,0}$ immer größer als $d_{G,0}$ bleibt.

In [AE99] wird die maximale Gesamthöhendifferenz $h_{G,\max}$ und die maximale Verschiebung in z -Richtung $l_{G,0}$ über der Vergrößerung M für konstante Specklegröße betrachtet. Für $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, $\beta_B = 25^\circ$ und $F_{\text{eff}} = 37,6$ bei einer Drehachse, die am Rand des betrachteten Bereichs liegt, ist zu erkennen, dass ab einer Vergrößerung von $M = 8$ $l_{G,0}$ der für die Dekorrelation bestimmende Parameter wird und dies auch nur in den Randbereichen. Im vorliegenden Fall, bei einer maximalen Vergrößerung von $M = 6,4$, spielt eine Dekorrelation aufgrund von Bewegungen in z -Richtung nur eine untergeordnete Rolle.

2.3.4 Experimentelle Bestätigung

Korrelationsmessungen können auf verschiedene Arten durchgeführt werden. Für die hier aufgeführten Messungen werden zwei Techniken verwendet. Zum einen wird der Kontrast der Korrelationsstreifen V nach Gl. 2.29 bei einer ESPI-Messung als Maß für die Korrelation genommen. Zum anderen wird direkt die Korrelation c aus Gl. 2.31 zweier Specklebilder berechnet.

Für die Messungen wird der später beschriebene Aufbau verwendet. Die wichtigsten Größen sind:

- $\lambda = 632,6 \text{ nm}$,
- $Q = 1/10$,
- $d_{\text{sp}} = 30 \text{ }\mu\text{m}$.

Ein d_{sp} von $30 \text{ }\mu\text{m}$ entspricht bei der verwendeten Kamera einem Pixelabstand P_A von 3 Pixeln. Als Objekt wird eine geweißte Metallplatte verwendet, die soweit verkippt wird, dass zwei Korrelationsstreifen über dem betrachteten Bereich entstehen. Die Drehachse liegt dabei in der Mitte des Bildes, womit durch die Kippung entstehende Ganzkörperverschiebungen minimal gehalten werden. Die Platte wird mit einem speziellen Piezotranslator (Burleigh Inchworm, IW 601, Kapitel 4.2.3) in $1 \text{ }\mu\text{m}$ Schritten in x -Richtung verschoben und der

Kontrast der Korrelationsstreifen berechnet. In Abb. 2.8 ist der theoretische Verlauf und die Messung für $M = 1,6$, $M = 3,2$ und $M = 6,4$ aufgetragen. Die Verschiebung wird auf die jeweils kleinste aufzulösende Fläche $d_{G,0}$ normiert. Es ist sehr gut zu erkennen, dass alle Kurven ihr Minimum bei dem Wert für die kleinste aufzulösende Fläche, welcher der Specklegröße d_{sp} entspricht, haben. Auffällig ist, dass die Streifen auch ohne Verschiebung keinen Kontrast von ca. 1 haben, wie er sich aus Gleichung (2.30) berechnen lässt. Dies kann zum einen am Rauschen der Kamera und der Bildverarbeitung liegen. Ein weiterer wesentlicher Grund sind Ungenauigkeiten im Aufbau. Kleine Ungenauigkeiten können zusätzliche Dekorrelationen erzeugen. Liegt z.B. die Drehachse nicht exakt in der Oberfläche, so führt die Verkippung, die notwendig ist, um die zwei Korrelationsstreifen einzustellen, nicht nur zu einer Verkippung, sondern zu einer weiteren Ganzkörperbewegung sowohl in z- als auch in x-y-Richtung. Dass die gemessenen Kurven nicht ganz bis auf einen Kontrast von Null abfallen, liegt daran, dass während der Messungen ein räumlicher Phasenshift eingestellt ist. Der grundsätzliche Verlauf der gemessenen Kurven deckt sich aber gut mit der Theorie.

Die Messung der Dekorrelation bei einer Ganzkörperverschiebung in z-Richtung wird mit reinen Specklemustern ohne Referenzstrahl durchgeführt. Es ist somit zur Korrelationsmessung kein Umweg über die Messung des Streifenkontrastes notwendig. Damit entfällt die Vorverkippung. Es wird das erste Bild aufgenommen, die geweißte Platte mittels des Inchworms in $10\ \mu\text{m}$ Schritten in z-Richtung verschoben, an jeder Position ein neues Bild aufgenommen und dieses mit dem ersten Bild kreuzkorreliert. Die Korrelationswerte über der Verschiebung sind in Abb. 2.9 zusammen mit der theoretischen Kurve dargestellt. Die Kurven sind auf $I_{B,0}$ normiert. Für $M = 6,4$ errechnet sich mit den vorher genannten Werten $I_{B,0} = 175\ \mu\text{m}$. Es ist festzustellen, dass die gemessene Korrelation grundsätzlich kleiner als die theoretisch erwartete Korrelation ist. Dies liegt unter anderem daran, dass zu der z-Verschiebung immer noch eine leichte Verschiebung innerhalb der Ebene stattfindet. Zwar

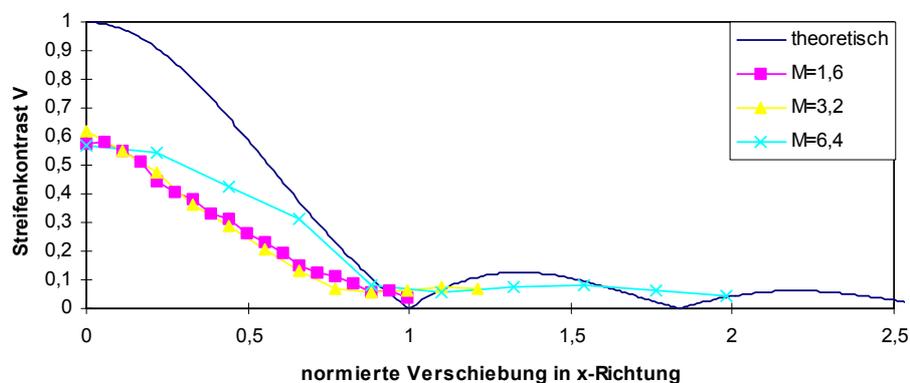


Abb. 2.8: Dekorrelation gemessen über den Kontrast der Korrelationsstreifen V (Gl. 2.29) bei einer Objektverschiebung in x-Richtung für unterschiedliche M aus [AEJ99]. Die Theorie ergibt sich aus Gl. 2.31 eingesetzt in Gl. 2.30.

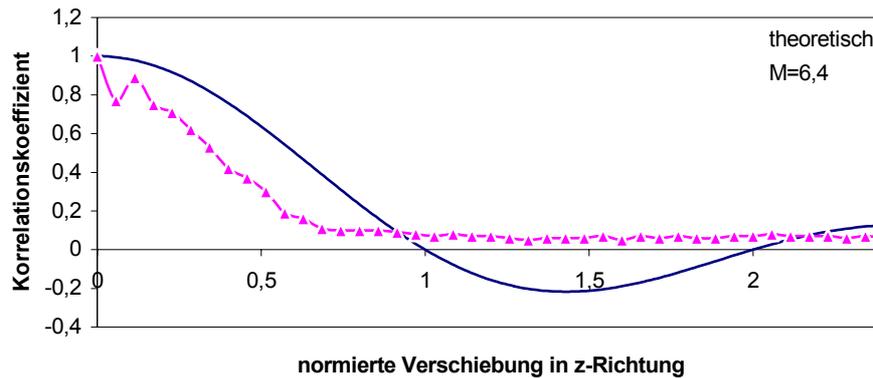


Abb. 2.9: Dekorrelation gemessen über den Korrelationskoeffizienten c (Gl. 2.31) bei einer Objektverschiebung in z-Richtung aus [AEJ99].

werden bei der Kreuzkorrelation die beiden Bilder wieder optimal übereinander gebracht, dennoch bleibt ein kleiner Fehler in den Randbereichen, da hier bei einer Verschiebung beide Bilder nicht mehr überlappen. Die Korrelation sinkt nie unter 10%, da sich die Specklebilder aufgrund ihrer Statistik immer ein wenig ähnlich sind. Zwar kann nach Gl. 2.31 c negative Werte annehmen, es kommen aber bei der Messung nur positive Werte vor, da die Grauwerte in den miteinander korrelierten Bildern nur positiv sind.

2.3.5 Fazit Mikroskop-ESPI

Ein positives Ergebnis ist, dass die detektierbare Gesamthöhendifferenz und somit die maximale Verformung über dem betrachteten Bereich nicht vom Abbildungsmaßstab abhängt. Jedoch führen Gesamtkörperverschiebungen mit zunehmendem Abbildungsmaßstab M zu stärkeren Dekorrelationseffekten. Gesamtkörperbewegungen sollten daher möglichst minimiert werden.

Für die Ortsauflösung des Systems ergibt sich nach Gl. 2.34 für eine Specklegröße von $29 \mu\text{m}$ bei der maximale Vergrößerung von $M = 6,4$ eine kleinste aufzulösende Fläche auf dem Objekt von $4,5 \mu\text{m}$. Aus der Abschätzung, dass 5×5 Speckle benötigt werden, um eine Verformung zu erkennen, resultiert eine minimale Fläche auf der eine Verformung detektiert werden kann von $25 \times 25 \mu\text{m}$.

2.4 Aufbau

Der für die ESPI-Messungen verwendete Versuchsaufbau ist in Abb. 2.10 dargestellt. Das Licht eines Helium-Neon-Lasers wird in zwei Strahlengänge aufgespalten. Der Objektstrahl wird durch ein Mikroskopobjektiv MO_1 aufgeweitet und durch die Linse L_1 auf die zur Ausleuchtung notwendige Größe gebracht. Durch den Spiegel S_2 wird der Objektstrahl auf das zu untersuchende Objekt in der Klimakammer gelenkt. Die Abbildung des Untersuchungsbereichs erfolgt durch ein Mikroskop auf einen CCD-Sensor. Zwischen Mikroskop und CCD-Sensor ist ein Strahlteiler angebracht, der es ermöglicht, dass Objekt- und Referenzstrahl zur Überlagerung gebracht werden können. Für den Referenzstrahl wird ein Teil des Laserlichts über eine Glasplatte ausgekoppelt und in eine monomode Glasfaser gelenkt. Das Auskoppeln des Lichts aus der Faser erfolgt so, dass ein konstanter, räumlicher Phasenshift von 120° über dem CCD-Sensor auftritt.

Bei dem verwendeten Laser handelt es sich um einen He-Ne-Laser Spectra Physics 127 mit einer Ausgangsleistung von ca. 26 mW bei 632,8 nm und einer Kohärenzlänge von ca. 20 cm. Das Licht ist linear polarisiert. Die Intensitätsschwankungen liegen unter 3 % direkt am Ausgang des Lasers. Wird die Intensität am Ort des CCD-Chips gemessen, so treten hier Schwankungen von maximal 8% auf. Dies ist damit zu erklären, dass das Laserlicht durch monomode Glasfasern geführt wird, die nicht polarisationserhaltend sind. Da der verwendete Strahlteiler wiederum polarisationsabhängig ist, führen Schwankungen der Polarisationsrichtung zu Änderungen in der Intensität. Untersuchungen zu Polarisationsfluktuationen in Standard-Singlemode-Glasfasern wurden unter anderem in [BL93], [DL97] und [SS98] gemacht. Ein Resultat ist, dass die auftretenden Schwankungen für ESPI in einer akzeptablen

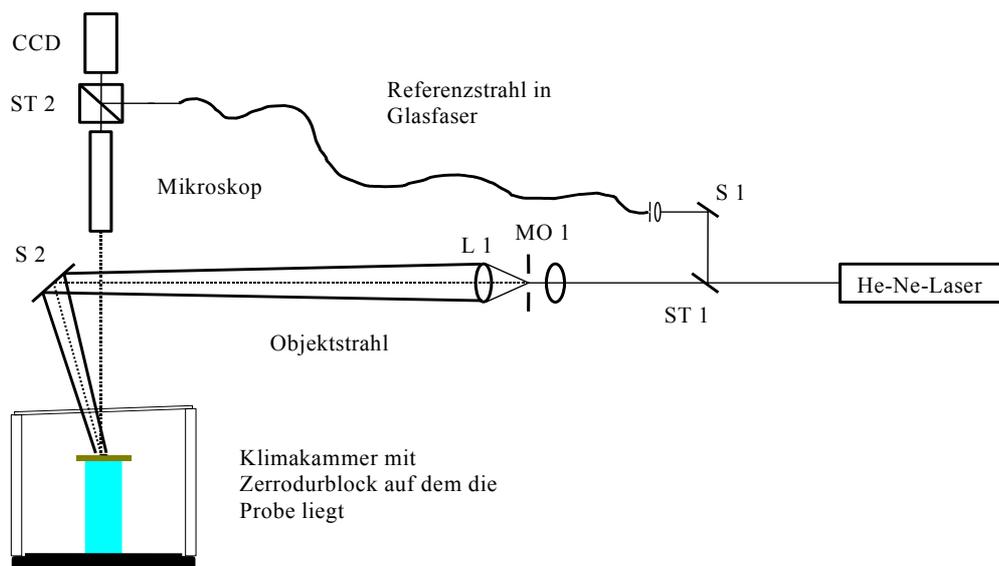


Abb. 2.10: Versuchsaufbau.

Größenordnung liegen.

Die verwendete Klimakammer ist ein doppelwandiger Eigenbau aus Plexiglas, der Objekte mit einer Kantenlänge von bis zu 10 cm aufnehmen kann. Eine Skizze des für die Klimatisierung zuständigen Teils des Aufbaus ist in Abb. 2.11 dargestellt. Unter Zuhilfenahme einer Pumpe wird Raumluft durch den ersten Thermostaten angesaugt (LAUDA Compact-Kältethermostat RCS6). Hier wird die Raumluft bei der Temperatur T_1 auf eine relative Luftfeuchte von 100% gebracht. Durch den zweiten Thermostaten wird die Luft auf die erwünschte Temperatur eingestellt. Da sich die Menge des in der Luft befindlichen Wassers nicht mehr ändert, ändert sich je nach Temperatur T_2 die relative Luftfeuchte. Um bei der gewünschten Temperatur T_2 die richtige relative Luftfeuchte zu erhalten, muss das korrekte T_1 gewählt werden. Zwar gibt es theoretische Ansätze, diese Werte zu berechnen, doch zeigt sich, dass die Werte besser empirisch zu ermitteln sind. Dies liegt z.T. daran, dass T_2 nicht grundsätzlich gleich der Temperatur in der Klimakammer ist. Es wird deshalb die gesamte Zeit die Feuchtigkeit in der Kammer kontrolliert, so dass auf Abweichungen reagiert werden kann.

Das zu untersuchende Objekt wird in der Kammer auf einem Zerodurblock platziert und kann durch ein Fenster betrachtet werden. Zerodur wird als Unterlage verwendet, da es einen sehr geringen Temperatursausdehnungskoeffizienten besitzt. Als Fenster wird eine Platte aus BK7 Glas mit einer Planität $< 3 \lambda$ und einer Parallelität von $30''$ verwendet.

Die Abbildung des Untersuchungsbereichs erfolgt durch ein Zoom-Stereomikroskop SV8 von Zeiss. Es handelt sich hierbei um ein Mikroskop mit großem Arbeitsabstand (LWD-Mikroskop). Trotz des großen Arbeitsabstandes ist die Numerische Apertur NA groß genug, so dass alle Annahmen aus Kapitel 2.3 hier Anwendung finden. Der genaue Aufbau des Mikroskops wird in [Zei] und [AE99] beschrieben. Wichtig sind die teleskopische Zoomfunktion, die eine Variation des Vergrößerungsbereichs um den Faktor 8 bei gleichbleibendem Objektabstand ermöglicht, und die eingebaute Irisblende, die eine Variation der Specklegröße zulässt. Für die Messungen wurde das Planobjektiv PLS 100 mm

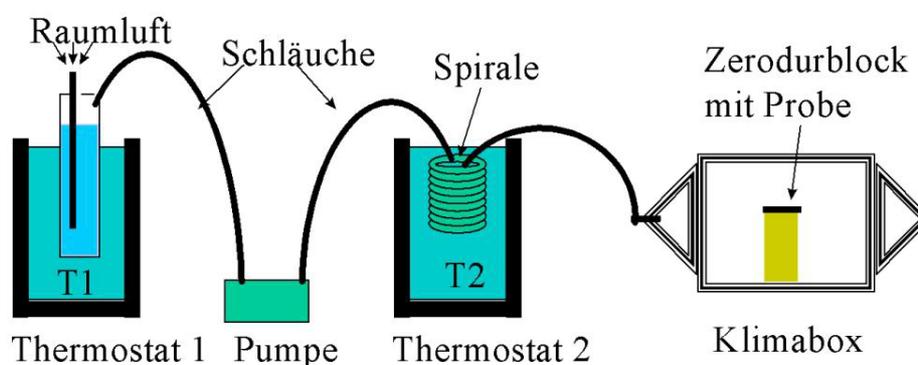


Abb. 2.11: Schematische Darstellung der Klimatisierung aus [AE99].

Tabelle 2.2: Grundlegende Größen des verwendeten Mikroskops.

Stellung des Vergrößerungswechslers	0,8	1,6	3,2	6,4
NA	0,027	0,042	0,059	0,085
M	0,8	1,6	3,2	6,4
d_{Sp} in der Zwischenebene in μm	11,4	14,7	20,9	29

verwendet, dessen Brennweite $f = 100$ mm sich als ausreichend erweist. Die NA für die unterschiedlichen Vergrößerungen bei maximal geöffneter Blende und die dabei im verwendeten Aufbau auftretenden Specklegrößen sind in Tabelle 2.2 nachzulesen.

Das in der Zwischenebene eines der beiden Strahlengänge dieses Stereomikroskops entstehende Bild wird mit einer CCD-Kamera SONY XC-75 CE [So75] aufgenommen. Zur Vermeidung von zusätzlichen Interferenzstrukturen wurde das Schutzglas vor dem Sensor entfernt. Die von der CCD-Kamera aufgenommenen Bilder werden für die ersten Messungen mit einer Bildverarbeitungskarte (DATA TRANSLATION DT 3852-B) und der dafür geschriebenen Software von J. Burke und T. Bothe [BB95] bearbeitet. Im Weiteren wird dann auf ein System mit einer Matrox-Genesis-Karte umgerüstet.

Die von der Kamera kommenden Bilder bestehen aus 768×576 Pixeln. Da diese Bilder aber im Interline-Transfer-Modus ausgelesen werden, ist es zeitweilig nützlicher, nur Halbbilder zu betrachten, denn zwischen dem Beginn der Aufnahme eines jeden Halbbildes liegen 20 ms. Werden die Halbbilder mit einer kürzeren Belichtungszeit als diesen 20 ms aufgenommen und kommt es zwischen der Aufnahme der Halbbilder zu einer Veränderung des betrachteten Objekts, so ist ein Zusammensetzen der Halbbilder zu einem Vollbild nicht mehr sinnvoll.

Der hierdurch entstehende Effekt ist in Abb. 2.12 gut zu erkennen. Es werden durch eine Verkippung etwas mehr als zwei Sägezahnstreifen erzeugt. Das Sägezahnbild des Vollbildes

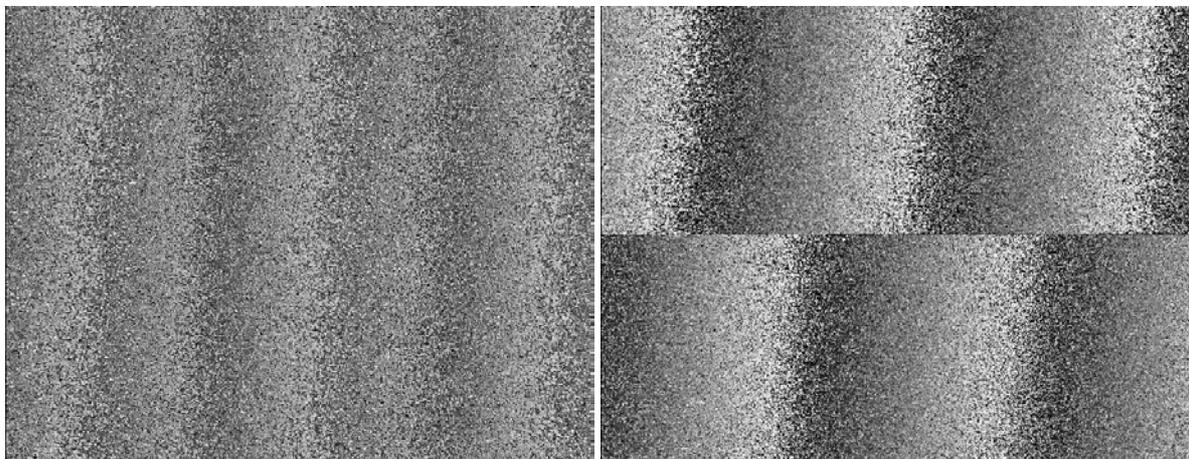


Abb. 2.12: Links: Sägezahn als Vollbild. Rechts: Sägezahnbild nach geraden und ungeraden Zeilen separiert. Durch eine Verkippung werden 2,5 Streifen eingestellt. Im Vollbild entsteht der Eindruck von 5 Streifen.

wirkt stark verrauscht. Es entsteht der Eindruck von fünf Sägezahnstreifen. Werden die Halbbilder separat betrachtet, so zeigt sich, dass zwischen der Aufnahme der Halbbilder eine Ganzkörperbewegung stattgefunden hat, die Sägezahnbilder an sich aber nur wenig verrauscht sind.

Für die folgenden Messungen werden zumeist folgende Einstellungen am Aufbau gewählt:

- Objekt- zu Referenzstrahlintensität: 1/7 bis 1/10,
- Räumlicher Phasenshift: 120° entlang der Zeilen der Kamera,
- Specklegröße: 3 mal dem Pixelabstand P_a .

2.5 Messung an konservierten Lackschichten und Originalfragmenten

Im Vordergrund der Messungen steht der Vergleich der zwei Hauptkonservierungsmethoden, der Festigung mit elektronenstrahlgehärtetem HEMA und der Behandlung mit einer Kombination aus PEG 200 als Quellminderer und Polyurethan als Kleber. Beide Methoden festigen die Lackschichten auf der Terrakotta so gut, dass kurze Zeit nach der Behandlung mit bloßem Auge keine Veränderungen zu erkennen sind.

2.5.1 Vormessungen zur Beurteilung der Systemparameter

Bevor die Messungen an den original Terrakotta-Fragmenten durchgeführt werden, wird das System auf seine Einsatzfähigkeit getestet. Hierfür werden Messungen an isolierten Lackschichten vorgestellt. Es handelt sich hierbei um kleine Stücke Lack mit einer Größe von weniger als 1 cm², die auf künstliche Tonträger aufgebracht werden. Es wird überprüft, bei welcher Vergrößerung sinnvoll gemessen werden kann und in welcher Größenordnung die an den Original-Fragmenten zu erwartenden Verformungen liegen.

2.5.1.1 GR05

Bei der ersten Probe mit der Bezeichnung GR05, dargestellt in Abb. 2.13, handelt es sich um den Versuch, den ursprünglich verwendeten Grundierungslack nachzubilden, um so auf altersbedingte Veränderungen schließen zu können. Da sich im Laufe der Zeit viele der dem Lack beigemischten organischen Stoffe vollständig zersetzt haben, ist der Versuch, über das Beimengen unterschiedlicher Zusatzstoffe zum Rohlack bekannter Zusammensetzung ein dem Originallack möglichst ähnlichen Lack künstlich zu erzeugen, eine Möglichkeit, der Art des Lackzerfalls auf die Spur zu kommen und somit geeignete Konservierungsmethoden zu finden [CB01]. Die hier untersuchte Probe besteht aus Rohlack, dem 10 % Reiskleister beigemischt wurde. Ihre Bezeichnung ist GR05 10%. Die Fixierung des Lacks auf einem künstlichen Tonträger soll durch das ausgehärtete HEMA stattfinden, so dass grundsätzlich

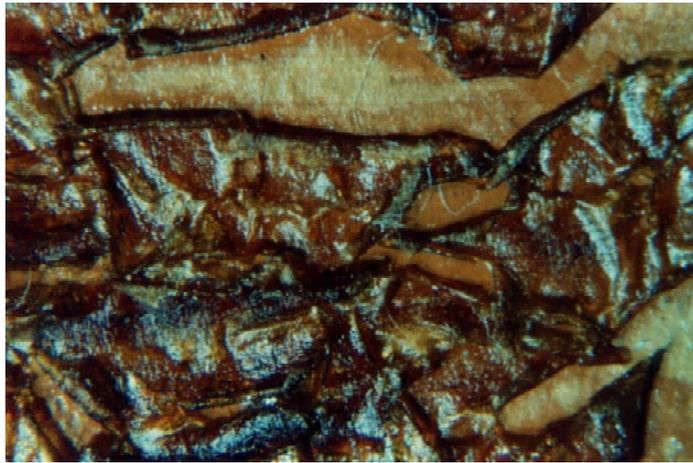


Abb. 2.13: Farbfoto der Probe GR05 (Kantenlänge $11 \times 7,5 \text{ mm}^2$).

kein zusätzlicher Kleber benötigt wird. Bei der hier vorliegenden Probe ist die Haftung zum Untergrund jedoch mangelhaft.

Für die Messungen wird die Probe in die Klimakammer gelegt und bei konstanter Raumtemperatur einer langsamen Feuchtigkeitsänderung unterzogen. Problematisch bei der Messung sind die an der glatten Probe auftretenden Direktreflektionen. Die Messungen verlaufen alle unbefriedigend, da sehr schnell Dekorrelationen auftreten. Noch bevor ein Korrelationsstreifen zu erkennen ist, ist vollständige Dekorrelation eingetreten. Somit ist eine Auswertung von Korrelationsstreifen und damit eine Aussage über die auftretenden Verformungen nicht möglich. Für die auftretenden Dekorrelationen können mehrere Gründe aufgeführt werden. Zum einen kann die Luftströmung die nur ungenügend auf der Terrakotta befestigte Lackschicht in Bewegung versetzen. Zum anderen sind die auftretenden Verformungen auch bei geringer Feuchtigkeitsänderung sehr groß. Die Auswirkungen der Feuchtigkeitsänderungen auf die Lackschicht, wie z.B. das starke Aufrollen bei Austrocknung oder das fortschreitende Ablösen vom Untergrund, können schon mit bloßem Auge unter dem Mikroskop beobachtet werden. Teile der Lackschicht fallen nach mehreren Feuchtigkeitsänderungen sogar ab. Dies ist aber auch der Grund, warum hier der Einsatz von ESPI-Messungen nicht notwendig ist. Ein vorsichtiger Kratztest mit einem feinen Schraubenzieher zeigt, dass der Lack stark versprödet. Dies sind alles Anzeichen für eine ungenügende Festigung durch die angewandte Konservierungsmethode. Da es sich hier aber nur um den Versuch einer Nachbildung und nicht um den Originallack handelt, besteht die Möglichkeit, dass dieser anders auf die hier angewandte Art der Festigung reagiert.

2.5.1.2 Q-012

Bei der zweiten Probe mit der Bezeichnung Q-012 handelt es sich um ein kleines Stück originalen Grundierungslack, der durch gehärtetes HEMA auf einem künstlichen Tonträger fixiert wurde. Ein Bild dieser Lackschicht ist in Abb. 2.14 dargestellt. Sie erscheint matt schwarz und ist mit zwei großen und vielen kleinen Rissen durchzogen.

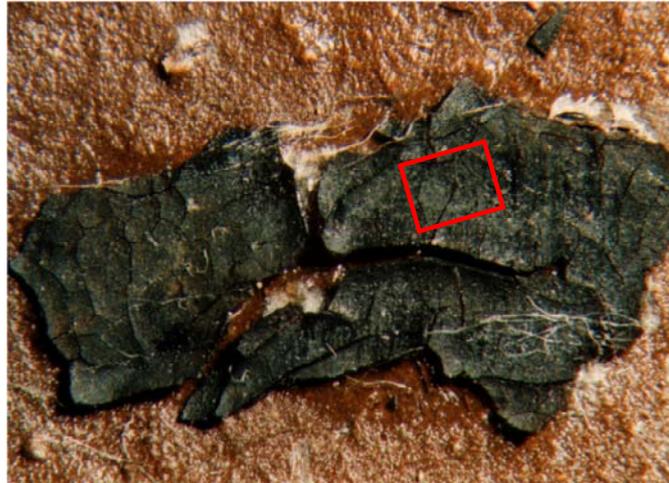


Abb. 2.14: Farbfoto der Probe Q-012 (Kantenlänge $10 \times 6,5 \text{ mm}^2$).

Für die Messung wird die Probe in die Klimakammer gelegt. Es wird ein ca. $1,2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ großer Bereich auf der Probe betrachtet, der mit Rissen durchzogen ist, da hier am ehesten eine Verformung zu erwarten ist. Die Feuchtigkeit in der Klimakammer wird bei Raumtemperatur auf ca. 65% r.F. eingestellt und für eine halbe Stunde konstant gehalten, um die Probe in ein Gleichgewicht mit der Umgebungsluft kommen zu lassen. Dann wird die Feuchtigkeit auf 61% r.F. gesenkt. Die hierbei auftretenden Verformungen sind als Sägezahnstreifenbild in Abb. 2.15 dargestellt. Dieses Bild lässt sich demodulieren und so direkt in ein Pseudo 3-D-Bild der Verformung umrechnen. Das mit dem Programm Istra der Firma Etemeyer [Ett96] errechnete Verformungsbild ist in Abb. 2.16 zu sehen. Der sich verformende, kreisförmige Unterbereich links unten in beiden Bildern hat einen Durchmesser von ca. 0,5 mm. Bei Austrocknung rollen sich die Ränder dieses Unterbereichs auf. Die registrierten Höhenänderungen liegen bei maximal 700 nm. Im Vergleich zu den Vormessungen 1995 und 1997 [GG95][GG97] an unbehandeltem Originallack, bei dem eine Feuchtigkeitsänderung um 0,1 % r.F. zu Höhenänderungen von bis zu $16 \text{ }\mu\text{m}$ führt, ist die Reaktion dieses Lacks auf Feuchtigkeitsänderungen deutlich zurückgegangen. Die angewandte Konservierungsmethode zeigt hier also recht gute Resultate.

2.5.1.3 Fazit der Vormessungen

Die Vormessungen haben gezeigt, dass das Mikroskop-ESPI-System zur Vermessung von klimabedingten Verformungen an gefestigten Original-Lackschichten geeignet ist, wohingegen Messungen an den nachgebildeten Lackschichten keine sinnvollen Resultate liefern.

Die Messungen an der gefestigten Original-Lackschicht haben ergeben, dass die zu erwartenden Verformungen in der Größenordnung von einem Mikrometer bei einer Änderung der relativen Luftfeuchte von 4 Prozent liegen. Dies sind beides Größen, die dem System sehr entgegenkommen. Die auftretende Verformung ist in der idealen Größenordnung für ESPI-

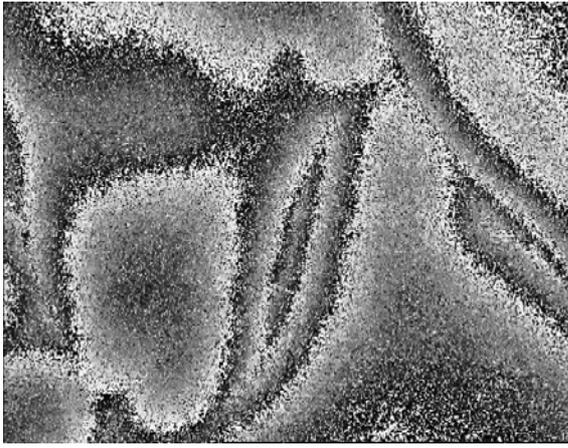


Abb. 2.15: Sägezahnbild der Probe Q-012 bei einer Feuchteänderung von 65 % auf 61 % r.F. (Kantenlänge $1,2 \times 1 \text{ mm}^2$).

μm

1.04
0.84
0.63
0.43
0.22
0.01
-0.19
-0.40

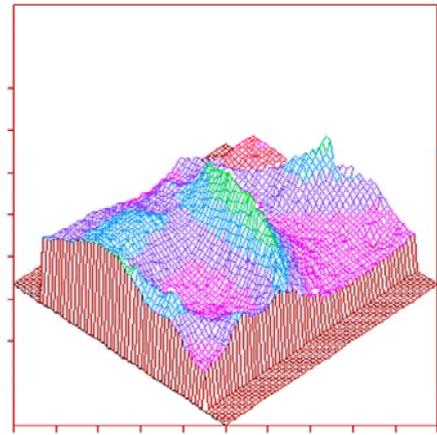


Abb. 2.16: Pseudo 3D-Darstellung der Verformung, berechnet mit ISTR A [Ett96].

Messungen, da das auftretende Sägezahnstreifenmuster sehr gut ausgewertet werden kann. Eine Änderung der Luftfeuchte im Prozentbereich ist mit der verwendeten Klimakammer gut einzustellen. Das die Verformungen innerhalb einer halben Stunde auftreten bedeutet, dass die Lackschicht schnell auf Feuchtigkeitsänderungen reagiert und eine Messungen relativ zügig durchgeführt werden kann.

Nach diesen Vormessungen wird die Methode der mikroskopischen ESPI nun zur Vermessung verschieden gefestigter, bemalter Original-Fragmente verwendet.

2.5.2 Messungen an Original-Fragmenten zur Beurteilung der Festigung

Im Dezember 1998 werden erste Terrakotta-Fragmente zu Messzwecken für einen Tag nach Oldenburg gebracht.

2.5.2.1 F011/98

Das erste Fragment trägt den Namen F011/98 und ist in Abb. 2.17 dargestellt. Es handelt sich um einen Teil eines Brustpanzers. Das Fragment selber hat eine Ausdehnung von ca. 6 cm.

Bei einer ersten Inspektion des Fragments unter dem Lichtmikroskop sind keine Auffälligkeiten zu erkennen. Die erste Messung (Ausschnitt A; ca. $6,6 \text{ mm} \times 5,4 \text{ mm}$) wird auf dem schwarzen Grundierungslack durchgeführt. Bei diesem Versuch wird die Feuchtigkeit innerhalb von 10 Minuten von 48 % r.F. auf 76 % r.F. erhöht. Es wird dieser relativ große Ausschnitt gewählt, da nur eine Übersicht gewonnen werden soll, wo Verformungen auftreten. Der relativ schnelle Feuchtigkeitswechsel wird benutzt, da es zunächst um einen ersten Eindruck geht. Es kommt zwar nicht das gesamte Fragment ins Gleichgewicht mit der Feuchtigkeit in der Klimakammer, für die nur ca. 60-100 μm dicke Lackschicht sollte diese Zeit jedoch ausreichen, um eine Reaktion zu zeigen. Es wird alle 15 Sekunden ein Interferogramm aufgenommen und abgespeichert. Da jedes Interferogramm mit

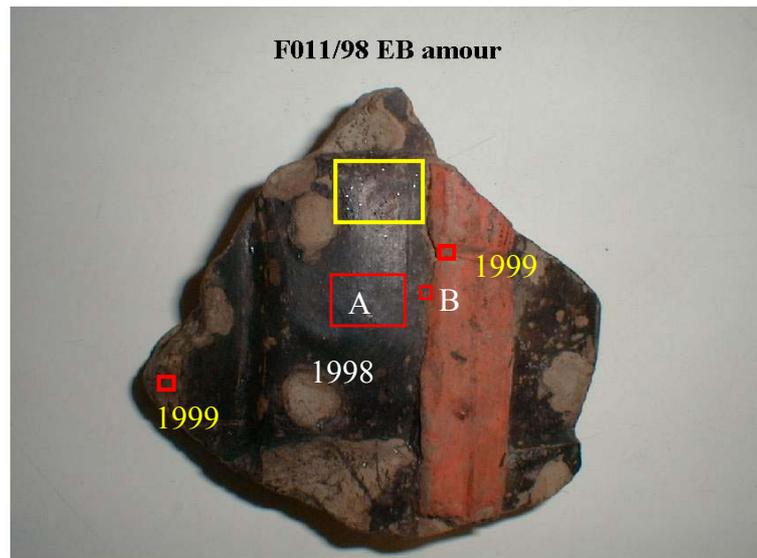


Abb. 2.17: Farbfoto von Fragment F011/98 (Durchmesser ca. 6 cm). Eingezeichnet sind die Messbereiche A ($6,6 \times 5,4 \text{ mm}^2$) und B ($1,2 \times 1 \text{ mm}^2$) von 1998. Gelbumrahmt ist ein Gebiet, in dem sich kleine „Vulkane“ gebildet haben.

jedem verglichen werden kann, kann sowohl untersucht werden, wie sich die Probe nach einigen Stunden verändert hat, als auch, wie schnell die Änderung eintritt. Die kleinste Schrittgröße, mit der später die Verformung untersucht werden kann, sind jedoch die 15 Sekunden. Während der Messung wird auf dem Monitor direkt die Verformung zwischen dem ersten und dem aktuell aufgenommenen Bild als Sägezahnbild dargestellt, so dass diese Verformung live mitverfolgt werden kann. In Abb. 2.18 ist die Verformung, die bei einer Feuchtigkeitsänderung in der Klimakammer von 70 % r.F. auf 75 % r.F. auftritt, dargestellt. Es ist eine Verformung von sehr kleinen Unterbereichen über den gesamten Bildausschnitt zu erahnen. Die Vergrößerung ist nicht ausreichend, um genauere Aussagen über das Verformungsverhalten machen zu können.

Für die zweite Messung wird deshalb der Bereich B mit einer Größe von $1,2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$

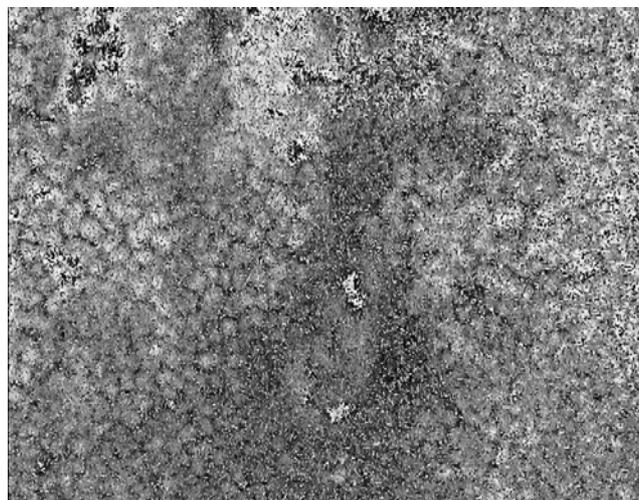


Abb. 2.18: Sägezahnbild der Messung im Bereich A bei einer Feuchteänderung von 70% auf 75% r.F.

ausgesucht. Er liegt dicht an dem vorher betrachteten Bereich, so dass auch hier ähnliche Verformungen zu erwarten sind.

Bei der gewählten Vergrößerung von $M = 6,4$ können hier bei Beleuchtung mit Weißlicht in Abb. 2.19 oben zwei Risse im Lack erkannt werden, was eine noch stärkere Reaktion des Lacks auf eine Feuchtigkeitsänderung aufgrund der Vorschädigung erwarten lässt. Die relative Feuchte wird schrittweise von 32 % r.F. auf 50% r.F. erhöht und dann weiter von 50% r.F. auf 78% r.F. Die Wartezeit bei 50% r.F. ist auf die Mittagspause zurückzuführen. Es zeigt sich, dass während dieser Zeit von 30 Minuten bei konstant 50% r.F. in der Klimakammer keine weiteren Verformungen auftreten. Erst als die Feuchtigkeit weiter erhöht wird, können weitere Verformungen detektiert werden. Die Probe oder wenigstens die feuchtigkeitsempfindliche Lackschicht mit einer Dicke von ca. 100 μm kommt in ein Gleichgewicht mit der sie umgebenden Luftfeuchte. Die auftretenden Verformungen sind in Abb. 2.19 zu betrachten. Die Messung wird in vier Schritte unterteilt. Die Addition der Sägezahnstreifen aller Bilder ergibt die Gesamtverformung bei einer Feuchtigkeitsänderung von 38% r.F. auf 79% r.F. Das Zerlegen der Messung in einzelne Teilschritte ermöglicht zum einen eine bessere Auswertung der einzelnen Sägezahnbilder, zum anderen ergibt sich ein Eindruck über den zeitlichen Verlauf der Verformungen. Es zeigen sich meist kreisförmige Verformungsgebiete mit einem Durchmesser von ca. 100 - 250 μm . Bei einer Feuchtigkeitserhöhung senken sich die Ränder dieser Schollen gegenüber der Mitte ab. Die Art der Verformung lässt auf eine craqueléartige Struktur schließen, doch sind außer den zwei erwähnten Rissen keine weiteren Risse in den Weißlichtaufnahmen zu erkennen. Die maximal zu messenden Höhenänderungen sind ca. 300 nm bei der Erhöhung von 38% r.F. auf 50% r.F. und 1 μm bei der Erhöhung von 70 % r.F. auf 79 % r.F. Bei dieser Messung finden gerade in diesem Bereich der Feuchtigkeitsänderung die größten Verformungen statt. Dieses Verhalten war auch in den Vormessungen an unbehandelten Lackschichten 1995 und 1997 festzustellen [GG95][GG97].

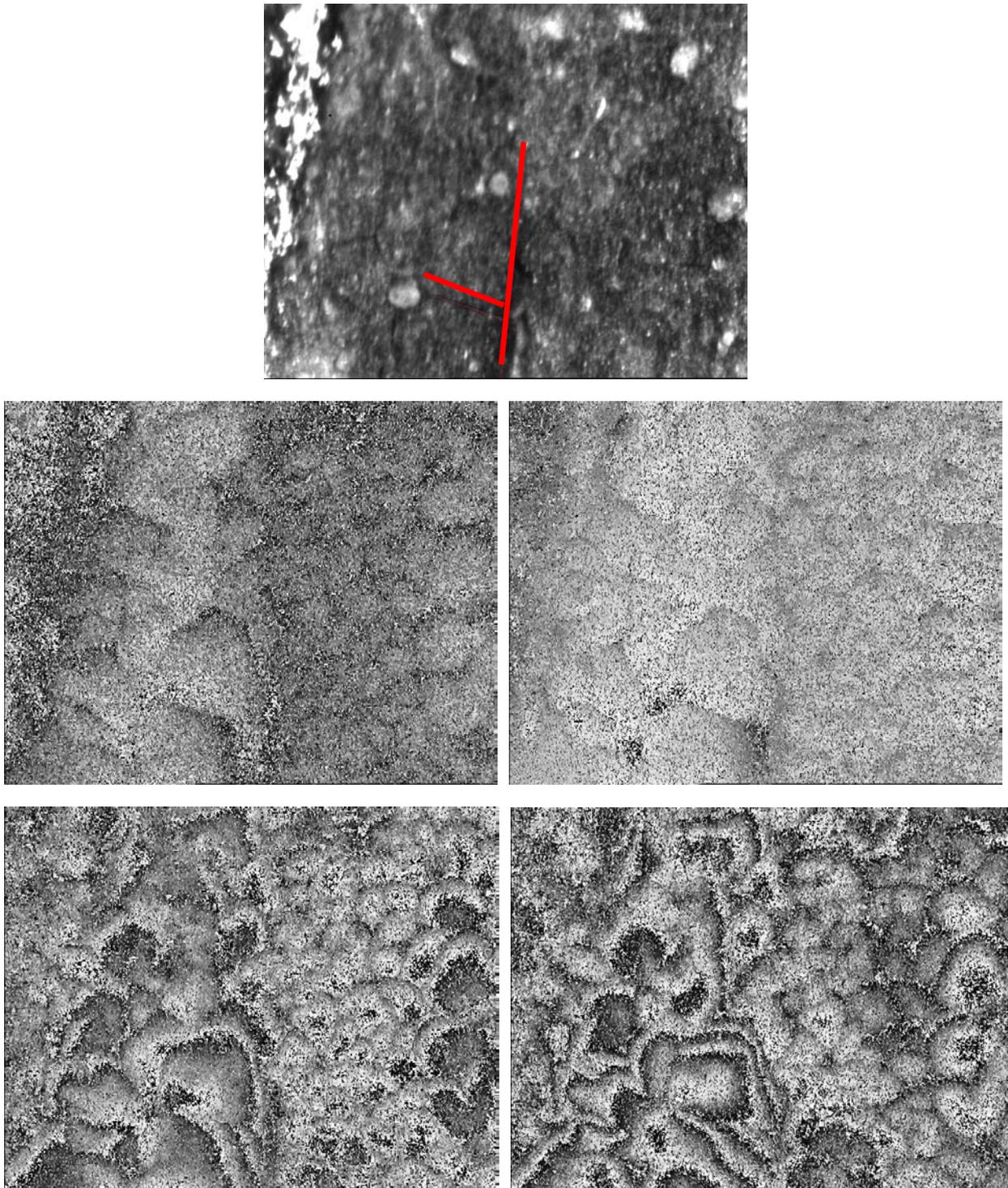


Abb. 2.19: Oben: Weißlichtaufnahme des Untersuchungsbereichs auf F011/98. Darunter: Sägezahnbild bei einer Feuchtigkeitserhöhung von: Mitte links: 38 % r.F. auf 50 % r.F. Mitte rechts 50 % r.F. auf 60 % r.F. Unten links 60 % r.F. auf 70 % r.F. und unten rechts 70 % r.F. auf 79 % r.F.

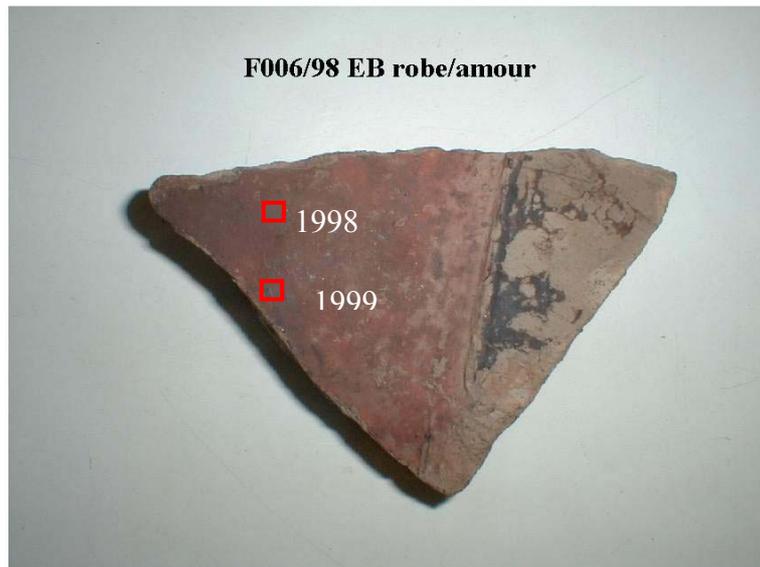


Abb. 2.20: Farbfoto von Fragment F006/98. Durchmesser des Fragments ca. 7 cm. Eingezeichnet sind die Messbereiche von 1998 und 1999.

2.5.2.2 F006/98

Eine weitere Messung, an dem ebenfalls mit HEMA gefestigten Fragment F006-98, dem Teil einer Robe, zu sehen in Abb. 2.20, auf der rot pigmentierten Schicht, zeigt bei einer Feuchteänderung von 62 % r.F. auf 72 % r.F., dargestellt in Abb. 2.21, ein sehr ähnliches Verhalten wie F011/98. Die Verformungsstrukturen haben wieder einen Durchmesser von ca. 200 μm . Die Unterbereiche sind aber weniger stark voneinander abgegrenzt. Auch ist die Verformung mit ca. 300 nm nicht so ausgeprägt wie bei der vergleichbaren Messung an Fragment F011/98, dargestellt in Abb. 2.19 Mitte links, bei einer Feuchtigkeitsänderung von 60% r.F. auf 70% r.F. Die Vermutung liegt nahe, dass die Bewegungen vom Grundierungslack stammen und die rote Pigmentschicht eine Art Puffer bildet. Eine Ausnahme macht hier der um die Pfeilspitze liegende Bereich. Mit der Pfeilspitze ist hier ein Loch in der Probe markiert. Die Verformungen um dieses Loch betragen bis zu 1 μm . Die Sägezahnstreifen haben hier eine Breite von ca. 50 μm auf dem Objekt. Die ist ca. das doppelte der minimal detektierbaren Streifenbreite von 25 μm , wie sie sich nach der Abschätzung in Kapitel 2.3 berechnen lässt, wenn davon ausgegangen wird, dass mindestens 5x5 Speckle zu einer Verformungsdetektion beitragen müssen.

Die Streifen lassen sich noch sehr gut erkennen. Bei Austrocknung fängt die Lackschicht am Rande des Lochs an sich aufzurollen. Es ist wahrscheinlich, dass der Lack hier schon seine Haftung zum Untergrund verloren hat.

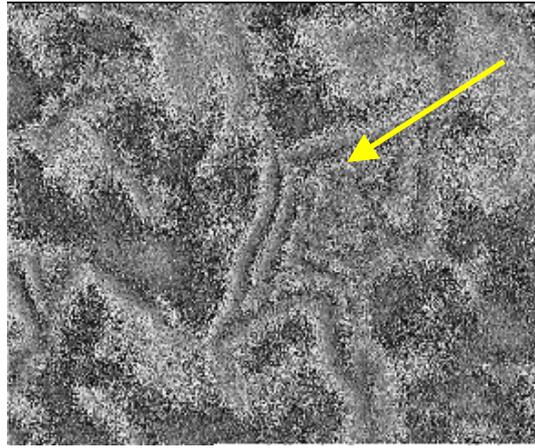


Abb. 2.21: Sägezahnbild gemessen 1998 an F006/98 bei einer Feuchtigkeitserhöhung von 62 % r.F. auf 72 % r.F. Der gelbe Pfeil markiert ein Loch in der Lackschicht.

2.5.2.3 F007/98

Neben diesen Untersuchungen an mit HEMA gefestigten Fragmenten wird auch an dem mit PEG/PU gefestigtem Fragment F007/98, zu sehen in Abb. 2.22, dem Teil eines Brustpanzers gemessen. Die Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer wird innerhalb von 30 min. von 85% r.F. auf 33% r.F. abgesenkt. Ein Ausschnitt aus der Messung ist in Abb. 2.23 dargestellt. Es sind in dem Sägezahnstreifenbild keine Verformungen zu erkennen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass eine so große Dekorrelation, z.B. durch Mikroänderungen der Oberfläche wie Wasseranlagerung, aufgetreten ist, dass etwaig vorhandene Sägezahnstreifen nicht mehr zu erkennen sind. Eine simple Methode, um die Korrelation festzustellen, ist das Betrachten des Histogramms eines Sägezahnbildes. Wenn sich ein Objekt zwischen der



Abb. 2.22: Farbfoto von Fragment F007/98 (Durchmesser ca. 8 cm). Das Fragment besteht aus zwei Bruchstücken. Eingezeichnet ist der Messbereich von 1998.

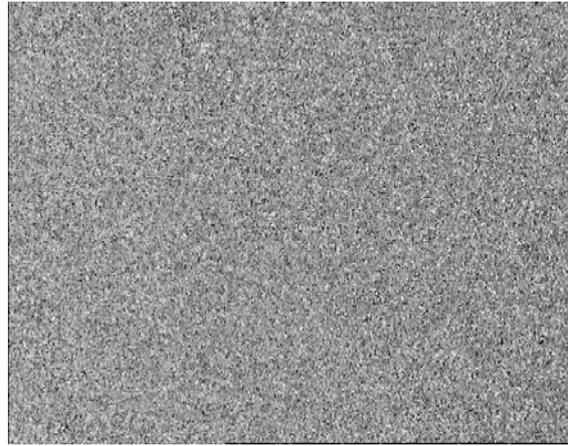


Abb. 2.23: Sägezahnbild gemessen 1998 an F007/98 bei einer Feuchtigkeiterniedrigung von 59 % r.F. auf 39 % r.F.

Aufnahme zweier Interferogramme nicht verändert hat, so sollte das dazugehörige Sägezahnstreifenbild einen konstanten Grauwert aufweisen. Im Idealfall sollte das gesamte Bild schwarz sein, da ohne Veränderungen des Objektes die Phasenlage im Specklemuster gleich bleiben sollte und somit eine Subtraktion der Phasenkarten an jedem Punkt zu dem Wert Null führen sollte. Meistens ist aber ein leichter Offset in der Phase durch Schwankungen im Aufbau zu beobachten. Hat sich das Objekt jedoch zwischen der Aufnahme stark verändert, so sollten die Phasen nun zufällig verteilt sein und somit alle Phasenwerte gleichmäßig im Sägezahnstreifenbild vertreten sein. In Abb. 2.24 sind drei Histogramme von verschiedenen Sägezahnstreifenbildern dargestellt. Abb. 2.24 a zeigt das Histogramm, das zu der hier gemachten Messung gehört. Es ähnelt stark dem Histogramm in Abb. 2.24 b, einem Histogramm von einer Messung mit einer sehr hohen Korrelation. In Abb. 2.24 c ist zum Vergleich das Histogramm von einer Messung mit einer sehr niedrigen Korrelation dargestellt. Damit ist sichergestellt, dass bei der Messung an Fragment F007-98 wirklich keine Deformationen stattgefunden haben. Es gibt jedoch einen anderen Grund, der die Festigung dieses Fragments ungenügend erscheinen lässt. Durch eine zu hohe Konzentration von PEG wirkt die Probe ölig und klebrig. Wenn eine Festigung mittels PEG/PU erfolgen soll, so muss die PEG-Konzentration gesenkt werden.

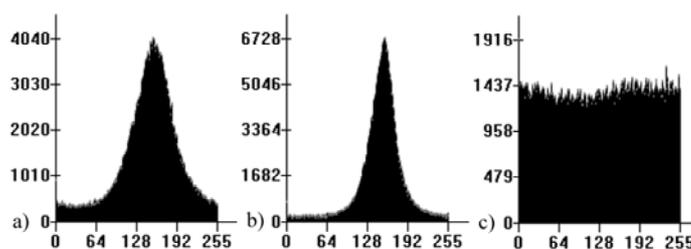


Abb.2.24: Histogramme von a) Abb. 2.23 b) einem gering dekorrelierten Sägezahnstreifenbild und c) einem stark dekorrelierten Sägezahnstreifenbild.

2.5.2.4 Fazit der ersten Messungen zur Beurteilung der Festigung

Es zeigt sich, dass eine Vergrößerung von $M = 6,4$ ausreichend ist, um die sich Verformenden Unterbereiche gut auflösen zu können. Die auftretende Gesamtverformung ist bei allen gefestigten Terrakotta-Fragmenten deutlich geringer, als sie es in Vormessungen an unbehandelten Terrakotta-Fragmenten war. Es zeigen sich an beiden mit HEMA gefestigten Fragmenten geringe Verformungen: im Bereich von wenigen μm , bei Fragment F011/98 bei Feuchtigkeitsänderungen von mehreren 10 % r.F. und von weniger als 1 μm an Fragment F006/98 bei einer Feuchtigkeitsänderung von 10 % r.F. Das Verformungsmuster bei beiden Fragmenten zeigt kleine zum Teil geschlossene Unterbereiche von einigen 100 μm Durchmesser bei visuell intakter Oberfläche.

An dem mit PEG/PU gefestigten Fragment F007/98 konnte gar keine Verformung bei Feuchtigkeitsänderung detektiert werden. Auch hier ist die Oberfläche visuell intakt, jedoch durch eine hohe PEG-Konzentration ölig wirkend.

2.5.3 Vergleichsmessungen nach einem Jahr

Nach den Messungen 1998 werden sämtliche Proben wieder nach China gebracht, kommen 1999 jedoch wieder nach Oldenburg und werden dort für weitere Messungen gelagert. Die Messungen vom Dezember 1998 werden zum Anlass genommen, einen Klimazyklus zu entwickeln, der reproduzierbare Messungen erlaubt. Es soll somit ermöglicht werden, das Langzeitverhalten der Proben zu untersuchen. Als Feuchtigkeitsbereich werden Werte verwendet, die auch in China im Laufe eines Jahres erreicht werden. Die Feuchtigkeit schwankt dort zwischen weniger als 30% r.F. und annähernd 100% r.F. Die Temperatur wird zur Vereinfachung bei einer normalen Raumtemperatur von 23 °C gewählt. Die zeitliche Änderung der Luftfeuchtigkeit wird so gewählt, dass die in der Klimakammer befindliche Lackschicht die Möglichkeit hat, der Änderung gut zu folgen. Jedoch wird nur bei der höchsten und bei der niedrigsten Luftfeuchte darauf geachtet, dass die Lackschicht auch wirklich in ein Gleichgewicht mit der umgebenden Luftfeuchtigkeit kommt, da gerade diese Extremwerte für die weiteren Betrachtungen wichtig sind. In Abb. 2.25 ist der typische Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Kleinklimakammer über der Zeit während einer Einzelmessung aufgetragen. Er ist für alle Messungen bis auf wenige Prozent gleich, um eine Reproduzierbarkeit der Messungen und damit einen Vergleich der Messungen untereinander zu ermöglichen. Die Bildaufnahme während einer Messung erfolgt ab jetzt einmal pro Minute. Ein Zeitabstand, der sich in den vorherigen Messungen als absolut ausreichend herausgestellt hat.

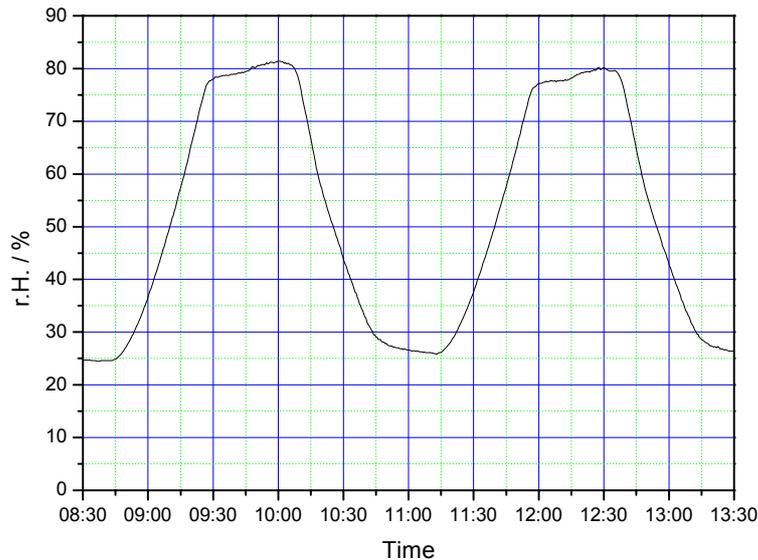


Abb. 2.25: Typischer Verlauf der relativen Feuchte in der Klimakammer während einer Messung.

2.5.3.1 F011/98

Der erwähnte Klimazyklus wird im Dezember 1999 seiner ersten Probe unterzogen. Erneut werden Messungen an Fragment F011/98 durchgeführt. Eine Auswertung dieser Messung ist in Abb. 2.26 zu sehen. Aufgetragen ist die Änderung der relativen Feuchte und dazu die absolut gemessene Verformung zerlegt in Abstände von jeweils drei Minuten. Hierfür werden die Bilder miteinander verrechnet, die drei Minuten auseinander liegen. Bei einem Bildabstand während der Aufnahme von einer Minute wird somit Bild 1 mit Bild 4 verrechnet. Damit die Auswertung lückenlos verläuft muss im nächsten Schritt Bild 4 mit Bild 7 verrechnet werden. Für jedes so errechnete Sägezahnbild wird nun die in dem Bild auftretende mittlere Verformung bestimmt, indem über die Anzahl der dargestellten Sägezahnstreifen an ca. 10 Unterbereichen gemittelt wird. Die Verformung der einzelnen Bilder wird aufaddiert. Kehrt sich die Farbabfolge in den Sägezahnbildern um, was einer Umkehr der Verformung entspricht, so werden diese Verformungen wieder abgezogen. Die Verformung selber wird in Mikrometern angegeben. Die Angabe der absoluten Verformung für eine Messung ergibt sich aus dem Mittel zweier Feuchtigkeitszyklen. Die Abweichung der maximalen Verformung zwischen den beiden Zyklen beträgt ca. $0,5 \mu\text{m}$. Es ist zu erkennen, dass die Verformung der Feuchtigkeitsänderung leicht hinterherläuft. In den Extrempunkten wird jedoch ein Gleichgewicht mit der Umgebungsfeuchte erzielt. Wenn im Weiteren von auftretender Verformung gesprochen wird, so ist diese immer auf die vorher beschriebene Art ausgewertet worden. Sägezahnstreifenbilder, die zu den Messungen gezeigt werden, sollen einen Eindruck über das Aussehen der Verformungen geben, sind aber nur ein Ausschnitt aus der Messung. Die angegebenen Feuchtigkeiten beziehen sich auf die zu der Zeit gemessene Feuchtigkeit in der Klimakammer und nicht auf den Feuchtegehalt der Lackschicht.

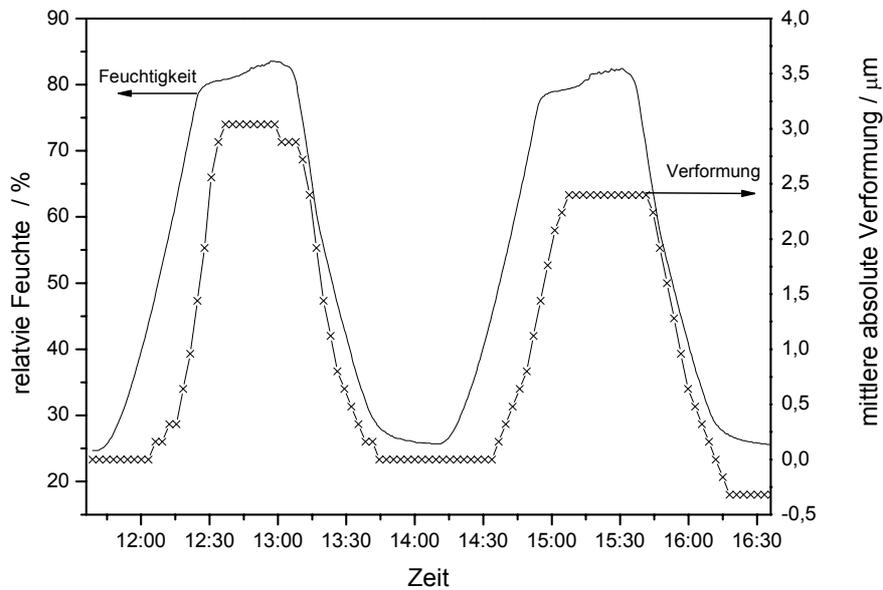


Abb. 2.26: Feuchtigkeitsänderung in der Klimakammer als durchgezogene Linie und zugehörige mittlere absolute Verformung der Probe F011/98 als Symbol, für jeden Messwert dargestellt.

Ein typisches Sägezahnstreifenbild aus der Messung an F011/98 ist in Abb. 2.27 dargestellt. Es wird innerhalb des in Abb. 2.17 mit A markierten Bereichs eine ca. 1 mm² große Fläche betrachtet. Wie auch bereits in den Messungen des Vorjahres werden schüsselartige Verformungen festgestellt, wobei sich die Strukturen jedoch deutlicher und klarer abgegrenzt haben. Die Bewegungen sind reversibel, wie in Abb. 2.26 zu sehen ist, d.h., die Verformungen, die während eines Trocknungsvorgangs erzeugt werden, verlaufen während der Befeuchtungsphase rückwärts. Die Stärke der maximalen Verformung beträgt rund 3 μm zwischen Schüsselmitte und Schüsselrand und ist somit etwa um den Faktor 2 bis 3 größer als in der Vorjahresmessung. Im Lichtmikroskop ist zu diesem Zeitpunkt ein Rissystem, dargestellt in Abb. 2.27 rechts, und demzufolge eine Unterbereichsstruktur zu erkennen, wie es sich bereits in den Verformungsmessungen von 1998 angedeutet hat. Ein Vergleich mit dem Sägezahnbild zeigt, dass das Rissystem und das Verformungsmuster gut miteinander übereinstimmen.

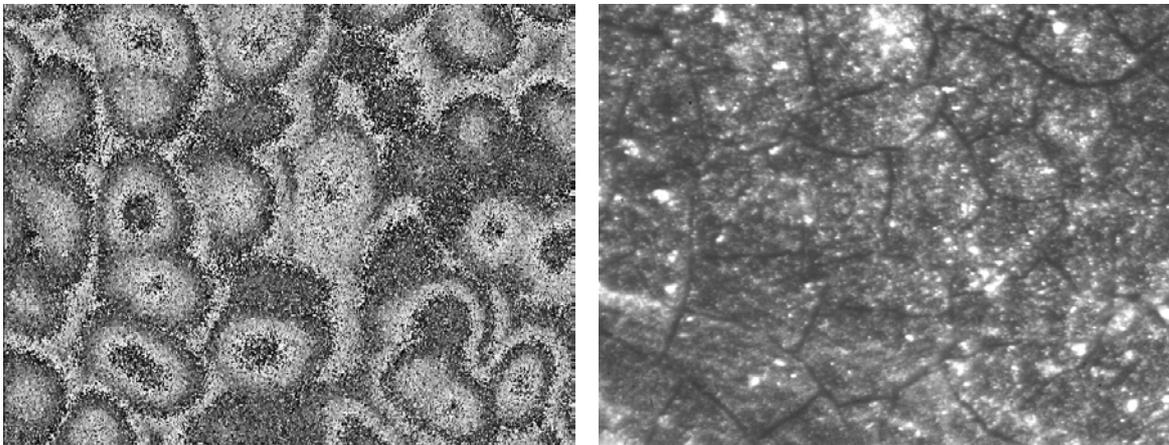


Abb. 2.27: Links: Sägezahnbild als Ausschnitt der in Abb. 2.26 dargestellten Messung. Rechts: Lichtmikroskopaufnahme des selben Bereichs auf der gleichen Probe.

2.5.3.2 F006/98

Messungen an Fragment F006/98, durchgeführt im Dezember 1999 im Bereich der roten Farbfassung, zeigen ein sehr ähnliches Verformungsverhalten wie bereits am Fragment F011/98 gemessen. Es zeigen sich in Abb. 2.28 links, einem exemplarischen Ausschnitt aus der Messung, schüsselförmige Verformungsgebiete mit 100 – 200 µm Durchmesser. Eine Auswertung der gesamten Messung ergibt eine maximale Verformung von 3 µm. Auch hier hat sich ein craqueléartiges Rissystem, wie es in Abb. 2.28 rechts unter dem Lichtmikroskop zu sehen ist, gebildet. Die Dämpfung der Bewegung durch die rote Farbfassung, wie sie 1998 vermutet wurde, kann nicht bestätigt werden. Mit Auftreten des Rissystems, auch in der roten Farbfassung, ist die auftretende maximale Verformung in der gleichen Größenordnung wie sie an Fragment F011/98 direkt auf dem Lack gemessen wird.

2.5.3.3 F012/98

Das Fragment F012/98, dargestellt in Abb. 2.29, wurde so mit PEG/PU behandelt, wie es derzeit in China auch tatsächlich an den ausgegrabenen Figuren praktiziert wird. Das Fragment hat ursprünglich mit dem HEMA-gefestigten Fragment F011/98 eine Einheit gebildet und kann daher aufgrund des vergleichbaren Farbschichtaufbaus für einen direkten Vergleich der beiden Konservierungsverfahren herangezogen werden.

Die mikroskopische Betrachtung dieses Fragments lässt einige wenige Risse erkennen. Die Verformungsmessungen 1999 ergeben im Bereich der Risse starke Verformungen, die bis zu 10 µm betragen. Es bewegt sich meist nur eine Seite vom Riss. Die deutlichen Bewegungen sprechen dafür, dass es sich hier zum Teil schon um Ablösungen handelt. In den Bereichen, die keine Risse aufweisen, können keine messbaren Bewegungen festgestellt werden. Exemplarisch ist der Ausschnitt aus einer Messung in Abb. 2.30 dargestellt. Nur in der Nähe

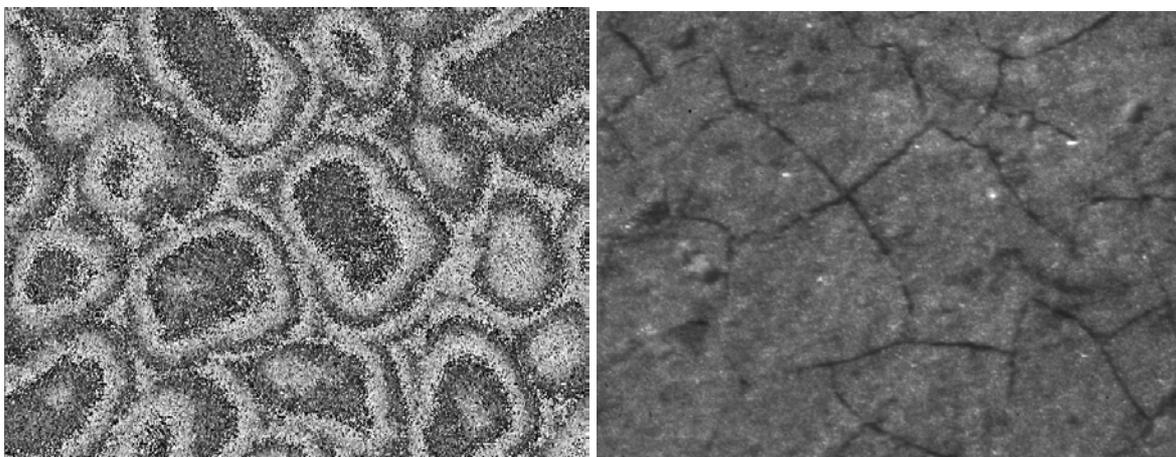


Abb. 2.28: Links: Ausschnitts aus der Messung an F006/98. Dargestellt ist das Sägezahnbild bei einer Feuchtigkeitserhöhung in der Klimakammer von 60 % r.F. auf 65% r.F. Rechts: Lichtmikroskop-aufnahme des selben Bereichs auf der gleichen Probe.

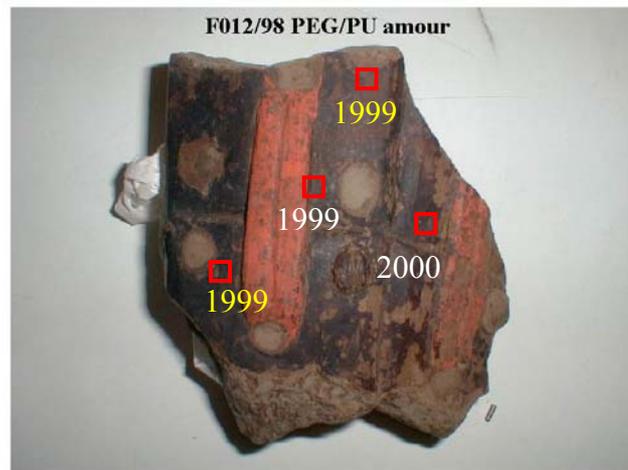


Abb. 2.29: Farbfoto von Fragment F012/98 (Durchmesser ca. 7 cm). Eingezeichnet sind die Messbereiche von 1998, 1999 und 2000.

des eingezeichneten Risses sind Verformungen zu erkennen. Die Verformungen treten auch hier nur auf einer Seite des Risses auf, woraus sich schließen lässt, dass sich nur diese Seite vom Untergrund gelöst hat.

2.5.3.4 Fazit der Vergleichsmessungen

Ein Jahr nach den ersten Mikroskop-ESPI-Messungen hat sich gezeigt, dass die mit HEMA gefestigten Proben ein craqueléartiges Rissystem ausbilden. Eine Erklärung für diese Reaktion liegt in den Eigenschaften des Festigungsmittels. Nach Auskunft eines Chemikers des BLfD weist HEMA bei Feuchtigkeitsaufnahme eine Volumenvergrößerung auf. Da das HEMA sehr dünn aufgebracht wird, ist nicht so sehr mit einer Quellung und somit mit einer

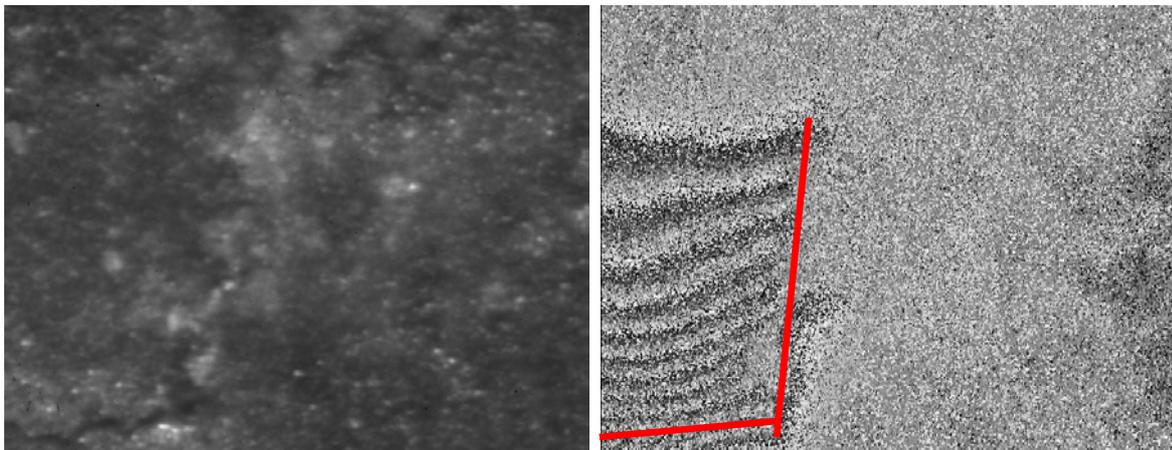


Abb. 2.30: Links: Weißlichtbild des untersuchten Bereichs auf F012/98. Rechts: Sägezahnbild bei einer Feuchtigkeiterniedrigung von 46 % r.F. auf 40 % r.F. während der Messung. Rot eingezeichnet ist der Verlauf eines Risses in der Lackschicht.

Verdickung der Schicht zu rechnen, sondern eher mit einem Auftreten von Spannungen innerhalb der Schicht. Diese Spannungen können zu einem Zerreißen führen. Die Vermutung ist jedoch, dass sich nach dem Zerreißen die Spannungen legen und die auftretenden Verformungen somit kleiner werden. Um diesen Effekt zu überprüfen, wird das mit HEMA gefestigte Fragment mit der Bezeichnung F011/98 und zum Vergleich das PEG/PU-gefestigte Fragment F012/98 einer Langzeitbehandlung unterzogen.

2.5.4 Messungen zum Langzeitverhalten der Festigungsmethoden

Es werden hierbei etwa 50 Feuchtigkeitszyklen innerhalb einer Zeitperiode von 12 Tagen erzeugt. Die Zyklen selber haben die Aufgabe, die Proben innerhalb dieser kurzen Zeit einem möglichst hohen Stress auszusetzen. Hierfür wird die Feuchtigkeit zwischen ca. 30 % r.F. und 90 % r.F. variiert, wobei die Verweilzeit an den Extrempunkten unterschiedlich lang ist. Es soll somit ein rein periodisches Verhalten vermieden und somit die Auswirkung auf die Proben maximiert werden.

Gemessen wird nicht an den selben Stellen wie bei den vorhergehenden Messungen, da in unmittelbarer Nachbarschaft der Verformungsmessungen eine Probenentnahme für rasterelektronenmikroskopische (REM) Untersuchungen erfolgen soll, die Fragmente hierfür jedoch nur minimal beschädigt werden dürfen. Es wird jeweils in den in Abb. 2.17 und Abb. 2.29 gelb beschrifteten Bereichen „1999“ gemessen. Zu Beginn der Langzeitbelastung wird auf jedem Fragment an diesen zwei unterschiedlichen Stellen eine Verformungsmessung durchgeführt. Nach der Langzeitbelastung der Fragmente werden wiederum Verformungsmessungen an exakt den gleichen Stellen durchgeführt. Die Stellen werden hierfür bei unterschiedlichen Vergrößerungen aufgenommen, um eine Repositionierung zu ermöglichen.

Eine Messung an Fragment F011/98 nach der Langzeitbehandlung ist in Abb. 2.31 dargestellt. Es zeigt sich eine mittlere Verformung von ca. 5µm. Vor der Messung lag die gemessene Verformung an dieser Stelle noch bei ca. 3µm. Das gleiche Verhalten ist auch an der zweiten Messstelle zu erkennen. Hier lagen die Verformungen zu Beginn etwas niedriger bei ca. 2,5 µm und stiegen dann auf ca. 4 µm an. Es sind wieder schüsselartige Verformungen zu erkennen. Nach der Langzeitbelastung ist die Mobilität dieser Schüsseln somit etwa um das 1,5-fache angestiegen. Es hat sich somit eine signifikante Zunahme der Mobilität der einzelnen Untergebiete des Lackes ergeben. Die Hoffnung, dass durch die Bildung des Craquelémusters ein Spannungsabbau eingetreten ist, der ein weiteres Anwachsen der Verformungen verhindert, hat sich demnach nicht bestätigt.

Die gleichzeitig durchgeführten Messungen an F012/98 haben hier dazu geführt, dass sich deutlich mehr Risse ausgebildet haben. Im Lichtmikroskop ist zu erkennen, dass es im Bereich dieser Risse zu Ablösungen gekommen ist, wobei sich in vielen Fällen die oberste

Lackschicht von der unteren Schicht gelöst hat. An wenigen Stellen hat sich auch die untere Lackschicht von der Terrakotta gelöst.

Die ESPI-Messungen zeigen, dass bereits vor dem 50-fachen Feuchtewechsel abgelöste Schollen durch die Klimabeeinflussung an Mobilität um etwa den gleichen Faktor von 1,5 wie die mit HEMA behandelten Proben zunehmen. Stellen, die vor dem 50-fachen Feuchtewechsel keine Deformationen zeigen, tun dies auch nicht nach dem Feuchtewechsel. Während der Feuchtevariation in der Klimakammer zeigt sich aber noch ein anderes Phänomen der mit PU/PEG gefestigten Fragmente. Es handelt sich dabei um die Bildung von Tröpfchen bei höheren Luftfeuchten ab etwa 65 % r.F. Diese Tröpfchen entstehen sehr ungleich verteilt auf der Lack-Oberfläche, wobei derzeit kein systematischer Zusammenhang mit den topographischen Eigenschaften der Oberfläche erkennbar ist. Die Untersuchungen am Kryo-REM bei der MPA in Bremen haben ergeben, dass diese Tröpfchen auch das Konservierungsmittel PEG beinhalten. Es hat sich somit gezeigt, dass das Konservierungsmittel zumindest teilweise sehr mobil bleibt und aus dem Material austreten kann. Die Auswirkung dieser Tröpfchenbildung und die damit einhergehende Verdünnung des Konservierungsmaterials sind derzeit noch nicht geklärt.

2.5.5 Fazit der Mikroskop-ESPI-Untersuchungen an original Fragmenten

Die Messungen an mehreren mit HEMA behandelten Proben und die visuelle Beurteilung durch das Mikroskop haben ergeben, dass der Zustand der Farbschichten bereits ein Jahr nach der Konservierung deutlich schlechter ist. Es hat sich auf allen Proben ein craqueléartiges Rissystem ausgebildet, welches zu einer vergrößerten Mobilität der einzelnen Unterbereiche

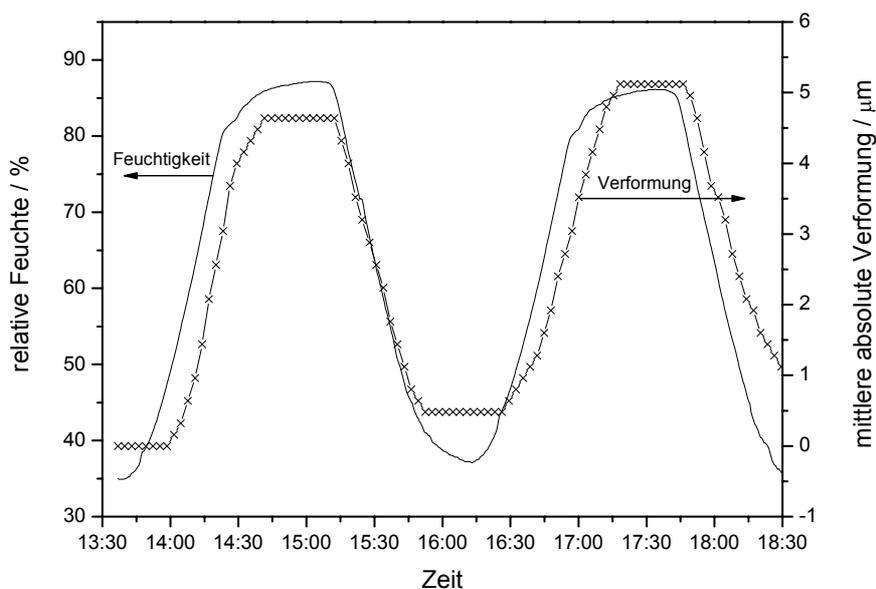


Abb. 2.31: Messung an der Probe F011/98 nach der Langzeitbelastung. Die Feuchtigkeitsänderung in der Klimakammer ist als durchgezogene Linie und zugehörige mittlere absolute Verformung als Symbol, für jeden Messwert dargestellt.

geführt hat. Die Hoffnung, dass mit der Entstehung des Rissystems eine Beseitigung des Spannungszustandes im Lack einhergegangen ist, kann aus den ersten Langzeitbeeinflussungen leider nicht bestätigt werden. Bereits nach etwa 50 Trocken-Feucht-Zyklen ergab sich eine weitere Mobilitätssteigerung um etwa den Faktor 1,5.

Zusätzlich hat sich eine weitere visuell beobachtbare Veränderung eingestellt. An Fragment F011/98 haben sich kleine „Vulkane“ gebildet, aus denen eine später erstarrte Flüssigkeit ausgetreten ist. Diese Krater befinden sich vor allem in einem Gebiet auf der schwarzen Grundierungsschicht, das in Abb. 2.17 eingezeichnet ist. Das Auftreten dieser „Vulkane“ ist nach Messungen im BLfD auf das Austreten von nicht gehärtetem HEMA zurückzuführen.

Eine positive Ausnahme bildet das Fragment F005/98, das bisher kein Craquelé und auch keine „Vulkane“ aufzeigt. Die in Abb. 2.33 gezeigten Messungen vom August 2000, an dem in Abb. 2.32 dargestellten Fragment F005/98, einer Hand, an einem Stück freiliegender Grundierung, zeigen keine Schlüsselstruktur. Die Oberfläche ist in einem sehr guten Zustand. An einer Stelle, an der ein kleiner Defekt in der Oberfläche erkennbar ist, treten leichte Verformungen auf.

Es scheint also die Möglichkeit zu bestehen, eine Festigung mit HEMA zu erreichen, ohne, dass ein Craquelé auftritt. Wichtig hierfür ist, die Eigenheiten von F005/98 festzustellen.



Abb. 2.32: Farbfoto von Fragment F005/98. Durchmesser des Fragments ca. 9 cm. Eingezeichnet ist der Messbereich von 2000.

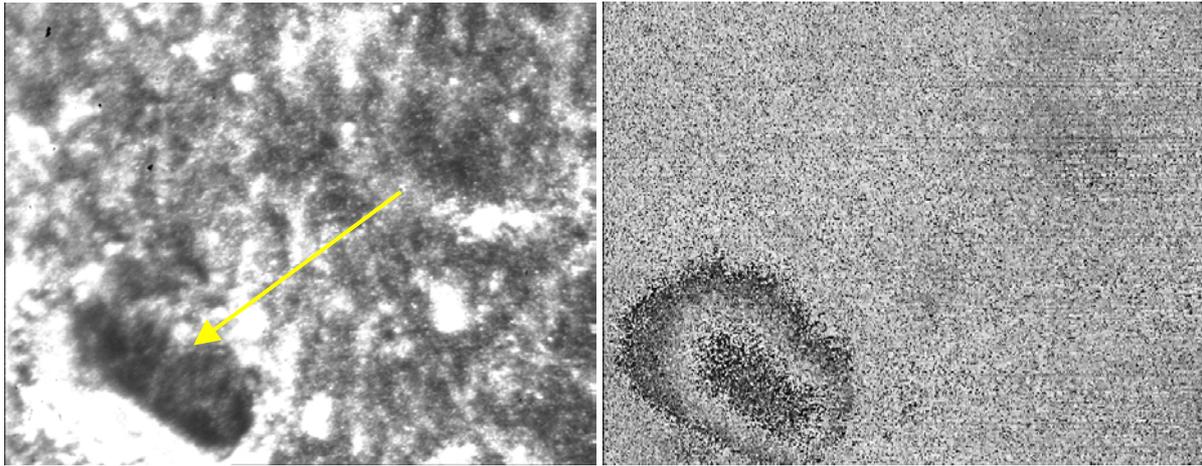


Abb. 2.33: Links: Weißlichtbild des untersuchten Bereichs. Der gelbe Pfeil markiert den Defekt in der Oberfläche. Rechts: Ausschnitt aus der Messung, Sägezahnbild bei einer Feuchtigkeitserniedrigung von 70 % r.F. auf 68 % r.F.

Es bleibt zu erwähnen, dass es Fragmente gibt, die schon während der Festigung ein Rissystem aufzeigen, das mit bloßem Auge zu erkennen ist. Dieses sind Schrumpfungsrisse, die bei fehlerhafter Anwendung des Festigungsmittels entstehen, weshalb auf diese Fragmente nicht weiter eingegangen wird.

Die Verformungsuntersuchungen an mit PEG/PU gefestigten Fragmenten haben gezeigt, dass es keine messbare Verformung gibt, solange die Oberfläche zusammenhält. Ist aber der Lack eingerissen, kommt es zu Ablösungen, deren Verformungen meist größer als die im Falle der mit HEMA behandelten Fragmente sind.

Bei einer relativen Feuchte von mehr als 65 % bilden sich in einzelnen Bereichen kleine Tröpfchen auf der Oberfläche, die beim Trocknen wieder verschwinden.

Es bleibt anzumerken, dass es mit PEG/PU gefestigte Proben gibt, die keinerlei Deformationen auf Feuchtigkeitsänderungen zeigen. Bei diesen Proben ist die PEG-Konzentration jedoch so hoch, dass das Fragment klebrig und ölig wirkt, weshalb diese Proben nicht weiter betrachtet werden.

2.6 Diskussion

2.6.1 Mikroskop-ESPI

Das hier vorgestellte Mikroskop-ESPI-System zeigt sich zusammen mit der eingesetzten Klimakammer als geeignet, Messungen durchzuführen, die die Beurteilung von Festigungsmethoden an den farbigen Terrakotta-Fragmenten ermöglichen. Die Auflösung ist ausreichend, die kleinen Verformungsgebiete untersuchen zu können. Besonders der Einsatz

eines räumlichen Phasenshifts hat sich bewährt, um auch schnelle Veränderungen der Untersuchungsobjekte aufzeichnen zu können. Eine weitere Erhöhung der Auflösung, die zur formatfüllenden Betrachtung z.B. eines einzelnen Verformungsgebiets benötigt würde, ist nicht durch eine reine weitere Vergrößerung zu realisieren. Gleichzeitig müsste entweder die NA weiter erhöht werden oder, wenn dies nicht mehr möglich ist, eine kleinere Wellenlänge gewählt werden. Bei all diesen Schritten bleibt zu berücksichtigen, dass eine Erhöhung des Abbildungsmaßstabs M auch eine Verstärkung des Problems der Dekorrelation bei Ganzkörperverschiebung mit sich bringt. Zur Zeit werden Arbeiten von Akram El Jarad in der Arbeitsgruppe AOP durchgeführt, bei der die laterale Auflösung des Mikroskop-ESPI-Systems noch einmal deutlich gesteigert werden soll. Hierfür wird ein Mikroskopobjektiv mit einer NA von ca. 0,4 verwendet. Außerdem soll die Wellenlänge des verwendeten Lichts auf unter 500 nm reduziert werden. Dies bedeutet, dass beide möglichen Wege der Auflösungserhöhung sowohl über die Wellenlänge als auch über die Numerische Apertur ausgenutzt werden.

2.6.2 Alterscraquelé an Terracottafragmenten: die Rolle der Schichtungen

Die Messungen an den Original-Terrakotta-Fragmenten ergeben, dass bei den Konservierungsmethoden deutliche Fortschritte gemacht werden. Dennoch bleiben messbare Verformungen, deren Langzeitverhalten noch nicht abschließend geklärt ist. Wichtig für eine weitere Verbesserung der Konservierungsmethoden wäre, für die Festigungsmethode mit PU/PEG eine Möglichkeit festzustellen, wie genau die Festigungswirkung des PU ist, indem z.B. festgestellt wird, an welchen Stellen es den Lack an der Terrakotta festklebt. Weiterhin ist die Mobilität des PEG zu klären. Das Auftreten der Tröpfchenbildung zeigt, dass das PEG die Möglichkeit hat, die Terrakotta und damit auch die Lackschichten wieder zu verlassen. Wenn bei jeder Feuchtigkeitserhöhung PEG austritt aber bei einer Feuchtigkeitserniedrigung nicht das gesamte PEG von der Lackschicht wieder aufgenommen wird, so würde es mit der Zeit zu einer verminderten Festigungswirkung kommen. Besteht lokal keine genügende Fixierung des Lacks durch PU auf der Terrakotta und ist an dieser Stelle gleichzeitig nicht genügend PEG vorhanden, um den Lack am Schrumpfen durch Austrocknung zu hindern, so kann es zu neuen Rissen kommen.

Für die Festigungsmethode mit gehärtetem HEMA wäre eine genaue Kenntnis des Mechanismus, der zu der beobachteten Schüsselbildung führt, von wesentlichem Vorteil. Es ist deshalb notwendig, sich mit dem Mechanismus der Schüsselbildung genauer auseinander zu setzen. Einer Untersuchung zur Schüsselbildung an Gemälden [Sch90] ist Folgendes zu entnehmen:

Alterscraquelé und Schüsselbildung sind zwei eng miteinander verbundene Erscheinungen, die häufig an Malschichten beobachtet werden. Ein erstes zweidimensionales Modell geht davon aus, dass jede Sprungbildung auf eine Schwäche im Gesamtgefüge zurückzuführen ist. Die Aufwölbung des zerrissenen Films entsteht durch Bewegungen des darunter liegenden, elastischen Bildträgers. Grundlage hierfür sind 2-D-Spannungsmodelle. Messungen zeigen jedoch, dass das Aufwölben der Craqueléränder nicht grundsätzlich mit der Schüsselbildung gleichzusetzen ist.

Die Schüsselbildung ist klimabedingt. Sie geht bei Sorption und Desorption mit großen inneren Kräften einher. Ursache sind keine äußeren Spannungen, wie z.B. das Spannen der Leinwand auf einen Rahmen, sondern in der Struktur freiwerdende Kräfte. Die Farbe ist aktiv, der Bildträger passiv. Das Craquelé hingegen entsteht durch unterschiedliche Spannungszustände zwischen Malschicht und Grundierung. Diese treten auf, wenn äußere Kräfte auf die Malschicht wirken. Reißt die Malschicht ein, bildet sich ein Craquelé, dessen Ränder sich leicht aufwölben. Mit Auftreten des Craquelé lösen sich diese Spannungen und es wird ein stabiler Zustand erreicht. Im Gegensatz zur Schüsselbildung ist dieses Aufwölben nicht reversibel. Meist liegt eine Kombination beider Phänomene vor. Zur Erklärung der bei der Schüsselbildung auftretenden inneren Kräfte wird ein 3-D-Modell benötigt. Bei Feuchtigkeitsänderung erfolgt diese nicht sofort über das gesamte Volumen, sondern immer erst von der Kontaktfläche in das Volumen. Hierdurch kommt es zu Spannungen zwischen den bei Sorption schon gequollenen und den tiefer liegenden, noch nicht gequollenen Schichten. Bei Desorption ist die auftretende Spannung zwischen der oberen, geschrumpften und der tiefer liegenden, noch gequollenen Schicht noch größer. Der Effekt ist mit dem Prinzip des Bi-Metalls vergleichbar, zu sehen in Abb. 2.34. Bei gealterten Filmen, die schon eine Rissstruktur aufweisen, ist der Effekt einer Feuchtigkeitsänderung noch viel schwerwiegender. Die Risse in der Struktur sind Vorzugsfehlstellen. Die Feuchtigkeit schlägt sich fast ausschließlich im Randbereich der Sprünge nieder und hat hier von der Seite her direkten Zugang zu allen Schichten. Die Farbschichten quellen an den Rissen deutlich schneller. Bei einem craqueléartigen Rissystem kommt es somit zu einem Aufrollen der

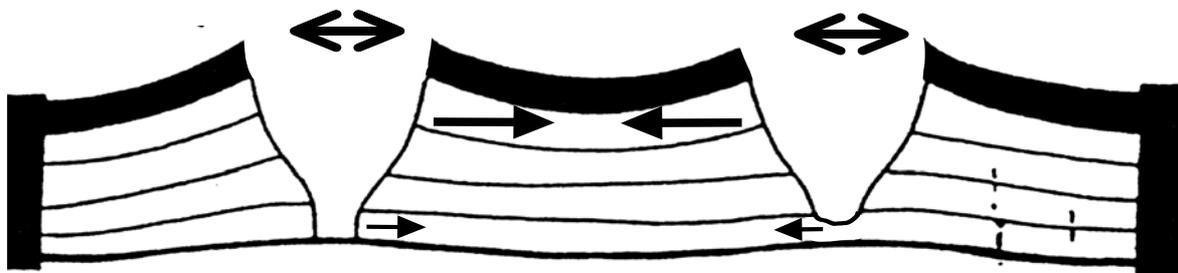


Abb. 2.34: Schnitt durch eine Malschicht, die ein Craquelé bildet. Die oberen Schichten können auf Feuchtigkeitsänderungen deutlich schneller reagieren als die untere Schicht. Diese unterschiedliche Mobilität führt zu Rissbildungen.

Craqueléränder, was zu einem Ablösen dieser Bereiche vom Untergrund und im fortgeschrittenen Stadium zum Ablösen einer einzelnen Farbscholle führen kann.

Ein Vergleich mit den auf der Terrakotta aufgetragenen Farbschichten zeigt eine große Ähnlichkeit zu einem Leinwandgemälde. Zwar bildet die Terrakotta keinen elastischen Bilduntergrund, die Bemalung selber besteht aber aus mehreren zum Teil komplett unterschiedlichen Schichten. Ein Querschnitt durch Fragment F011/98 ist in Abb. 2.35 dargestellt. Es ist eine zweischichtige, mit Rissen durchzogene Lackschicht auf einem festen Terrakotta-Untergrund zu erkennen. Es ist bei den mit HEMA gefestigten Fragmenten zu beobachten, dass eine Schüsselbildung vorhanden ist, die auf Sorption und Desorption reagiert. Nach dem Auftreten von craqueléartigen Rissen in der Struktur ist eine deutliche Zunahme der durch Feuchtigkeitsänderung erzeugten Bewegung der einzelnen Schüsseln zu erkennen. Es scheint sich hier aufgrund des zweischichtigen Aufbaus der Terrakotta um den gleichen Bi-Metall Effekt zu handeln, wie er an Leinwandgemälden für die Schüsselbildung verantwortlich gemacht wird.

Die an den Terrakotta-Fragmenten auftretenden Verformungen sind deshalb mit großer Wahrscheinlichkeit auf den Aufbau der Lackschichten zurückzuführen. Da je nach verwendeter Festigungsmethode andere Bewegungen auftreten, müssen sich die Festigungsmethoden unterschiedlich auf die Struktur der Lackschichten auswirken.

Verformungsmessungen in unterschiedlichen Tiefen innerhalb der Malschichten auf der Terrakotta könnten Rückschlüsse auf die inneren Kräfte zulassen. Wenn an der Oberfläche bei Feuchtigkeitsänderung eine stärkere Verformung bei Feuchtigkeitserhöhung gemessen wird als an tieferen Schichten, so wäre dies eine Bestätigung der Theorie aus [Sch90].

Eine schichtenselektive Meßmethode, die auch eine Darstellung der Struktur des Messobjektes in der Tiefe ermöglicht, hätte im Weiteren mehrere Vorteile. Zum einen können Untersuchungen zum Aufbau der Malschichten gemacht werden, ohne sie beschädigen zu

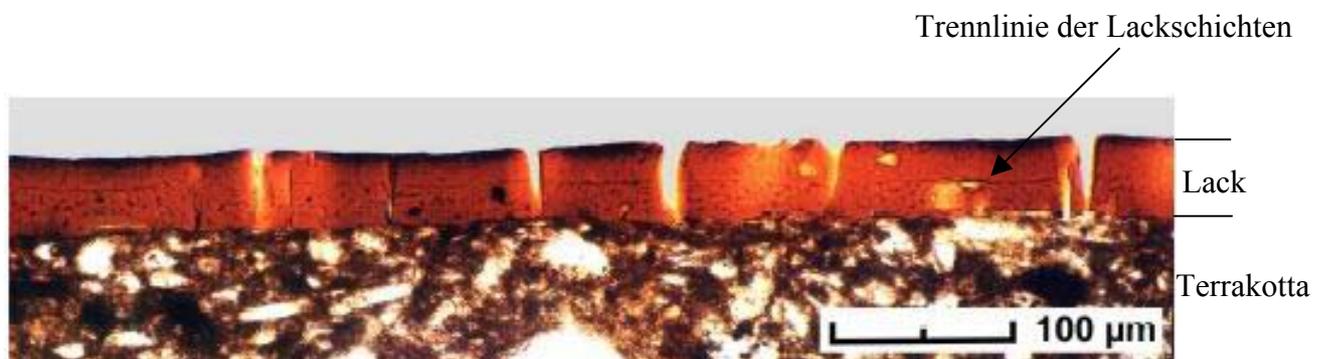


Abb. 2.35: Schnitt durch F011/98. Zu erkennen sind zwei ca. 20 – 30 µm Lackschichten, die fest mit der darunter liegenden Terrakotta verbunden sind. Die Lackschichten sind mit Rissen durchzogen.

müssen. Zum anderen könnte auch der Verbleib des PEG und das Wirken des PU untersucht werden.

Im nächsten Kapitel werden vor allem optische Meßmethoden vorgestellt, die eine zerstörungsfreie tiefenaufgelöste Strukturvermessung ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden genutzt, ein neues Verfahren zur schichtenselektiven Verformungsmessung zu entwickeln.

3 Weißlichtinterferometrie

In diesem Kapitel werden die Grundlagen kurzkohärenter Messmethoden vorgestellt. Im Gegensatz zur ESPI werden diese Verfahren verwendet, um Strukturen dreidimensional zu erfassen. Das zugrundeliegende Prinzip ist die Weißlichtinterferometrie, wie sie z.B. im Kohärenzradar [Häu92],[Häu98] zur Formvermessung von Oberflächen Verwendung findet oder in der OCT (Optical Coherence Tomographie) [Fuj93] genutzt wird, um durch das in ein Objekt eindringende Licht dessen innere Struktur aufzulösen. Die OCT ermöglicht die hochaufgelöste Querschnittsabbildung der inneren Mikrostruktur von technischen Materialien oder biologischem Gewebe. Grundlage hierfür ist, wie bei Ultraschalluntersuchungen, die Messung von Laufzeitunterschieden. Es wird das optische Echo gemessen. Michael Duguay führte dies erstmals 1971 vor. Er verwendete sehr schnelle Shutter basierend auf dem Kerr Effekt und fotografierte mittels einer stroboskopischen Anordnung Lichtpulse (light in flight). Wird ein Objekt mit einem Lichtpuls beleuchtet, so kann aus dem Laufzeitunterschied und der Intensität des reflektierten Lichts direkt auf die Struktur des Objektes geschlossen werden. Der Nachteil an der verwendeten Anordnung ist, dass sehr hohe Pulsenergien notwendig sind sowohl, um den Kerr Effekt nutzen zu können als auch eine genügende Beleuchtung für die Bildaufnahme zu gewährleisten. Eine Alternative sind die hier behandelten kurzkohärenten, interferometrischen Verfahren.

Kohärenzradar und OCT sind zwei grundsätzlich gleiche Verfahren. Der wesentliche Unterschied liegt in der Art der Auswertung der Signale. Einen guten Überblick über die zur Zeit gängigen Messverfahren und ihrer Grundlagen können [Fuj00] und [Tuch00] entnommen werden.

Es werden im Folgenden die einzelnen Systeme und ihre Grundlagen vorgestellt und Messungen an den Terrakotta-Fragmenten durchgeführt. Diese Messungen dienen als Grundlage für das weitere Vorgehen, schichtenselektiv Verformungen zu messen.

Zuerst wird auf das Kohärenzradar eingegangen, da sich die hier verwendeten Grundlagen auch bei der OCT wiederfinden.

3.1 Kohärenzradar

Der Aufbau eines einfachen Weißlichtinterferometers ist in Abb. 3.1 dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine Michelson Anordnung. Das Licht einer kurzkohärenten Lichtquelle, wie z.B. einer LED oder einer Superlumineszenzdiode (SLD), wird in zwei Strahlen, den Referenz- und den Beleuchtungsstrahl aufgespalten. Die Kohärenzlänge beträgt zumeist einige 10 μm . Das Grauglas dient zur Intensitätsanpassung zwischen Objekt- und

Referenzstrahl. Die zusätzliche Glasplatte im Objektstrahl dient zum Ausgleich der am Grauglas entstehenden Dispersion. Eine Behandlung des Einflusses der Dispersion auf die Kohärenzfunktion wird in Kap. 4.3.1 vorgenommen. Nachdem das Licht vom Untersuchungsobjekt reflektiert wird, werden beide Strahlen wieder zusammengeführt und das Bild mittels einer CCD-Kamera aufgezeichnet. Es kommt nur dann zu einer interferometrischen Überlagerung, wenn der Weglängenunterschied zwischen Beleuchtungs- und Referenzstrahl nicht größer als die Kohärenzlänge l_K des verwendeten Lichts ist. Da die Kohärenzlänge nur einige μm beträgt, muss die Möglichkeit bestehen, die Weglänge eines der Strahlengänge exakt variieren zu können.

Es bleibt anzumerken, dass es die Möglichkeit gibt, ohne bewegliche Teile im Referenzarm auszukommen, indem das Spektrum des Lichts betrachtet und daraus der Wegunterschied zwischen Objekt- und Referenzstrahl berechnet wird [Häu97], worauf hier nicht näher eingegangen wird.

Die Intensität I_P , die während der Änderung des Weglängenunterschieds Δl in einem Pixel zu messen ist, lässt sich einfach berechnen [FJ01]:

$$I_P = I_{\text{Ref}} + I_{\text{Obj}} + 2\sqrt{I_{\text{Ref}}I_{\text{Obj}}} \cdot \gamma_K(\Delta l) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l\right) \quad (3.1)$$

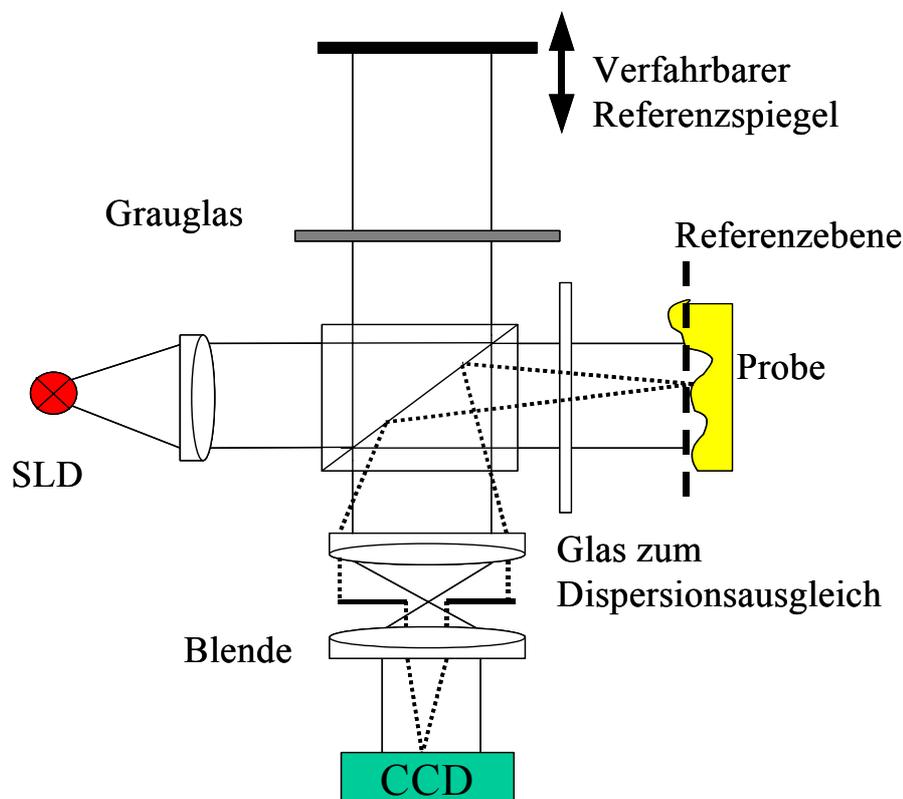


Abb. 3.1: Aufbau eines einfachen Weißlichtinterferometers.

mit

- $\gamma_K(\Delta l)$: Modulationsgrad, Kohärenzfunktion der Lichtquelle,
- $l\Delta$: Weglängenunterschied zwischen Objekt- und Referenzstrahl,
- λ_0 : Mittenwellenlänge der verwendeten Lichtquelle.

Diese Formel gleicht in ihrem Aussehen Gl. 2.9. Die Intensität I_p ändert sich hier cosinusförmig mit Δl . Ein wesentlicher Unterschied ist hier aber die Form des Modulationsgrads. In Gl. 2.9 wird von einer unendlich langen Kohärenzlänge ausgegangen. Hier wird nun von einer Lichtquelle mit gaußförmigem Spektrum und somit begrenzter Kohärenzlänge ausgegangen. Der Modulationsgrad ändert sich nun mit Δl :

$$\gamma_K(\Delta l) = \int_0^{\infty} S(\nu) e^{-i2\pi\nu\frac{\Delta l}{c}} d\nu. \quad (3.2)$$

Hierbei ist $S(\nu)$ das normierte Leistungsspektrum der Lichtquelle. Es ist einfach zu sehen, dass hier das Wiener-Khinchin-Theorem [FO93] gilt, welches besagt, dass die komplexe Kohärenzfunktion gleich der Fouriertransformierten des Leistungsspektrums ist. Unter der Annahme, dass das Leistungsspektrum gaußförmig ist, ergibt sich

$$\gamma_K(\Delta l) = \exp\left[-\left(\frac{\pi\Delta\nu}{2\sqrt{\ln(2)}\frac{\Delta l}{c}}\right)^2\right], \quad (3.3)$$

was wie zu erwarten wieder gaußförmig ist. Wird nun mit

$$\Delta\nu = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda_0^2}, \quad \text{für } \Delta\lambda \ll \lambda_0 \quad (3.4)$$

die Kohärenzlänge l_K bestimmt, in dem der Punkt gewählt wird, an dem $\gamma_K(\Delta l)$ auf $1/e$ ihres Wertes gefallen ist, so errechnet sich

$$l_K = 2 \cdot \frac{2\sqrt{\ln(2)}}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \approx \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}, \quad (3.5)$$

- $\Delta\lambda$: Halbwertsbreite des Leistungsspektrums.

Ist $\Delta l > l_K$, so ist $|\gamma_K(\Delta l)| < 1/e$. Dieser Wert wird zumeist für die Bestimmung der Kohärenzlänge angenommen. Er besagt aber nicht, dass die Kohärenz hier auf den Wert Null abgefallen ist.

Für eine Messung wird nun Δl kontinuierlich geändert, indem der Spiegel im Referenzstrahl schrittweise verschoben wird. Nach jedem Schritt wird ein Bild mit der CCD-Kamera aufgenommen. Diese Bilder werden dann für jeden Pixel einzelnen ausgewertet. Wird die Intensität in einem Pixel über den Weg, den der Referenzspiegel verfahren wird, aufgetragen, so ergibt sich ein Korrelogramm, wie es in Abb. 3.2 dargestellt ist. Das Maximum dieser Funktion ergibt sich für $\Delta l = 0$. Wenn davon ausgegangen wird, dass der Referenzspiegel absolut plan ist, dann kann die Topografie der im Objektstrahl befindlichen Probe gemessen werden. Wird für jeden Pixel die Positionen des Referenzspiegels, für den sich $\Delta l = 0$ ergibt aufgetragen, so ergibt sich das Topografiebild der im Objektstrahl befindlichen Probe. Die Genauigkeit, mit der die Topografie gemessen werden kann, hängt davon ab, wie genau sich $\Delta l = 0$ und damit das Maximum des Korrelogramms bestimmen lässt.

Betrachtet wird wieder das Korrelogramm in Abb. 3.2. Das Maximum der Modulation von I_p liegt bei $\Delta l = 0$. Beleuchtungs- und Referenzstrahllänge stimmen somit exakt überein. Es gibt drei wesentliche Methoden, die bei der Maximumsuche Verwendung finden [Häu98]:

1. Die Drei-Punkt-Gauss-Interpolation: Hier wird in Schritten kleiner als die Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle die maximale Intensität im Korrelogramm gesucht und dann ihre zwei benachbarten Punkte zur genauen Berechnung zu Hilfe genommen. Die Genauigkeit beträgt bei einem λ_0 von ca. 1000 nm und einer Schrittweite von ca. 200 nm 2,6 nm. Da das höchste Maximum im Korrelogramm nicht unbedingt das Maximum der Einhüllenden sein muss, ist ein Fehler von $\lambda/2$ möglich, wie er z.B. in Abb. 3.2 auftreten würde.
2. Die erweiterte Drei-Punkt-Gauss-Interpolation: Hier werden mit Methode 1 die fünf höchsten Modulationen gesucht und mit ihnen das Maximum der Einhüllenden des Korrelogramms bestimmt. Die Genauigkeit hier beträgt 6,4 nm. Der Fehler von $\lambda/2$, wie er bei Methode 1 auftreten kann, wird hier unterdrückt.
3. Bei der meist verwendeten Fourier-Methode werden zum Beschreiben des Korrelogramms 32 Punkte in 200 nm Schritten um das Maximum herum aufgenommen. Es wird eine Fouriertransformation durchgeführt. Dabei entstehen 2 Seitenbänder bei der Frequenz der verwendeten Lichtquelle, was hier der Modulationsfrequenz entspricht. Es wird ein Seitenband genommen und auf den Ursprung zurückgeschoben. Dann wird die Rücktransformation ausgeführt und das Maximum der Funktion bestimmt. Die Genauigkeit hier beträgt 4,4 nm. Diese Methode ist jedoch recht zeitintensiv. Sie ähnelt der in Kapitel 2 beschriebenen Fourier-Transformations-Methode FTM und kann dort genauer nachgelesen werden.

Die Genauigkeit des verwendeten Verfahrens hängt davon ab, wie gut das gemessene Korrelogramm ist. Gleich das gemessene dem idealen Korrelogramm aus Abb. 3.2, so kann mit hoher Genauigkeit ausgewertet werden. Am besten eignen sich hier Objekte die keine

Volumenstreuer sind. Das gesamte reflektierte Licht muss von der zu vermessenden Oberfläche kommen, da es sonst zu einer Überlagerung der Korrelogramme aus unterschiedlichen Tiefen kommt.

Wichtig für die Messung ist auch, ob die Struktur der betrachteten Oberfläche aufgelöst werden kann. Nur dann entspricht jeder Messwert exakt einem Punkt auf der Oberfläche. Kann die Höhenstruktur der Oberfläche nicht aufgelöst werden, so entstehen Speckle. Der jetzt detektierte Höhenwert entspricht dem Mittelwert des zu dem Speckle beitragenden Bereichs auf der Oberfläche. Ob die Fourier-Methode oder die erweiterte Drei-Punkt-Gauss-Interpolation Verwendung findet hängt davon ab, ob die Messgeschwindigkeit oder die Genauigkeit im Vordergrund steht.

Um die einzelnen Korrelogramme zu einem Höhenbild zusammensetzen, wird die Maximumsuche für jedes einzelne Pixel der Kamera durchgeführt und das dazugehörige Δl als z-Wert in das Bild eingetragen.

3.1.1 Messungen

Am Lehrstuhl für Optik am Zentrum für moderne Optik in Erlangen werden mit dem Kohärenzradar [Häu98] Messungen an einigen Terrakotta-Fragmenten durchgeführt, um einen Eindruck von der Oberflächenbeschaffenheit der Terrakotta und der auf ihr befindlichen Lackschicht zu bekommen. Der Aufbau entspricht Abb. 3.1. Als Lichtquelle wird eine Hitachi HE8404SG LED verwendet. Ihre Mittenwellenlänge liegt bei $\lambda_0 = 820$ nm, bei einer Bandbreite von $\Delta\lambda = 50$ nm. Diese Werte ergeben nach Gl. 3.4 eine Kohärenzlänge von $l_K = 13$ μm . Die maximale Ausgangsleistung beträgt zwar 40 mW, das Licht der LED ist aber stark ungerichtet, so dass nur ein kleiner Bruchteil der Lichtleistung für die Messung verwendet werden kann. Bei der verwendeten CCD-Kamera handelt es sich auch hier um eine

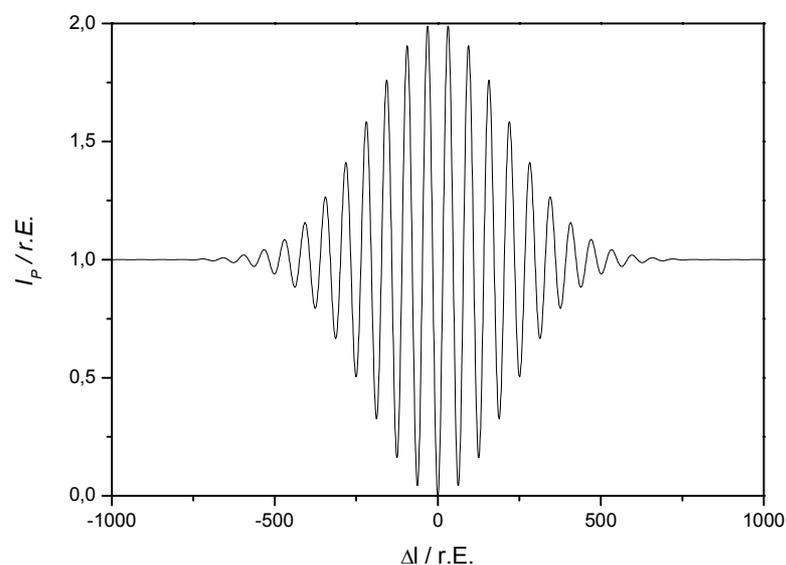


Abb. 3.2: Korrelogramm, wie es sich aus Gl. 3.1 berechnet, wenn $I_{\text{Ref}} = I_{\text{Obj}}$ ist.

SonyXC-75. Die laterale Auflösung des Aufbaus liegt bei bestenfalls $10\ \mu\text{m}$. Dieser Wert ergibt sich aus der Größe des abgebildeten Bereichs geteilt durch die Anzahl der Pixel der Kamera. Für die folgenden Messungen wird jeweils ein ca. $7,5 \times 6\ \text{mm}^2$ großer Bereich auf 756×576 Pixel abgebildet. Die z-Auflösung ergibt sich, wie oben erwähnt, aus der Genauigkeit, mit der das Maximum des Korrelogramms detektiert werden kann. Da bei den Messungen an den Tarrakotta-Fragmenten die Oberflächenstruktur nicht exakt aufgelöst werden kann, ist die erreichbare Genauigkeit nicht größer als die Oberflächenrauigkeit.

In Abb. 3.3 ist ein typisches Korrelogramm dargestellt, wie es bei einer Messung an dem Fragment F001/99 beobachtet wird. Die auftretenden Intensitätsschwankungen sind gut zu erkennen. Sie sind typisch für interferometrische Messungen und rühren vor allem von Verwacklungen her. Die Messung der höchsten Modulation mit der Drei-Punkt-Gauss-Interpolation ist hier ungeeignet. Mit der Fourier-Methode kann hier deutlich genauer gearbeitet werden.

In Abb. 3.4 ist auf der linken Seite ein Ergebnisbild des ca. $5 \times 5\ \text{mm}^2$ großen Untersuchungsbereichs auf dem Fragment F001/99 dargestellt. In dem Ergebnisbild sind die Bereiche blau gefärbt, in denen das Maximum des Korrelogramms nicht bestimmt werden kann, weil es entweder zu verrauscht ist, oder das Gebiet außerhalb des z-Messbereichs liegt und damit überhaupt keine Modulation in diesen Pixeln gemessen werden kann. Die Höhe z ist als Grauwert kodiert. Besser lassen sich die Höhenunterschiede in der 3-D-Darstellung in Abb. 3.4 auf der rechten Seite erkennen. Es sind Risse in der Lackschicht zu erkennen. Ein Profil über einen solchen Riss, dargestellt in Abb. 3.4 unten, zeigt eine Breite von ca. $300\ \mu\text{m}$ und eine Tiefe von ca. $200\ \mu\text{m}$. Da der Riss bis auf die Terrakotta geht, ist dieser Wert auch die Dicke der Farbschicht an dieser Stelle. Die Farbschicht besteht hier aus 2 Lackschichten und einer darauf aufgetragenen, roten Pigmentschicht. Die laterale Auflösung des Systems ist nicht ausreichend, um die feineren Risse, wie sie z.B. in Abb. 2.28 zu sehen sind, zu

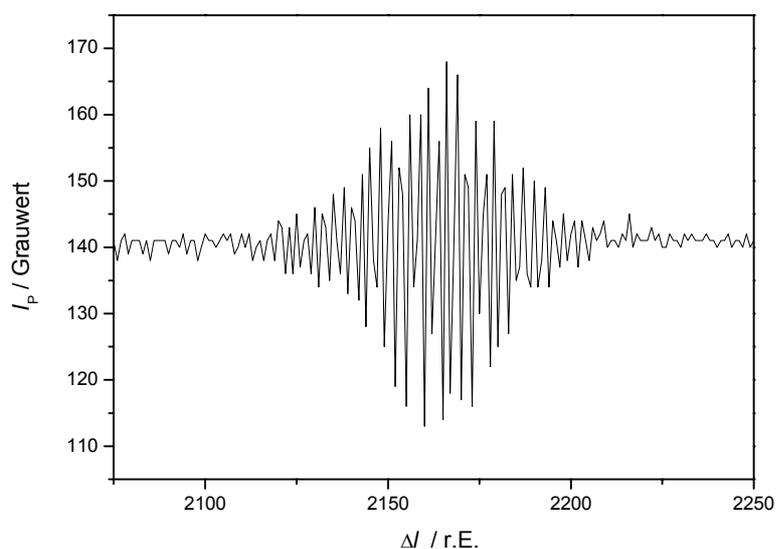


Abb. 3.3: Reales Korrelogramm aufgenommen an F001/99 in Erlangen mit dem Kohärenzradar.

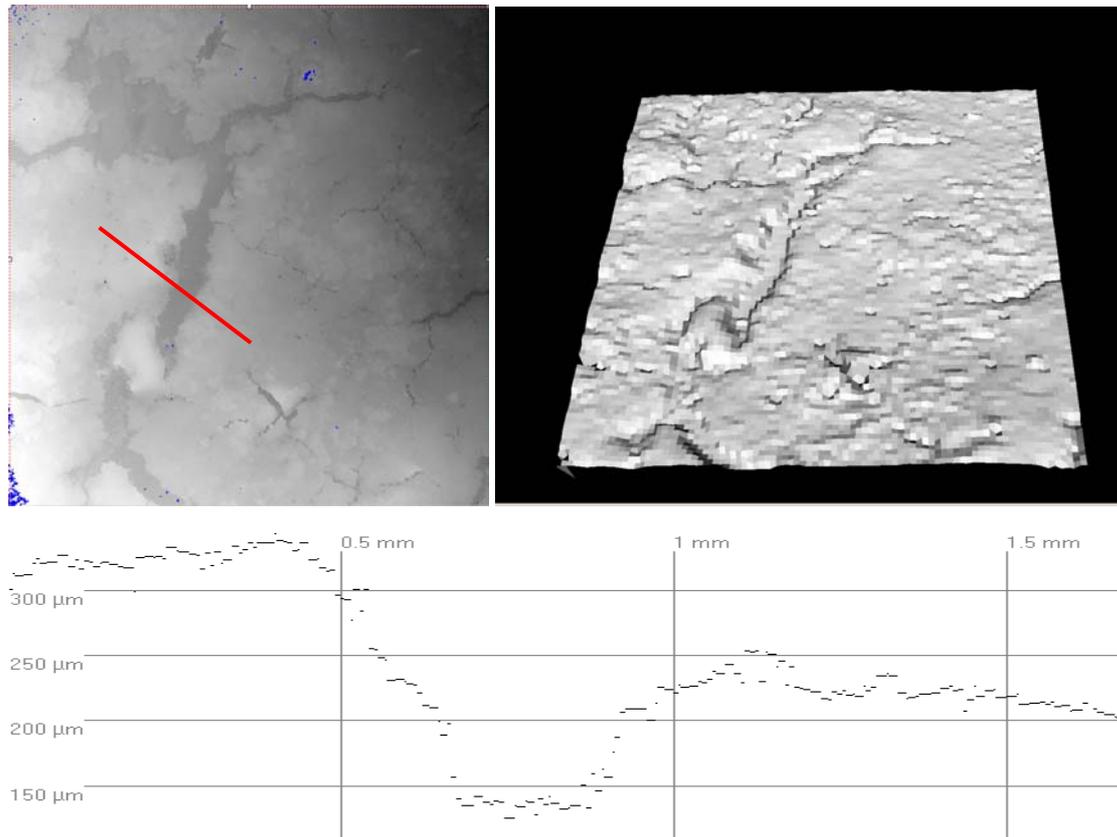


Abb. 3.4: Oben links: Grauwertdarstellung der Messung auf F001/99, Kantenlänge ca. 5 mm. Helle Punkte entsprechen höher liegenden Gebieten. Oben rechts: 3-D-Höhenprofil der Oberfläche mit dem Kohärenzradar gemessen. Unten: Profil entlang der links oben eingezeichneten roten Linie.

detektieren.

In Abb. 3.5 oben links ist die Oberfläche eines Teilbereichs von F011/98 dargestellt. Es handelt sich um einen ca. $4 \times 3,5$ mm² großen Ausschnitt in dem Bereich, in dem die „Vulkane“ entstanden sind. Das Profil 1 über eine der Ausbeulungen an der Oberfläche, dargestellt in der Mitte von Abb. 3.5, ergibt eine Höhe von ca. 50 μm. Das Profil 2, dargestellt in Abb. 3.5 unten, über die Kante eines Bereichs hinweg, an dem die oberste Lackschicht fehlt, ergibt hier eine Dicke der oberen Lackschicht von ca. 20 μm. Auch hier kann die feine Craqueléstruktur der Oberfläche, wie sie in Abb. 2.27 auf der rechten Seite zu sehen ist, nicht aufgelöst werden.

In Abb. 3.6 oben ist ein $3 \times 2,5$ mm² großer Bereich auf F012/98 dargestellt. Auch hier gibt es in der linken unteren Ecke einen Bereich, in dem die oberste der 2 Lackschichten fehlt. Profil 1, dargestellt in der Mitte von Abb. 3.6, ergibt an dieser Kante eine Dicke der oberen Lackschicht von 20-30 μm. Profil 2, zu sehen in Abb. 3.6 unten, erstreckt sich fast über den gesamten Messbereich. Auffällig ist hier, dass fast parallel zur Oberfläche eine weitere gesprenkelte Linie in ca. 30 μm Tiefe verläuft.

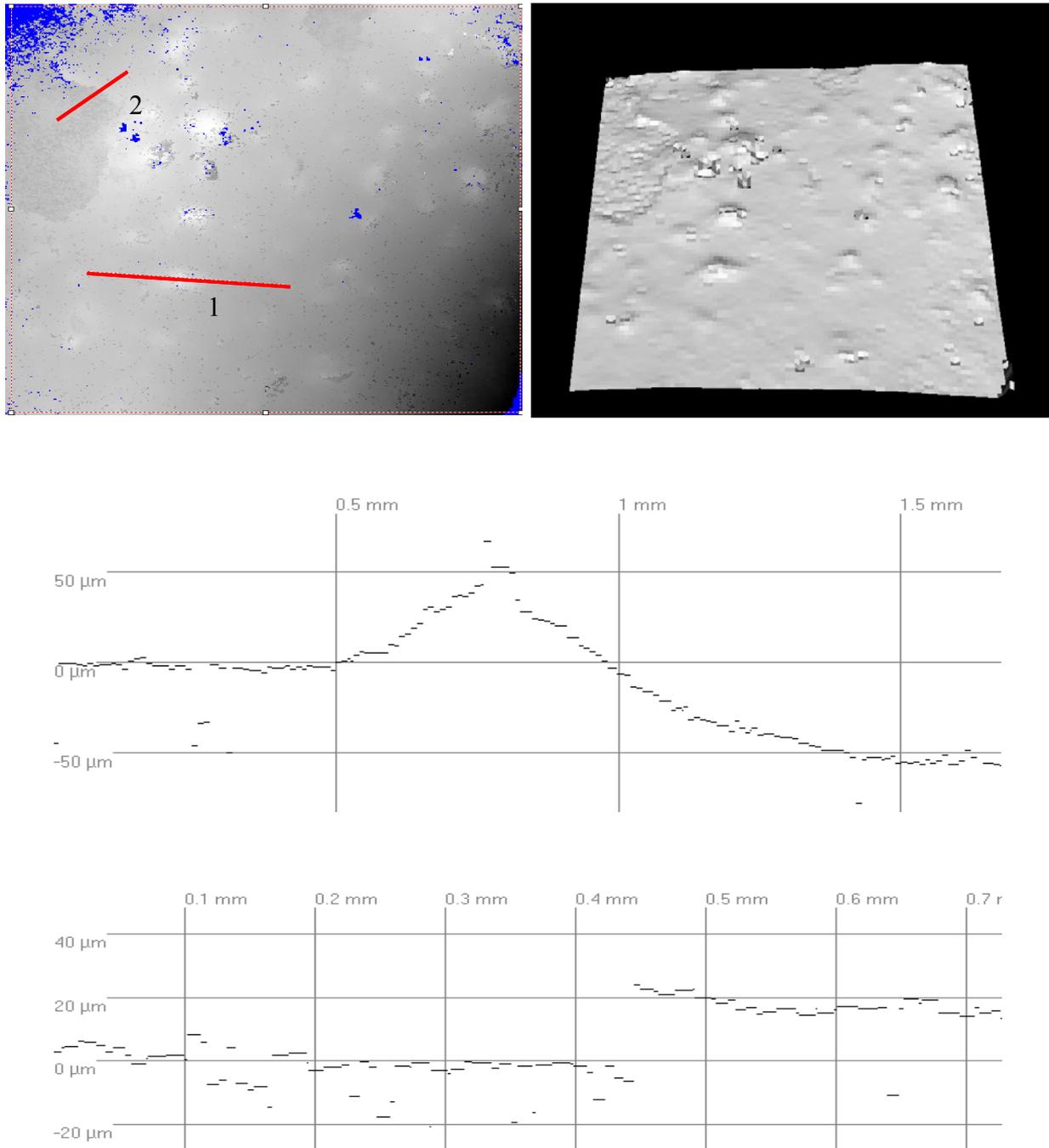


Abb. 3.5: Oben links: Messbereich auf F011/98, Kantenlänge $4 \times 3,5 \text{ mm}^2$, rot eingezeichnet Profil 1 und 2. Oben rechts: 3-D-Höhenprofil. Mitte: Profil 1 über eine Erhebung (Vulkan) auf der Probenoberfläche. Unten: Profil 2 über eine Kante zwischen oberer und unterer Lackschicht.

Um dieses Phänomen zu verstehen, wird noch einmal eine Messung an F011/98 betrachtet. Die Messung, dargestellt in Abb. 3.7 oben, wird relativ zu Beginn unterbrochen. Sowohl das 3-D Bild in Abb. 3.7 rechts oben als auch das Profil in Abb. 3.7 mitte zeigen eine Kante.

Diese Kante wandert während der Messung im Bild weiter nach links. Es handelt sich hierbei nicht um eine real existierende Kante. Bei der Betrachtung eines Korrelogramms aus diesem Bereich, dargestellt in Abb. 3.8 unten, sind deutlich 2 Maxima zu erkennen. Dies erklärt die auftretende Sprungkante. Das Messobjekt wird von unten nach oben, was in dem

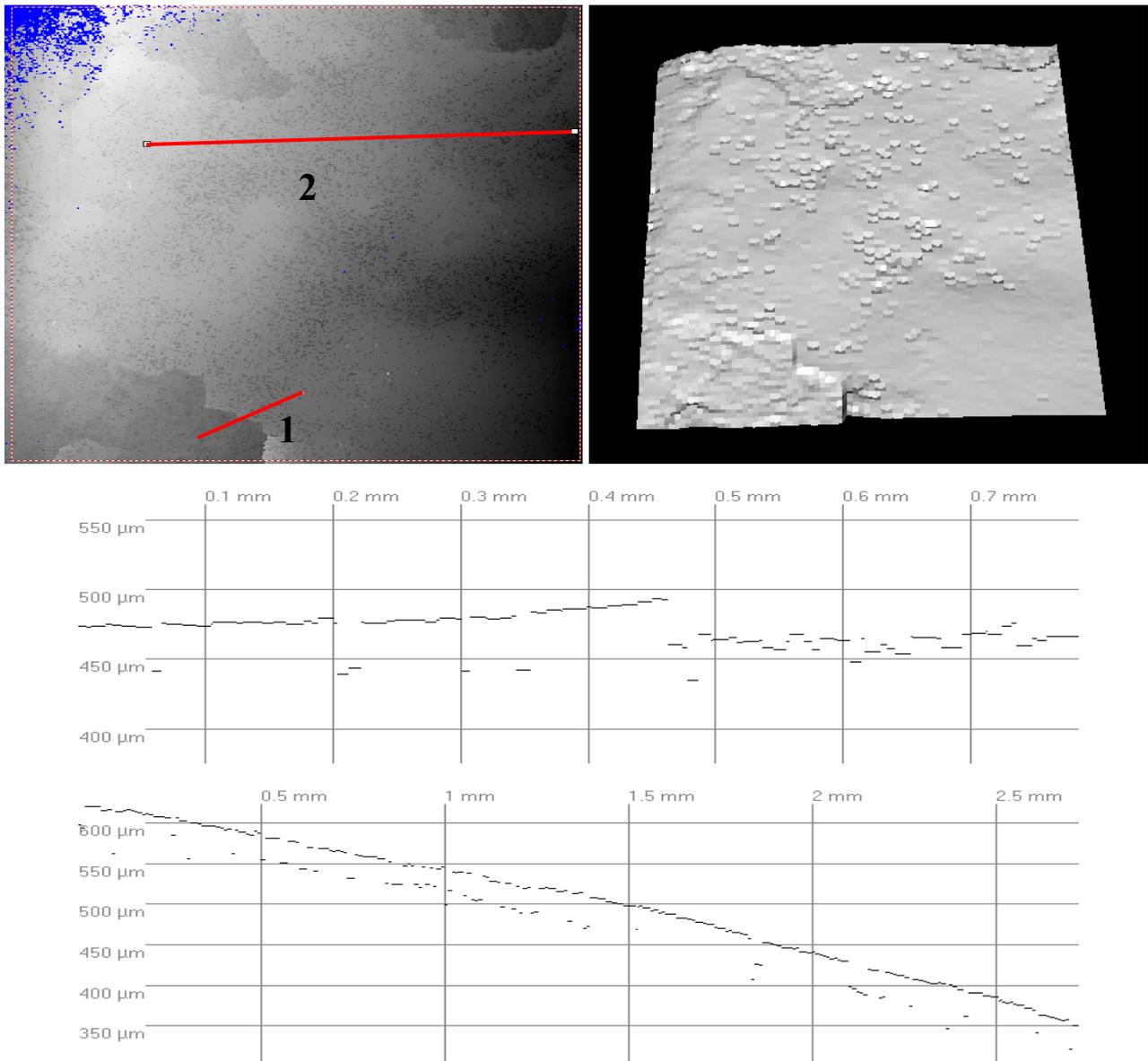


Abb. 3.6: Oben links: Messbereich auf F012/98, Kantenlänge $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$, rot eingezeichnet Profil 1 und 2. Oben rechts: 3-D-Höhenprofil. Mitte: Profil 1 über eine Kante zwischen oberer und unterer Lackschicht. Unten: Profil 2 über die geschlossene Lackschicht.

Korrelogramm ein Verlauf von links nach rechts bedeutet, abgescannt. Zuerst wird das kleinere Maximum von einer Schicht unterhalb der Oberfläche detektiert und dieser Wert als z-Wert in das Ergebnisbild eingetragen. $30 \mu\text{m}$ höher wird das Signal von der Oberfläche detektiert. Die Modulation hier ist größer und der alte z-Wert wird überschrieben. Der gleiche Effekt ist auch für die gesprenkelte Linie parallel zur Oberfläche an F012/98 verantwortlich. Die Messwerte parallel zur Oberfläche lassen sich damit erklären, dass hier teilweise das Signal aus der Probe sogar stärker ist als das Signal von der Oberfläche.

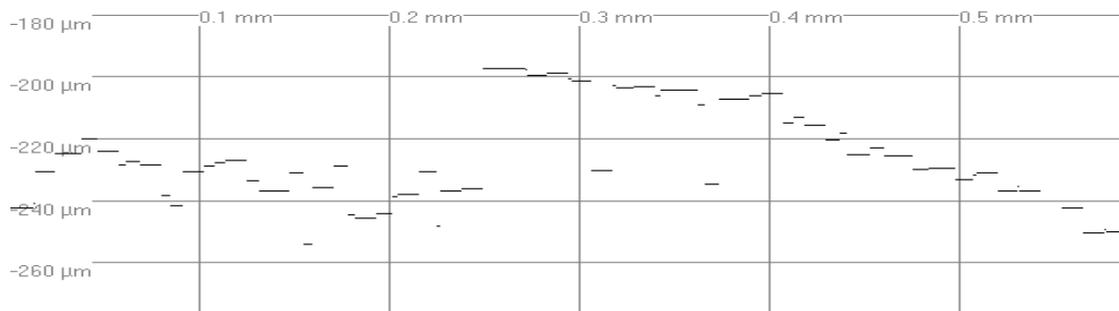
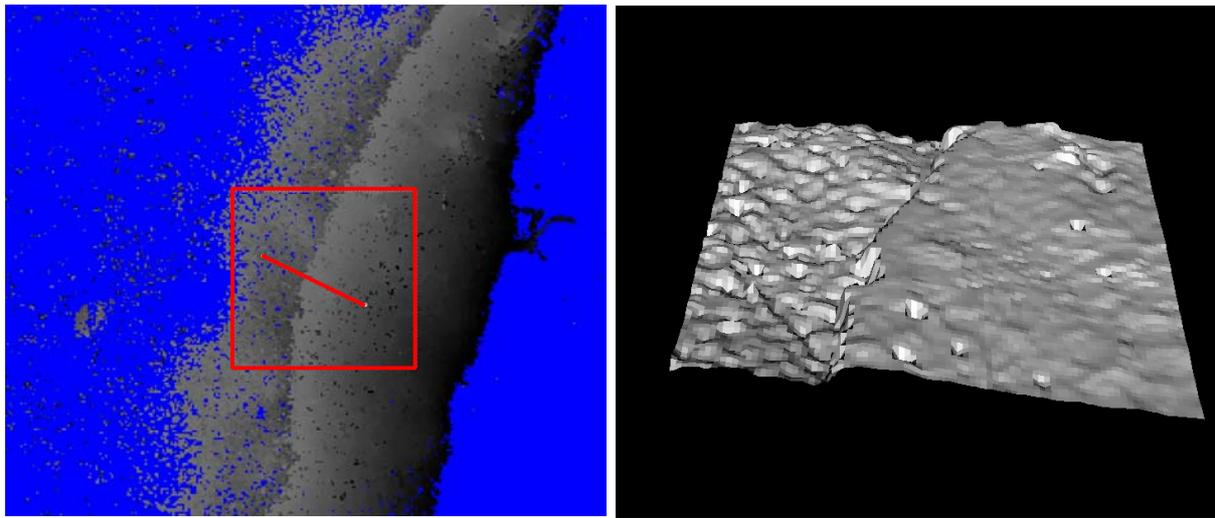


Abb. 3.7: Oben links: Momentaufnahme während einer Messung an F011/98, Kantenlänge ca. 1,7 mm. Oben rechts: 3-D-Höhenbild des links oben rot markierten ca. $0,7 \times 0,7$ mm² großen Bereichs. Unten: während der Messung auftretende Sprungkante entlang des eingezeichneten Profils.

3.1.2 Fazit Kohärenzradar

Das Kohärenzradar zeigt sich als gut geeignet, um die größeren Strukturen der Oberfläche, wie Ausbeulungen oder Schrumpfungsrisse, zu vermessen. Auch die Dicke der Lackschichten kann an Übergangsstellen recht gut abgeschätzt werden. Sie beträgt für eine einzelne Lackschicht ohne Pigmentierung in den hier gemessenen Fällen zwischen 20 und 30 µm. Zur Vermessung der feineren Strukturen, wie z.B. des Craquelémusters, ist die laterale Auflösung jedoch nicht ausreichend.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist die Detektion von Signalen unterhalb der Oberfläche. Es zeigt sich eindeutig, dass nicht das gesamte Licht an der Oberfläche reflektiert wird. Ein Teil dringt in das Messobjekt ein und wird aus dem Volumen zurückgestreut. Es kommt zu einer Überlagerung von Korrelogrammen aus unterschiedlichen Tiefen. Ein Vergleich der Tiefe, aus der die Signale detektiert werden, mit der Dicke der einzelnen Lackschichten legt nahe, dass es sich hier um Reflexe von der zweiten Lackschicht handelt. Zur genaueren Untersuchung werden Messungen mit einer Weiterentwicklung der Weißlichtinterferometrie, der OCT, durchgeführt.

3.2 Optische Kohärenz Tomographie (OCT)

Mit der Weißlichtinterferometrie oder dem Kohärenzradar, wie es im vorherigen Kapitel beschrieben wird, werden Oberflächenkonturen vermessen, indem das Maximum des Korrelogramms für einen Punkt auf dem Objekt gesucht und als z-Koordinate registriert wird. Wie jedoch bei den vorhergehenden Messungen z.B. in Abb. 3.8 zu sehen ist, reflektiert meistens nicht nur die Oberfläche das gesamte Licht. Ein Teil des Lichts dringt je nach Beschaffenheit des zu vermessenden Objekts und nach Intensität und Frequenz der verwendeten Lichtquelle in das Objekt ein und wird an dessen inneren Strukturen wieder reflektiert. Dies passiert aufgrund von Änderungen des Brechungsindex n . Nach Fresnel ergibt sich die Reflektivität R an einer Schicht mit zwei unterschiedlichen Brechungsindizes n_1 und n_2 bei senkrechtem Lichteinfall zu

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (3.6)$$

Das detektierbare Signal besteht nun aus der Überlagerung einer Reihe von Korrelogrammen. Der Reflex von der Oberfläche wird in den meisten Fällen der stärkste und damit das Signal mit der höchsten Modulation sein. Es ist aber auch möglich, die kleineren Reflexe auszuwerten und somit einen Eindruck über die innere Struktur des Untersuchungsobjekts zu bekommen. Wichtig ist zu beachten, dass es zu einer Abschwächung des Lichtes mit der Eindringtiefe durch Absorption kommt. Nach dem Lambert-Beerschen-Gesetz gilt:

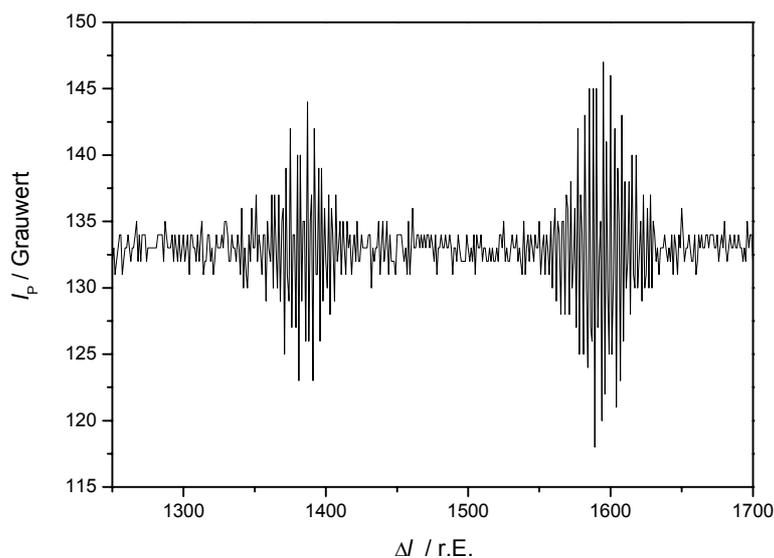


Abb. 3.8: Korrelogramm der Messung an F011/98. Aufgenommen an einer Stelle, an der ein zuerst eingezeichneter Höhenwert während der Messung wieder überschrieben wird. Die Messung verläuft zeitlich von links nach rechts.

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha d}. \quad (3.7)$$

Hierbei ist der Absorptionskoeffizient α eine Materialkonstante. Die Intensität I_0 des eingestrahlenen Lichts nimmt somit exponentiell mit der Eindringtiefe d ab. Dies ist der Grund, warum zumeist Detektoren mit sehr hoher Dynamik verwendet werden. Die hohe Dynamik ist wichtig, da in der OCT der Anteil des Nutzlichtes meist deutlich geringer als der Untergrund ist. Das Licht, das den Detektor erreicht, setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Aufgrund des zumeist großen Brechungsindexunterschiedes gibt es einen sehr intensiven Reflex von der Oberfläche des zu vermessenden Objekts. Das in das Objekt eindringende Licht nimmt mit der Tiefe aufgrund von Absorption exponentiell ab. Je tiefer das Licht eindringt, um so größer wird der Anteil an Mehrfachreflektionen. Das zu detektierende Signal, das seine Tiefeninformation behalten hat, ist aber nur der Anteil des eingestrahlenen Lichts, der einmal reflektiert den Detektor erreicht und dessen zurückgelegte Weglänge um nicht mehr als die Kohärenzlänge von der Länge des Referenzstahls abweicht. Das Signal am Detektor besteht somit aus einer hohen Untergrundintensität mit einer leichten Modulation. In [Fuj99] wird z.B. mit einer Dynamik von 110 dB gemessen. Hierfür wird eine erreichbare Messtiefe von bis zu 1 mm in Hautschichten angegeben.

Ein typischer OCT-Aufbau ist in Abb. 3.9 dargestellt. Der optische Teil gleicht sehr dem

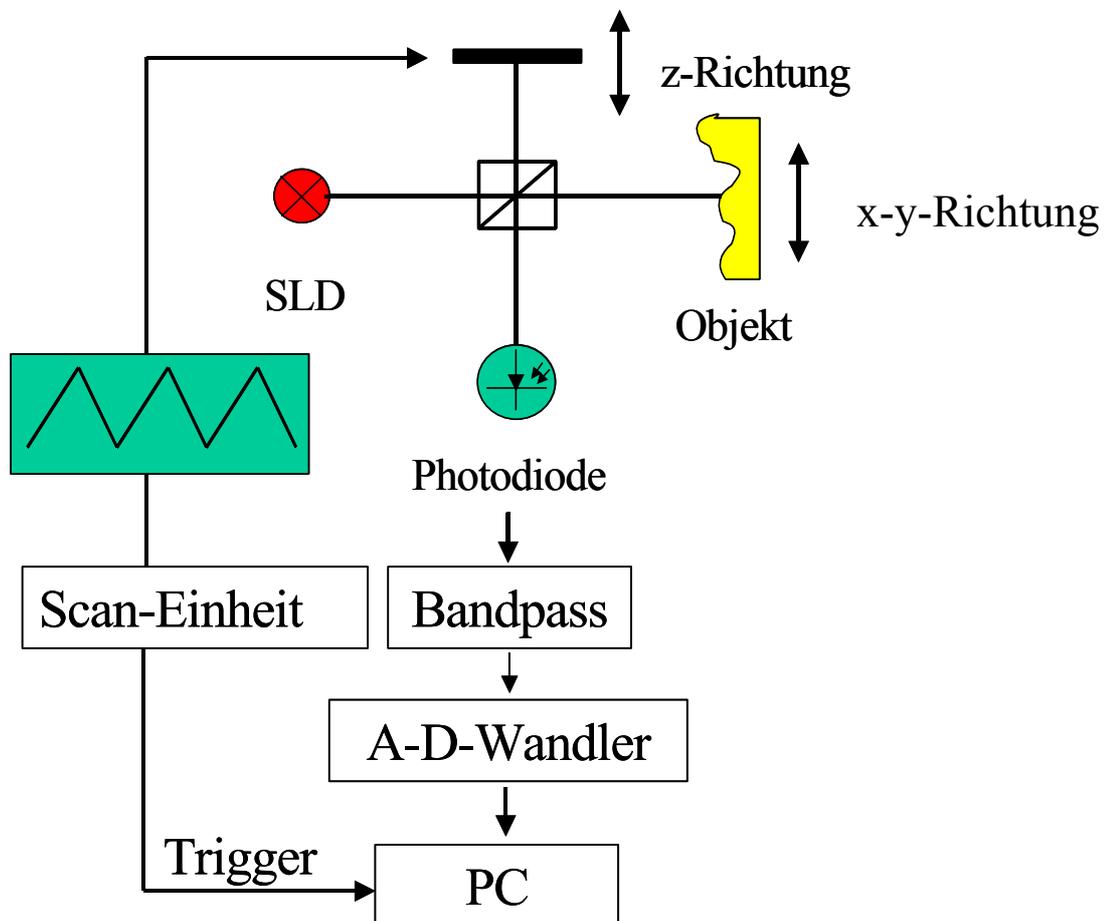


Abb. 3.9: OCT Aufbau.

Aufbau des Kohärenzradars. Ein wesentlicher Unterschied liegt aufgrund der erreichbaren, höheren Dynamik und der kürzeren Integrationszeit in der Verwendung einer Photodiode anstatt einer CCD-Kamera. Da auf diese Weise nur eine punktweise Messung möglich ist, wird meistens eine x-y-Scaneinheit integriert, um auch Flächen vermessen zu können. Es gibt auch erste Versuche 2-D-Photodioden-Arrays zu verwenden [BS01]. Hierbei ist die Anzahl der Pixel mit 58^2 noch recht gering. Auch die Pixelgröße von $146,7 \mu\text{m}^2$ ist recht groß, so dass eine hohe Ortsauflösung schwer zu erreichen ist.

Das Signal, das gemessen werden soll, ist die Intensität des Lichts, welches aus einer bestimmten Tiefe des Objektes reflektiert wird. Die Tiefe, aus der das Licht kommt, wird über den Weglängenunterschied Δl zwischen Objekt- und Referenzstrahl bestimmt. Die Genauigkeit, mit der die Tiefe bestimmt werden kann, wird durch die Kohärenzlänge l_K der Lichtquelle festgelegt. Reflektieren Punkte, die dichter als die Kohärenzlänge zusammenliegen, das Licht, so kommt es zu einer interferometrischen Überlagerung dieses Lichts und eine eindeutige Tiefenbestimmung ist nicht mehr möglich. Die Intensität des aus einer Tiefe reflektierten Lichts ergibt sich, bei konstanter Intensität im Referenzstrahl, aus der Höhe der Modulation des Interferenzsignals. Eine einfache Methode, die Modulation in Abhängigkeit von der Tiefe auszuwerten, ist die Heterodyne-Detektion. Durch das Verschieben des Spiegels im Referenzstrahl mit konstanter Geschwindigkeit ergibt sich eine cosinusförmige Modulation des Interferenzsignals. Die Trägerfrequenz des zu detektierenden Signals ergibt sich aus der Geschwindigkeit, mit der der Spiegel im Referenzstrahl verschoben wird, und der Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle. Durch einen Bandpass wird dieses Signal herausgefiltert und danach wieder in den Ursprung verschoben. Das entstehende Signal entspricht nun der Einhüllenden des Korrelogramms. In Abb. 3.10 ist das

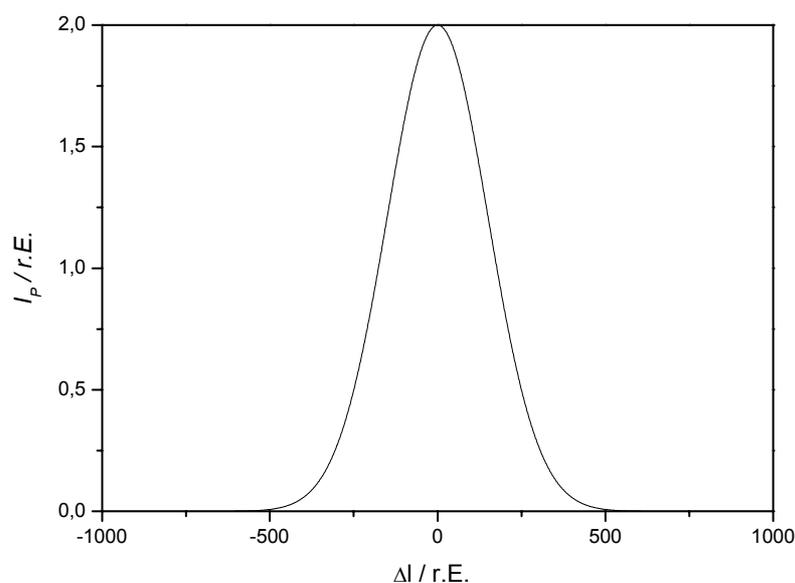


Abb. 3.10: Aus der Heterodyne-Detektion resultierendes Signal, wenn als Signal an der Photodiode das Signal aus Abb. 3.2 detektiert wird.

Ergebnis dargestellt, das entsteht, wenn das Korrelogramm aus Abb. 3.2. nach der Heterodyne-Detektion ausgewertet wird. Hier handelt es sich nicht um ein Korrelogramm mit Tiefeninformation, sondern nur um den Reflex einer Oberfläche vergleichbar mit einer Kohärenzradar-Messung. Wie das Signal bei einer Tiefenmessung aussieht, ist in Abb. 3.13 dargestellt.

3.2.1 Messungen

In Zusammenarbeit mit Kollegen vom Norwegischen Institut of Technologie in Trondheim [ÖS02] wird an einem kleinen Bruchstück eines mit PEG/PU gefestigten Fragments, dargestellt in Abb. 3.11, eine OCT-Messung bei zwei unterschiedlichen Wellenlängen durchgeführt. Da die Absorption der Lackschichten wellenlängenabhängig ist, kann so bestimmt werden, bei welcher Wellenlänge die Struktur der Lackschichten besser vermessen werden kann. Die Messung erfolgt entlang der rot eingezeichneten Linie. In Abb. 3.12 sind die Resultate der Messungen als Falschfarbenbilder dargestellt. Die Farbkodierung ist proportional zum Logarithmus der Intensität des reflektierten Lichts. Das obere Bild zeigt die Messung bei $\lambda_0 = 675$ nm und das untere Bild die Messung bei $\lambda_0 = 805$ nm. Die Kohärenzlänge beträgt für beide Lichtquellen ca. $15 \mu\text{m}$. Der Messbereich ist jeweils 1 cm lang und 1mm tief. In den Bildern entspricht von links nach rechts einem Verlauf auf der Probe von oben nach unten. Zuerst kommt ein kleiner Bereich, in dem es keine Lackschicht gibt. Es folgt ein Bereich, in dem nur eine Lackschicht vorhanden ist. Der Sprung an der Stelle, an der es 2 Lackschichten werden, ist deutlich zu erkennen. Der Sprung ist ca. $40 - 50 \mu\text{m}$ hoch. Im weiteren Verlauf sind deutlich zwei Schichten zu erkennen, wobei die untere Schicht nicht exakt parallel zur oberen verläuft. Der Abstand der Schichten variiert zwischen 50 und $80 \mu\text{m}$. An dieses Gebiet schließt ein weiteres an, in dem es nur eine



Abb. 3.11: Weißlichtbild eines ca. $1,5 \times 1 \text{ cm}^2$ großen Bruchstücks, behandelt mit PEG/PU.

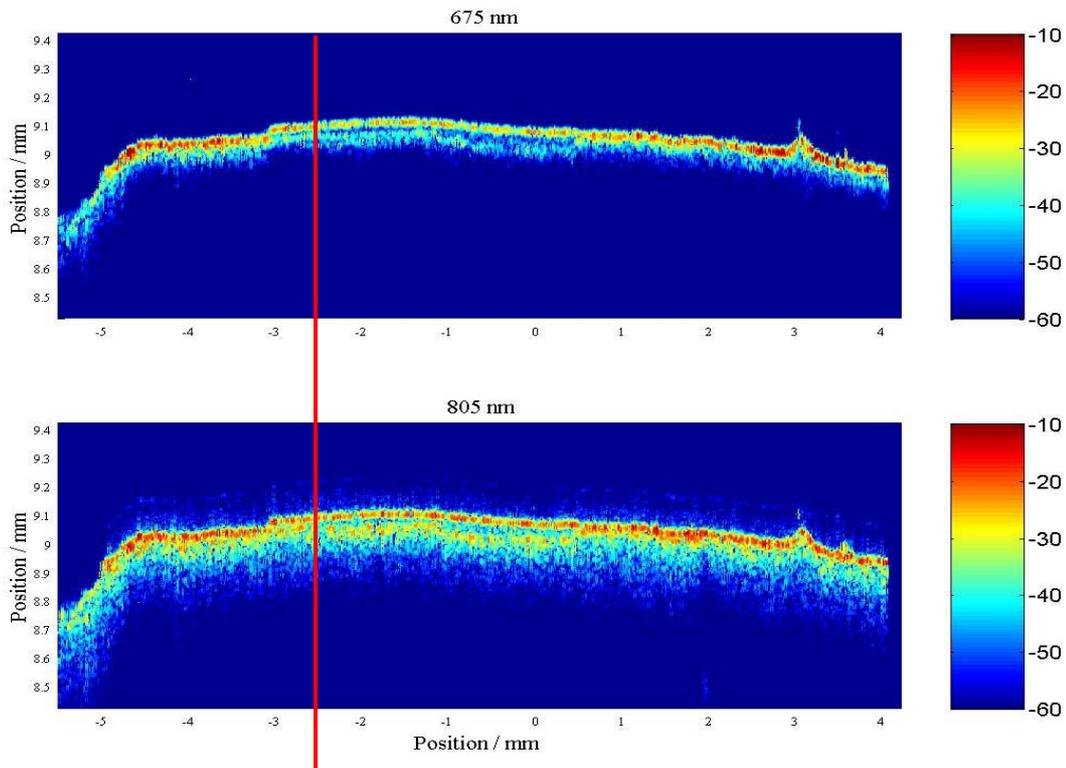


Abb. 3.12: OCT-Messung als 2-D-Tiefenprofil dargestellt. Durchgeführt an dem mit PEG/PU behandelten Bruchstück aus Abb. 3.11. Die Farbkodierung ist proportional zum Logarithmus der Intensität des reflektierten Lichts.

Lackschicht zu geben scheint. Bei genauerer Betrachtung ist aber auch hier ein zweites Signal unterhalb der Oberfläche zu erkennen. Bei einer Wellenlänge von 805 nm scheint das Licht tiefer in die Probe einzudringen als bei 675 nm. Aufgrund eines nicht perfekt justierten Aufbaus kommt es bei 805 nm zu einem leichten Geisterbild. Dieses liegt in einer Eigenheit des Aufbaus begründet. Die Lichtwege für die 675 nm Lichtquelle und für die 805 nm Lichtquelle sind gleich. Um das Signal wieder zu trennen, wird ein Beugungsgitter benutzt. Bei der Beugung am Gitter wird jedoch ein Teil des Spektrums der 805 nm Lichtquelle scharf abgeschnitten. Dies führt zu zwei kleinen symmetrisch um das Hauptsignal angeordneten Nebenmaxima in der Kohärenzfunktion und damit zu zwei zum Original-Signal versetzten Signalen. Diese sind jedoch deutlich kleiner als das Original-Signal.

In Abb. 3.13 sind die in Abb. 3.12 oben rot eingezeichnete Tiefenprofile dargestellt. Links in dieser Abbildung ist die Messung bei 675 nm dargestellt. Neben dem deutlichen Reflex von der Oberfläche ist noch ein zweiter, kleinerer Reflex, ca. 60 μm tiefer zu erkennen. Der gleiche Tiefenschnitt bei 805 nm, dargestellt in Abb. 3.13 rechts, zeigt neben dem Reflex von der Oberfläche wiederum einen etwa 60 μm tiefer liegenden Reflex aber zusätzlich noch weitere Signale, die einen etwas genaueren Eindruck von der inneren Struktur des Bruchstücks vermitteln. Dass diese Signale nicht durch die Nebenmaxima entstehen begründet sich aus der nicht vorhandenen Symmetrie. Wäre es ein Teil des erwähnten „Geisterbildes“, so müsste es symmetrisch sein. Die Vermessung der Transmission des Lackes in einem

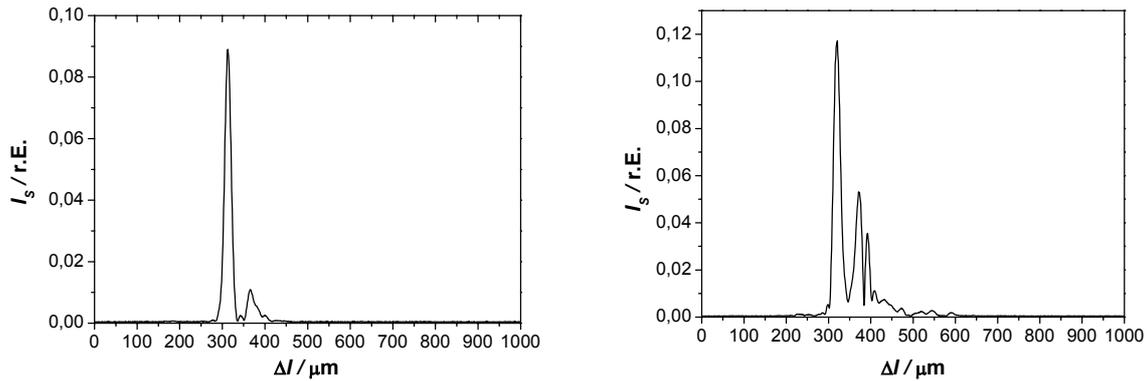


Abb. 3.13: links: Schnitt durch die OCT-Messung bei 675 nm; rechts: Schnitt durch die OCT-Messung bei 805 nm.

Spektrometer bestätigt den oben gewonnenen Eindruck. Die Transmission des Lacks bei 800 nm ist fast doppelt so hoch wie bei 675 nm.

3.2.2 Fazit OCT

Die OCT-Messungen zeigen, dass der Lack eine höhere Transmission im NIR hat. Die Strukturmessungen ergeben ähnliche Werte für die Dicke der Lackschicht, wie sie sich schon im Kohärenzradar angedeutet haben. Die Dicke der Lackschicht lässt sich jedoch nur verlässlich an Stellen messen, wo es eine Stufe zwischen einschichtigem und zweischichtigem Lackaufbau gibt. An den Stellen, wo ein Lichtreflex von der oberen Lackschicht und ein weiterer Lichtreflex von der darunter gelegenen Lackschicht gemessen werden, kann nicht exakt auf die Dicke der Lackschicht geschlossen werden. Es ergibt sich an diesen Stellen immer eine größere Dicke, da der Brechungsindex des Lackes berücksichtigt werden muss. Dieser ist jedoch nicht bekannt. Der Aufbau der Lackschicht lässt sich jedoch grundsätzlich erkennen. Gerade der Verlauf der Grenzschichten relativ zueinander ist gut zu erkennen. Gebiete mit nur einer Lackschicht sind gut auszumachen. Die OCT ist ein geeignetes Hilfsmittel, um Positionen für eine schichtenselektive Verformungsmessung auszuwählen. Einen Vergleich mit REM - oder Lichtmikroskopischen-Querschnitts -Aufnahmen an exakt den gleichen Stellen könnte die Interpretation der Daten noch verbessern und sollte es sogar ermöglichen, Ablösungen zu identifizieren oder flüssiges HEMA bzw. PEG/PU aufzuspüren.

4 Kurzkohärenz ESPI (LCSI)

Gerade in den letzten Jahren bedienen sich immer mehr interferometrische Verfahren kurzkohärenter Lichtquellen, wie schon in dem vorhergehenden Kapitel die OCT. In der holografischen Mikroskopie wird durch kurzkohärente Lichtquellen die Tiefenauflösung verbessert [BB98], [DB99], [LS00], [IK001], [IK002] und [PT02]. In der Strömungsmesstechnik wird durch die Ausnutzung begrenzter Kohärenz das Signal-zu-Rausch-Verhältnis in der Light-in-Flight holography verbessert [HH97]. In diesem Kapitel wird die Kombination aus ESPI und OCT vorgestellt. Da es für diese Verfahren bisher keinen Namen gibt, wird es ab jetzt mit Low Coherence Speckle Interferometry (LCSI) bezeichnet. Durch die Vereinigung der wesentlichen Eigenschaften beider Systeme werden die Einsatzmöglichkeiten des Gesamtsystems deutlich erweitert. LCSI kann sowohl als Weiterentwicklung der OCT, als flächige OCT mit räumlichem Phasenshift, oder auch als Weiterentwicklung der ESPI, als SPS-ESPI mit kurzkohärenter Lichtquelle und scannendem Referenzarm, aufgefasst werden. Die LCSI ermöglicht es, mit relativ einfachen Mitteln, die innere Struktur eines Objektes grob darzustellen, um dann in geeigneten Tiefen mit z.B. stark reflektierenden Strukturen interferometrische Verformungsmessungen durchzuführen.

Es wird der Aufbau des Systems, die Wahl und Vermessung der einzelnen Komponenten und ein Vergleich mit den vorhergehenden ESPI- und OCT-Messungen vorgestellt. Weiterhin wird eine Einschätzung der Grenzen des Systems gemacht.

4.1 Vorüberlegungen

Aus den beiden ersten Kapiteln dieser Arbeit können die Anforderungen an das LCSI-System abgeleitet werden.

1. Die Verformungsgebiete, die aufgelöst werden müssen, sind ca. 150 μm im Durchmesser. Hierfür hat sich die Verwendung eines LWD-Mikroskops mit einer bis zu 6,4-fachen Vergrößerung als geeignet erwiesen.
2. Der Variationsbereich der Feuchte muss in einem Bereich von 20 – 95 % r.F. möglich sein. Dieser Bereich kann mit der vorhandenen Klimakammer gut abgedeckt werden.
3. Durch die Klimakammer kann es zu schnellen Bewegungen und Verwacklungen kommen. Der Einsatz eines räumlichen Phasenshifts zur Minimierung störender Einflüsse während einer Messung hat sich bewährt.
4. Die einzelnen Lackschichten haben eine Dicke von ca. 30 μm . Um die einzelnen Schichten getrennt voneinander betrachten zu können, darf die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle nicht größer sein.

5. Der Verlauf der Schichten weist auf einer Fläche von 1 mm² Schwankungen von einigen 10 µm auf. Um eine Fläche auf einmal erfassen zu können, darf die Kohärenzlänge der Lichtquelle nicht kleiner als diese Unebenheit der Oberfläche sein.
6. Die Lackschichten haben ihre größte Transparenz im nahen Infrarot NIR. Die verwendete Lichtquelle sollte also in diesem Wellenlängenbereich liegen.
7. Da die Empfindlichkeit normaler CCD-Kameras im NIR deutlich abnimmt, muss eine für das NIR geeignete Kamera verwendet werden.
8. Die Weglänge zwischen Objekt- und Referenzstrahl muss in der Größenordnung der Kohärenzlänge aneinander angepasst werden können.

Neben diesen Überlegungen, die direkt aus den Anforderungen der in den vorhergehenden Kapiteln erwähnten Messverfahren resultieren, gibt es noch eine zusätzliche Bedingung, die das neue System erfüllen muss:

Bei ESPI-Messungen ist die Kohärenzlänge so groß, dass die relative Lage des Objekts zum Messaufbau von keiner großen Bedeutung ist. Auch bei OCT-Messungen spielt die relative Lage des zu vermessenden Objekts zum Messsystem kaum eine Rolle. Bei LCSI-Verformungsmessungen muss die zu vermessende Schicht exakt so positioniert werden können, dass das an dieser Schicht reflektierte Licht kohärent mit dem Licht des Referenzstrahls überlagert werden kann. Die Schicht, aus der das reflektierte Licht kohärent mit dem Licht des Referenzstrahls überlagert, wird im Folgenden mit Kohärenzschicht bezeichnet. Es muss mit dem LCSI-System möglich sein, die Lage einer zu vermessenden Schicht zum System genau detektieren zu können, um sie dann exakt zur Kohärenzschicht ausrichten zu können.

4.2 Messaufbau

In Abb. 4.1 ist der verwendete Messaufbau dargestellt. Es wird ein Mach-Zehnder-Interferometer aufgebaut. Das Licht der Strahlquelle, hier eine SLD, wird an einer Glasplatte in zwei Strahlengänge aufgeteilt. Der mit ca. 96 % durchgehende Strahl wird der Objektstrahl, der kleinere Reflex der Referenzstrahl. Zur Strahlführung wird das Licht in nicht polarisationserhaltende monomode Glasfasern eingekoppelt. Die Variation der Weglängen von Objekt- und Referenzstrahl erfolgt mittels einer Verschiebeeinheit, auf der die Auskoppelseite der Faser des Objektstrahls befestigt ist. Hier wird das Licht kollimiert und auf das Objekt gerichtet. Das vom Objekt reflektierte Licht wird durch das in Kapitel 2.4 beschriebene Mikroskop abgebildet. Das Licht des Referenzstrahls wird über einen Strahlteiler dem Licht des Objektstrahls überlagert. Genau wie in Kapitel 2 beschrieben, hat der Quellpunkt dabei die gleiche Entfernung zum Detektor wie die Blende im Objektstrahl.

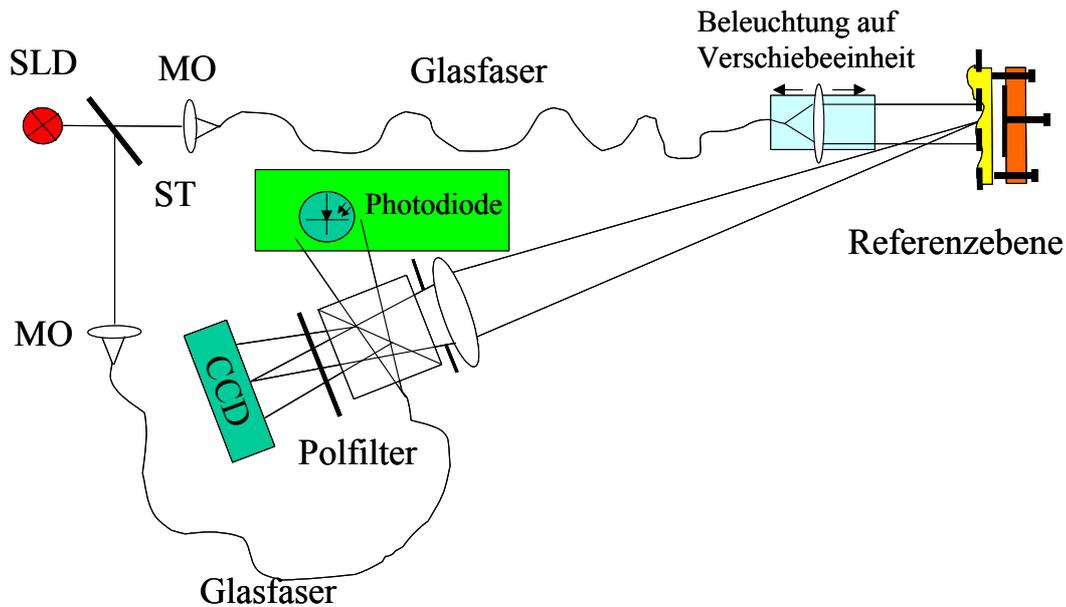


Abb. 4.1: Messaufbau.

Zur Einstellung eines räumlichen Phasenshifts wird der Quellpunkt lateral versetzt. Das Interferenzsignal kann sowohl mit einer Photodiode als auch mit einer CCD-Kamera aufgezeichnet werden. Vor der CCD-Kamera kann ein Polfilter angebracht werden. Zwei der wesentlichen Unterschiede zu dem in Kapitel 2 verwendeten Aufbau ist die Verwendung einer kurzkohärenten Lichtquelle und die Möglichkeit, die Länge des Objektstrahls zu variieren.

Der Aufbau ist bewusst flexibel gehalten. Durch Variation der Lichtquelle kann er sowohl als normaler ESPI-Aufbau als auch als LCSPI-Aufbau betrieben werden. Die Möglichkeit, zwischen CCD-Kamera und Photodiode zu wählen, erlaubt sowohl eine flächige als auch eine punktweise Datenerfassung; diese mit deutlich höherer Dynamik.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten und ihre Funktion im Aufbau näher erläutert.

4.2.1 Wahl der Lichtquelle

Wird der Aufbau als ESPI-Aufbau mit hoher Kohärenzlänge betrieben, so stehen zwei Lichtquellen zur Verfügung. Der HeNe-Laser, der schon in Kapitel 2 erwähnt wird, und eine (Distributed Bragg Reflection Laser Diode) DBR LD, die aufgrund eines eingebrachten Bragg-Gitters eine besonders hohe Frequenzstabilität mit sehr schmaler Linienbreite aufweist. Ihre Ausgangsleistung beträgt 150 mW, bei einer Mittenwellenlänge von 850 nm und einer Linienbreite, die kleiner als 7 fm ist. Hieraus ergibt sich eine Kohärenzlänge von mehreren Metern.

Die Wahl der kurzkohärenten Lichtquelle bedarf einiger Erläuterungen. Aus den voranstehenden Überlegungen geht hervor, wie wichtig die Wahl der richtigen Lichtquelle ist. Die zur Verwendung kommende Lichtquelle sollte eine Kohärenzlänge von einigen zehn

Mikrometern aufweisen. Wie die Messungen in Kapitel 2 zeigen, besteht die zu vermessende Bemalung auf den Terracotta-Fragmenten aus mehreren Lackschichten, die jeweils eine Dicke von einigen 10 μm haben. Die Größe des betrachteten Bereichs beträgt, wie in Kapitel 2 gezeigt, ca. 1 mm^2 . In diesem Bereich weisen die Schichten eine Unebenheit von einigen 10 μm auf. Es bietet sich eine Kohärenzlänge von 30 μm an. Sie ist kurz genug, um in den meisten Fällen die einzelnen Schichten getrennt voneinander zu betrachten. Es ist aber immer noch gewährleistet, dass auch unebenen Stellen der Lackschicht innerhalb der Kohärenzlänge liegen.

Als Mittenwellenlänge ist eine Frequenz zu wählen, bei der genügend Licht in das Objekt eindringt. Hier erweisen sich die 830 nm aus dem Kohärenzradar oder die 805 nm aus dem OCT-Aufbau als geeignet.

Wie wichtig für die folgenden Messungen ein gaußförmiges Spektrum der Lichtquelle ist, kann aus dem Wiener-Khinchin-Theorem in Gl. 3.2 abgeleitet werden. Ein gaußförmiges Spektrum ergibt eine gaußförmige Kohärenzfunktion. Bei Abweichungen des Spektrums von der Gaußfunktion kann es zu Nebenmaxima in der Kohärenzfunktion kommen. Liegen der Abstand dieser Nebenmaxima in der gleichen Größenordnung wie die zu vermessenden Strukturen, so ist die Eindeutigkeit des Ortes bei tiefenselektiven Messungen nicht mehr gegeben. Es kann nicht mehr auseinandergehalten werden, aus welcher Tiefe sich das Licht mit welchem Teil der Kohärenzfunktion überlagert. Dies ist unter anderem der Grund, weshalb eine multimode Laserdiode nicht geeignet ist. Eine LED, wie sie in Kapitel 3 im Kohärenzradar Verwendung findet, hat im Allgemeinen eine zu kurze Kohärenzlänge und eine zu geringe Ausgangsleistung. Eine weitere Alternative, der Femtosekunden-Laser [HL02], [Fuj99], hat sogar eine einstellbare Kohärenzlänge. Seine hohe Leistungsdichte, bei der es zu einer Schädigung der fast schwarzen Lackschicht kommen kann, die ungenügende Pulsstabilität und der hohe Anschaffungspreis sprechen aber für eine SLD. Langzeitmessungen, bei denen weit auseinander liegende Zeitpunkte mit einander verglichen werden sollen, erfordern eine hohe Frequenzstabilität der Lichtquelle. Eine etwas eingehendere Untersuchung der Kohärenzfunktion verschiedener Breitbandlichtquellen ist [Höf94] zu entnehmen. Im Weiteren wird als Lichtquelle eine SLD verwendet. Deshalb wird hier kurz auf ihre wichtigsten Eigenschaften eingegangen.

4.2.2 Aufbau und Eigenschaften der SLD

Die Entwicklung und Optimierung der SLD ist vor allem auf ihren Gebrauch als breitbandiges Sendeelement für die optische Nachrichtenübertragung mittels Glasfasern ausgerichtet. Wichtig sind hierfür ein hoher Einkoppelwirkungsgrad, eine hohe Lichtleistung, hohe Modulationsfrequenzen und ein geringer Klirrfaktor, um nur einige Faktoren zu nennen [JP81]. Die meisten der oben genannten Punkte erfüllt auch eine Laserdiode (LD). Das Problem bei LD's ist das Modenrauschen, welches eine Fluktuation des Ausgangssignals und

damit eine schlechtere Signalübertragung liefert. Zwar weist die SLD ein breiteres optisches Spektrum auf, doch sind aufgrund des fehlenden Resonators Modulationsstörungen recht unwahrscheinlich. In Abb. 4.2 ist der Aufbau einer SLD schematisch dargestellt. Im Gegensatz zu einer LED soll das Licht der SLD hauptsächlich durch stimulierte Emission erzeugt werden. Hierfür ist eine starke Wechselwirkung zwischen Licht und Materie notwendig. Diese starke Wechselwirkung kann nicht wie in einer LD durch das innerhalb des Resonators hin und her reflektierende Licht, das mehrmals das aktive Medium durchquert, erzeugt werden. Bei einer SLD darf es, wie oben erwähnt, keinen Resonator geben. Deshalb muss die ausreichende Wechselwirkung zwischen Licht und Materie über die Länge der Wechselwirkungsstrecke erfolgen. Die aktive Zone sollte nicht kürzer als $500\ \mu\text{m}$ sein. Als aktives Medium wird meist ein direkter Halbleiter, wie z.B. GaAs, verwendet, der zwischen zwei AlGaAs Schichten liegt und somit einen p-n-Übergang erzeugt. Um den Betriebsstrom möglichst gering zu halten, wird zumeist eine sehr schmale Struktur ausgewählt. Dadurch, dass die SLD hauptsächlich mit stimulierter Emission arbeitet, ist ihr Spektrum nicht ganz so breit wie das einer LED. Dafür ist ihre Abstrahlcharakteristik deutlich gerichtet und das emittierte Licht weitestgehend polarisiert. Das Polarisationsverhältnis liegt bei $1/20$ bis $1/100$. Damit der benötigte Strom $100\ \text{mA}$ nicht deutlich überschreitet, darf das Volumen des aktiven Mediums nicht zu groß sein. Bei einer Mindestlänge von $500\ \mu\text{m}$ beträgt der maximale Querschnitt $5\ \mu\text{m}^2$. Die aktive Zone wird in ihrer Breite und Länge durch den aufgebrachtten Streifenkontakt bestimmt. Ein Problem ergibt sich durch die Bedingung, dass kein Resonator existieren darf, in dem sich Moden ausbilden können. Allein durch den Übergang GaAs zur Luft entsteht an dem Austrittsfenster eine Reflektivität von $R = 0,32$. Eine Antireflex-Beschichtung ist meist nicht ausreichend. Es wird deshalb an der Rückseite der Diode ein absorbierender Bereich geschaffen, so dass von hier kein Licht in die aktive Zone zurückgelangen kann. Dies geschieht dadurch, dass der hintere Teil der SLD nicht mit einem metallischen Kontakt versehen wird. Es wird in diesem passiven Gebiet kein Licht erzeugt. Da hier aber die gleiche Bandlücke wie im aktiven Teil der Diode vorliegt, kann das dort erzeugte Licht gut absorbiert werden. Auf der Vorderseite wird zusätzlich eine AR-Schicht aufgebracht.

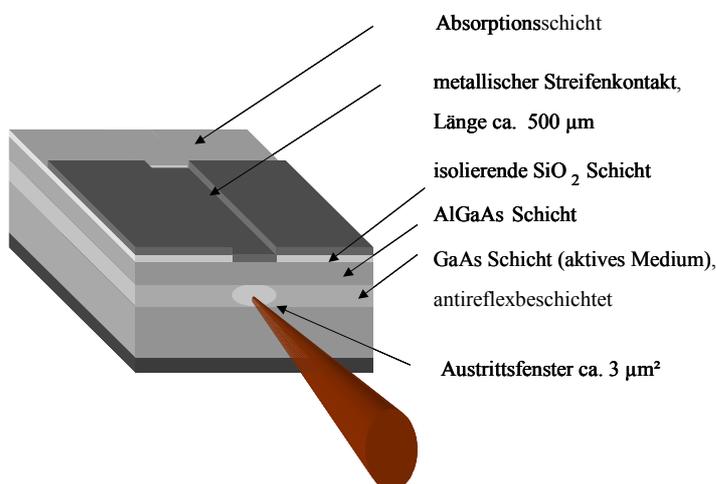


Abb. 4.2: Aufbau einer SLD.

Da der Aufbau der SLD in den wesentlichen Teilen einer LD gleicht, können auch viele der thermischen Betrachtungen auf sie übertragen werden [PTB84] [IO89]. Ein Kühlen der SLD erhöht z.B. die Lichtleistung, da die meisten der Verlustmechanismen, wie der strahlungslose Energieübertrag an Phononen des GaAs-Gitters, temperaturabhängig sind. Auch das Spektrum des emittierten Lichts ist temperaturabhängig. Je niedriger die Temperatur ist, um so größer ist die Bandlücke im GaAs. Dies bedeutet eine Erniedrigung der Wellenlänge. Gleichzeitig sinkt die Breite der Energiebänder und somit die spektrale Breite des emittierten Lichts. Nach Gl. 3.5 führt eine Temperaturänderung somit zu einer Änderung der Kohärenzlänge der SLD.

Verwendet wird eine Superlumineszenzdiode C86142E von EG&G. Ihr genauer Aufbau ist nicht bekannt. Es lassen sich daher keine exakten Vorhersagen über ihr Temperaturverhalten machen. In Abb. 4.3 sind jedoch die mit einem Spektrometer erhaltenen Messwerte zum Temperaturverhalten aufgetragen. Gemessen wird bei maximalem Betriebsstrom $I = 100 \text{ mA}$. Es wird die Betriebstemperatur von 10 bis 25 °C in 5 Grad Schritten erhöht. Die Mittenwellenlänge λ_0 liegt bei 25 °C und 100 mA Betriebsstrom bei 838 nm, das Spektrum ist gaußförmig und die FWHM $\Delta\lambda$ liegt bei 23 nm. Mit diesen Daten berechnet sich die Kohärenzlänge aus Gl. 3.4 zu $30 \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$, wobei sich die Genauigkeit aus der Ablesegenauigkeit in den Spektren ergibt. Die Kohärenzlänge liegt in der für die vorgesehenen Messungen richtigen Größenordnung.

Weiterhin ist deutlich ein Anstieg in der Lichtleistung mit abnehmender Temperatur zu erkennen. Die Leistung der SLD liegt bei Raumtemperatur bei ca. 7 mW. Wird die SLD auf 6 °C abgekühlt, steigt die Ausgangsleistung auf 9 mW an. Tiefer als 6 °C wird nicht gekühlt, um ein Beschlagen des Austrittsfensters zu verhindern. Im Weiteren wird die SLD immer bei 100 mA und 6 °C betrieben.

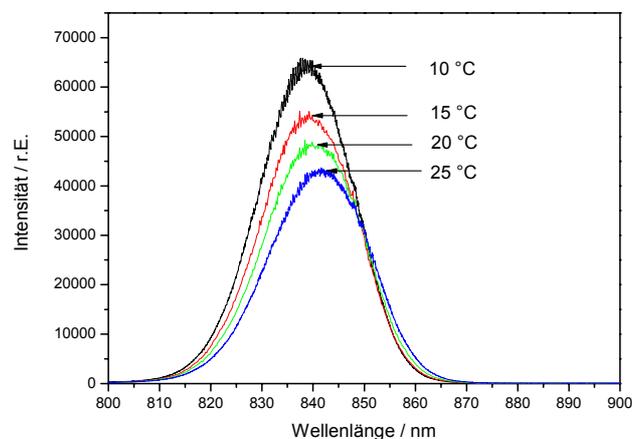


Abb. 4.3: Spektrum der verwendeten SLD gemessen für die Temperaturen 10, 15, 20, 25 °C; angefangen bei der höchsten Kurve. Der Strom beträgt konstant 100 mA.

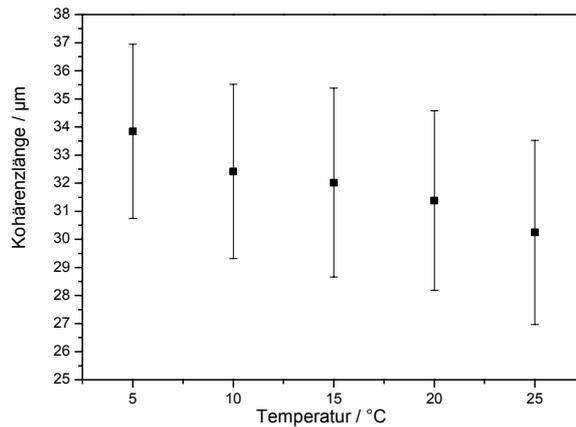


Abb. 4.4: Aus Abb. 4.3 errechnete Kohärenzlänge der verwendeten SLD in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Messfehler bei der Berechnung der Kohärenzlänge ergibt sich aus der Genauigkeit, mit der die Mittenwellenlänge und die Halbwertsbreite aus den Spektren in Abb. 4.3 bestimmt werden können.

Die Temperaturänderung führt, wie erwartet, zu einer Änderung in der Mittenwellenlänge und in der Halbwertsbreite. Die daraus resultierende Veränderung in der Kohärenzlänge, aufgetragen in Abb. 4.4, ist jedoch minimal.

4.2.3 Verschiebeeinheit

Ein Inchworm IW-602 der Firma Burleigh [Bu87] dient zur Variation der Weglängen zwischen Referenz- und Objektstrahl. Seinen Namen hat der Inchworm aufgrund seiner Funktionsweise. Sie gleicht der Kriechbewegung eines Wurms. Der prinzipielle Vorgang der Bewegung des Inchworms ist in Abb. 4.5 zu sehen. Der Vortrieb des Inchworms besteht aus drei Piezos, zwei Klemm- und einem Dehnungs- Piezo, die um eine Metallstange angeordnet sind. Im ausgeschalteten Zustand besteht kein Kontakt zwischen Piezos und Antriebstange. Die Bewegung erfolgt in einzelnen Schritten

1. Piezo 1 klemmt die Stange ein.
2. Piezo 2 dehnt sich aus. => Die Stange bewegt sich vor.
3. Piezo 3 klemmt die Stange.
4. Piezo 1 lässt die Stange los.
5. Piezo 2 zieht sich zusammen. => Die Stange bewegt sich weiter vor.
6. Piezo 1 klemmt die Stange ein.
7. Piezo 3 lässt die Stange los.
8. Der Vorgang kann nun wiederholt werden.

Bei Umkehr der Klemmung wird die Bewegungsrichtung geändert. Da die Bewegung des Inchworms durch Piezos erfolgt, ist eine hohe Genauigkeit zwischen dem Umgreifen gegeben. Das Umgreifen selber führt je nach Geschwindigkeit und Belastung des Inchworms zu Abweichungen von einer linearen Fortbewegung. Diese Ungenauigkeiten sind in [FN00] näher untersucht worden. Die für die weiteren Betrachtungen wichtigen Erkenntnisse werden hier aufgeführt.

Zwischen zwei Umgreifaktionen dehnt sich Piezo 2 in ca. 10 nm Schritten um ca. $1,4 \mu\text{m}$ aus. Danach entsteht durch das Umgreifen eine Stufe, die nach Herstellerangaben ca. 100 nm, in Messungen aber bis zu 320 nm beträgt. Der Inchworm selber misst seine aktuelle Position über das Zählen eines Moireestreifenmusters mit einer Genauigkeit von ca. $1 \mu\text{m}$. Beim gezielten Anfahren einer Position kann es zu Ungenauigkeiten von bis zu $3 \mu\text{m}$ kommen. Diese Daten sind für einen Betrieb, wie er z.B. im Kohärenzradar notwendig wäre, nicht geeignet, da hier eine Genauigkeit von einem Bruchteil der verwendeten Wellenlänge zu erreichen ist. Zeitliches Phasenschieben, das, wie in Kapitel 2 beschrieben, auch einen Phasenvorschub vom Bruchteil einer Wellenlänge erfordert, ist mit dem Inchworm somit nicht mit genügender Genauigkeit durchzuführen. Da im Weiteren aber mit räumlichem Phasenschieben gearbeitet wird, muss die Genauigkeit des Inchworms nur größer als das Auflösungsvermögen der Lichtquelle sein. Die Repositionierung muss es erlauben, mit einer Abweichung von deutlich weniger als der Kohärenzlänge der Lichtquelle ein und dieselbe Position anzufahren. Bei einer Kohärenzlänge von mehr als $30 \mu\text{m}$ ist somit eine Genauigkeit im einstelligen μm -Bereich vollkommen ausreichend. Der Verfahrensweg von bis zu 5 cm

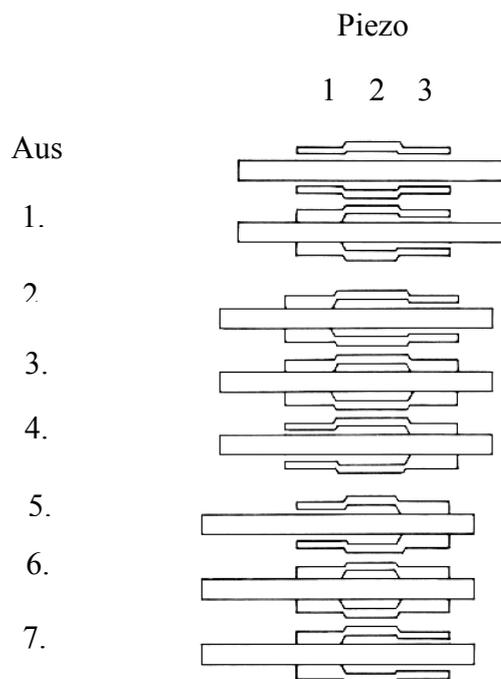


Abb. 4.5: Schematische Darstellung der Bewegung des Inch-Worms.

ermöglicht es, weiterhin flexibel auf unterschiedliche Messkonfigurationen einzugehen.

4.2.4 Detektor

Es wird, wie in Kapitel 2, eine Sony XC-75 als Kamera eingesetzt. Der CCD-Sensor dieser Kamera ist jedoch speziell für das nahe Infrarot optimiert. Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera ist in Abb. 4.6 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass nicht nur die Empfindlichkeit im NIR deutlich höher ist als die Empfindlichkeit der normalen XC-75.

Anstatt der CCD-Kamera kann auch eine Fotodiode als Detektor verwendet werden. Als Fotodiode wird das Model 2151 von New Focus verwendet. Seine höchste Empfindlichkeit hat der Detektor bei 900 nm. Die Fotodiode ist somit für den verwendeten Wellenlängenbereich geeignet. Die Fotodiode wird aufgrund Ihrer hohen Empfindlichkeit zur Eichung des Aufbaus in Kapitel 4.3 verwendet. Die Verstärkung beträgt 2×10^{10} V/A im DC Mode bei einem Frequenzgang von 0–750 Hz. Im AC High Mode beträgt die Verstärkung 2×10^{11} V/A bei einem Frequenzgang von 30-750 Hz. Der Frequenzgang bestimmt im Weiteren die Geschwindigkeit, mit der eine Messung durchgeführt werden kann. Die Sättigunglichtleistung beträgt 0.5 nW im DC Low und 0.05 nW im AC High Mode.

Die Kamera ist die wichtigere Komponente im LCSi-Aufbau, da nur mit ihr flächige Messungen und damit ESPI-Messungen möglich sind. Die Fotodiode kommt hauptsächlich bei der Justierung und Charakterisierung des Aufbaus zum Einsatz.

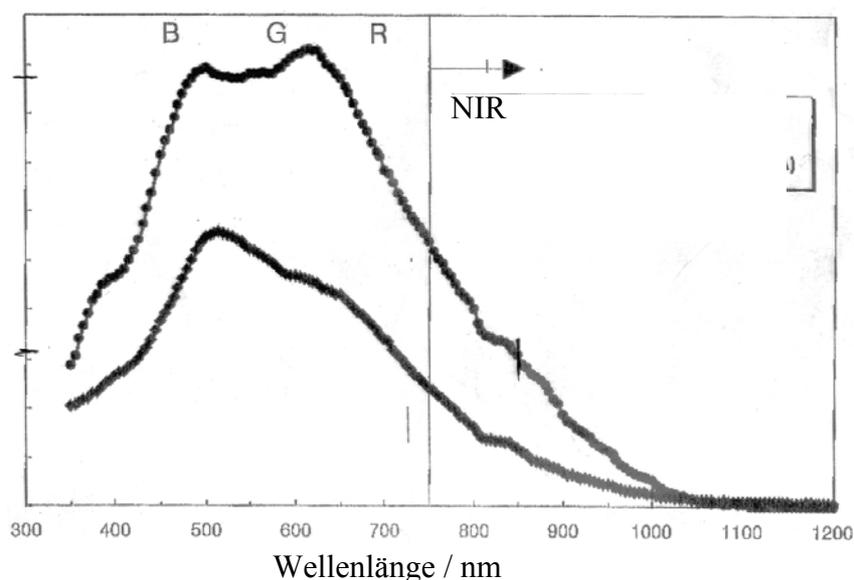


Abb. 4.6: Spektrale Empfindlichkeit der XC-75; oben: NIR-empfindlicher Sensor ICX 248 Al; unten: Standard Sensor ICX038DLA aus[So].

4.2.5 Fasern

Wie in [SS98] beschrieben, sind die Phasenfluktuationen, die in einer Standard Monomode Glasfaser bei Laborbetrieb auftreten, so gering, dass der Einsatz einer polarisationserhaltenden Faser nicht notwendig ist. Bei diesen treten eher noch Probleme auf. Es ist erforderlich, zu einem hohen Maße achskonform einzukoppeln. Gelingt dies nicht, so sind die auftretenden Phasenfluktuationen höher als bei nicht polarisationserhaltenden Fasern. Hinzu kommt, dass die Fasern eine langsame und eine schnelle Achse besitzen. Wird nicht alles Licht in einer Achse transportiert, so wird das Licht in der anderen Achse gegenüber diesem zeitlich verzögert. Dies führt dazu, dass es am Ausgang der Faser eine Verdoppelung der Kohärenzfunktion gibt. Selbst wenn optimal eingekoppelt wird, die Lichtquelle aber nicht vollkommen linear polarisiert ist, wird ein Teil des Lichts in die langsame Achse eingekoppelt. Zwei zeitlich versetzte Wellenfronten wirken wie zwei Signale, die aus unterschiedlichen Tiefen eines Objekts kommen. Eine eindeutige Zuordnung der Tiefe ist somit nicht mehr möglich.

4.3 Charakterisierung des Aufbaus

Nachdem im vorangegangenen Teil die wesentlichen Komponenten des Aufbaus im Einzelnen beschrieben wurden, wird hier auf ihr Zusammenspiel eingegangen. Es erfolgen zuerst punktweise Messungen mit der Fotodiode. Auf diese Weise sollen die grundlegenden Eigenschaften des Systems überprüft werden.

Es ist kein räumlicher Phasenshift eingestellt. Als Objekt wird ein Spiegel verwendet, um nur den Einfluss der einzelnen Komponenten aufeinander ohne den Einfluss eines Messobjektes zu bestimmen. Durch Änderung der Weglänge des Objektstrahls kann an der Fotodiode die Kohärenzfunktion aufgezeichnet werden. Die Signalentstehung entspricht Gl. 3.1. Das Signal gleicht somit dem Signal eines einzelnen Pixels im Kohärenzradar. Die lichtempfindliche Fläche am Detektor wird durch eine Blende mit einem Radius von $78\ \mu\text{m}$ begrenzt. Eine der mit dem Aufbau gemessenen Kohärenzfunktionen ist in Abb. 4.7 dargestellt. Die Kohärenzfunktion zeigt eine Kohärenzlänge von $78\ \mu\text{m}$. Damit ist sie deutlich höher als die aus den Spektren bestimmte Kohärenzlänge. Die Modulation im Maximum der Funktion beträgt nicht mehr 1. Dieser Effekt ist auf Dispersionsunterschiede zwischen Objekt- und Referenzstrahl zurückzuführen.

4.3.1 Dispersion

In [HD97] gehen die Autoren detailliert auf das Problem der Dispersion in OCT-Aufbauten ein. Um eine hohe Auflösung in der OCT zu erhalten, muss die Kohärenzlänge minimiert

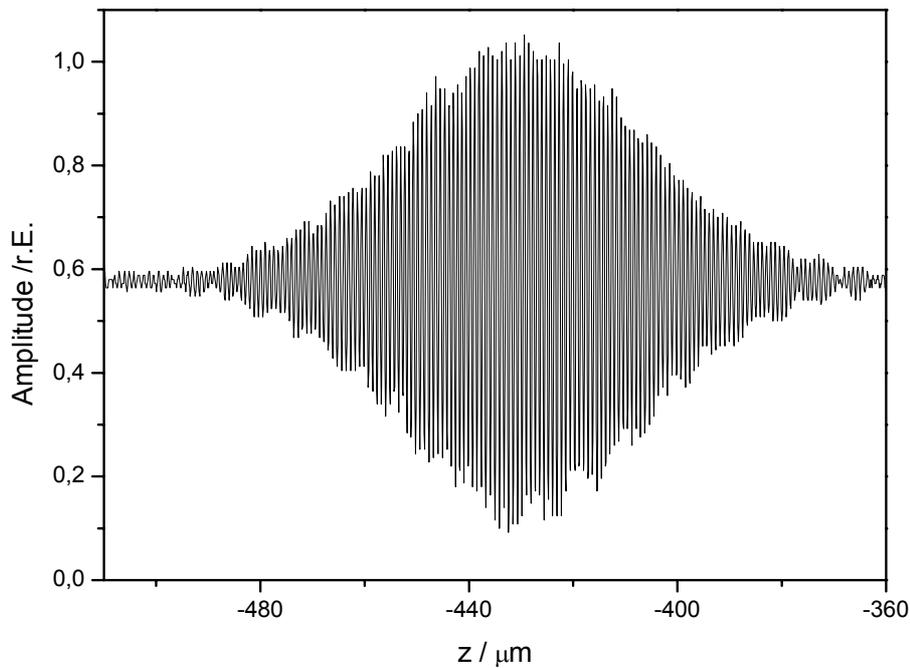


Abb. 4.7: Kohärenzfunktion bei Verwendung eines Spiegels als Objekt.

werden. Dies geht nur durch eine Verbreiterung des Spektrums der Lichtquelle. Aber je breiter das Spektrum wird, um so mehr macht sich der Einfluss der Dispersion bemerkbar. Der Brechungsindex aller Stoffe ist nicht für jede Wellenlänge gleich [BS78]. Normalerweise wird Licht mit einer kürzeren Wellenlänge stärker gebrochen. Dies ist gleichbedeutend damit, dass seine Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium kleiner ist als die von Licht mit einer größeren Wellenlänge. Für eine breitbandige Lichtquelle bedeutet dies, dass die Wellenzüge auseinander wandern. In einem Interferometer, in dem in einem Strahlengang das Licht einen längeren Weg durch ein dispersives Medium zurücklegt als durch den anderen Strahlengang, passen die Wellenzüge nicht mehr exakt übereinander. Die entstehende Korrelationsfunktion wird breiter und ihre Modulation sinkt. Eine Verbreiterung der Korrelationsfunktion ist aber gleichbedeutend mit einem Auflösungsverlust.

Für die OCT bedeutet dies:

1. Im Interferometer müssen dispersive Effekte ausgeglichen werden.
2. Die Dispersionseinflüsse durch das Untersuchungsobjekt müssen abgeschätzt werden.

In Kapitel 3.1.4 wird bei der Zuordnung der Tiefe in einem Objekt von dem optischen Weg ausgegangen. Die optische Weglänge d_o , die das Licht zurückgelegt hat, ist aber nicht gleich der geometrischen Weglänge d_g im Medium. Es muss immer noch der Brechungsindex n berücksichtigt werden. Da hier aber nicht mit rein monochromatischem Licht gearbeitet wird und der Brechungsindex eines Materials mit der Wellenlänge λ variiert, ist der Gruppenbrechungsindex n_g zu verwenden. Der Zusammenhang ist

$$d_g = \frac{d_o}{n_g}, \quad (4.1)$$

wobei sich n_g aus

$$n_g = n \cdot \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (4.2)$$

berechnen lässt. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Kohärenzlänge, die sich aus

$$l_{kn} = \sqrt{l_k^2 + \left(\frac{dn_g}{d\lambda} d_g \Delta\lambda \right)^2} \quad (4.3)$$

ergibt. In dieser Gleichung ist l_{kn} die Kohärenzlänge nach Durchlauf einer dispersiven Strecke der Länge d_g . Die Vergrößerung der Kohärenzlänge ist darauf zurückzuführen, dass sich, wie in Gl. 4.2 beschrieben, der Brechungsindex n mit der Wellenlänge λ ändert. Unterschiedliche Wellenlängen breiten sich somit im dispersiven Medium unterschiedlich schnell aus. Wie stark dieses Auseinanderlaufen ist, hängt von der Änderung des Brechungsindex n_g bei der Mittenwellenlänge λ_0 des eingestrahlten Lichts und dessen Halbwertsbreite $\Delta\lambda$ ab. Je größer die Ableitung von n_g nach λ ist, um so schneller vergrößert sich die Kohärenzlänge l_{kn} . Je größer die Halbwertsbreite $\Delta\lambda$ ist, um so größer ist der Brechungsindexunterschied zwischen der größten und der kleinsten vorkommenden Wellenlänge und um so schneller vergrößert sich auch hier die Kohärenzlänge l_{kn} .

Im verwendeten Aufbau ist die Glasmenge in den beiden Strahlengängen von vornherein nicht exakt bekannt. Die Länge der verwendeten Fasern kann zwar aufeinander abgestimmt werden, jedoch ist die im Mikroskop verwendete Glasmenge nicht bekannt. Da die Kohärenzlänge länger geworden ist, wird durch Einbringen von BK7 Glas in den Referenzstrahl die dispersive Strecke d_g verändert. In Abb. 4.8 ist die Kohärenzlänge über der

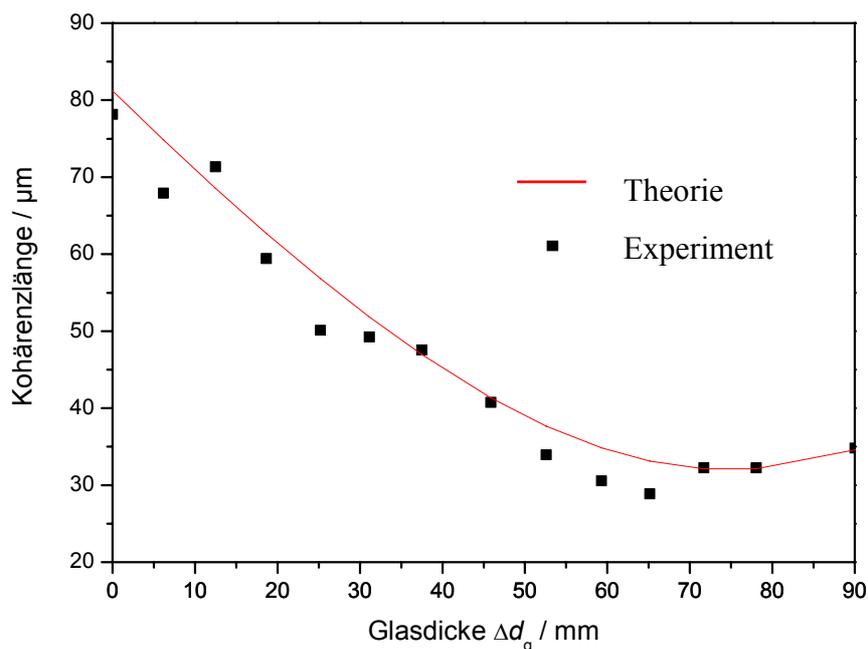


Abb. 4.8: Kohärenzlänge im Aufbau bei Variation der Glasmenge im Referenzstrahl. Die Werte aus dem Experiment können bestenfalls mit einer Genauigkeit von $6 \mu\text{m}$ bestimmt werden.

Änderung der Glasmenge Δd_g im Referenzstrahl aufgetragen. Zum Vergleich ist der nach Gl. 4.3 theoretisch zu erwartende Verlauf eingezeichnet, wenn die Werte der verwendeten SLD eingesetzt werden. Als $\frac{dn_g}{d\lambda}$ für BK7 Glas wird der im Artikel [HD97] verwendete Wert von $-5 \cdot 10^{-5} \text{ nm}^{-2}$ bei $\lambda_0 = 830 \text{ nm}$ eingesetzt. In dem Artikel wird die gleiche Lichtquelle wie in dem hier beschriebenen Aufbau benutzt.

Zum einen ist gut zu erkennen, wie dicht Messung und Theorie zusammen liegen, zum anderen kann abgelesen werden, dass die Differenz der Glasmengen in Objekt- und Referenzstrahl ca. 7,5 cm beträgt. Durch eine Anpassung der Längen der Glasfasern wird dieser Unterschied ausgeglichen. Die daraus resultierende Kohärenzfunktion ist in Abb. 4.9 dargestellt. Die Verbesserung in der Modulation und die Verringerung der Kohärenzfunktion im Vergleich zu Abb. 4.7 sind deutlich zu erkennen. Aus Abb. 4.8 ist aber noch eine weitere Information abzulesen. Gerade wenn die Dispersion ausgeglichen ist, haben kleine dispersive Strecken kaum eine Auswirkung auf die Kohärenzfunktion. Strecken in der Größenordnung von 1 mm, wie sie bei der Messung an Objekten vorkommen, spielen eine vernachlässigbare Rolle.

4.3.2 Punktweise Messungen

Nachdem die Dispersion ausgeglichen ist, werden jetzt verschiedene Objekte in den Objektstrahl gestellt und ihre Struktur vermessen. Zunächst wird wieder punktweise gemessen

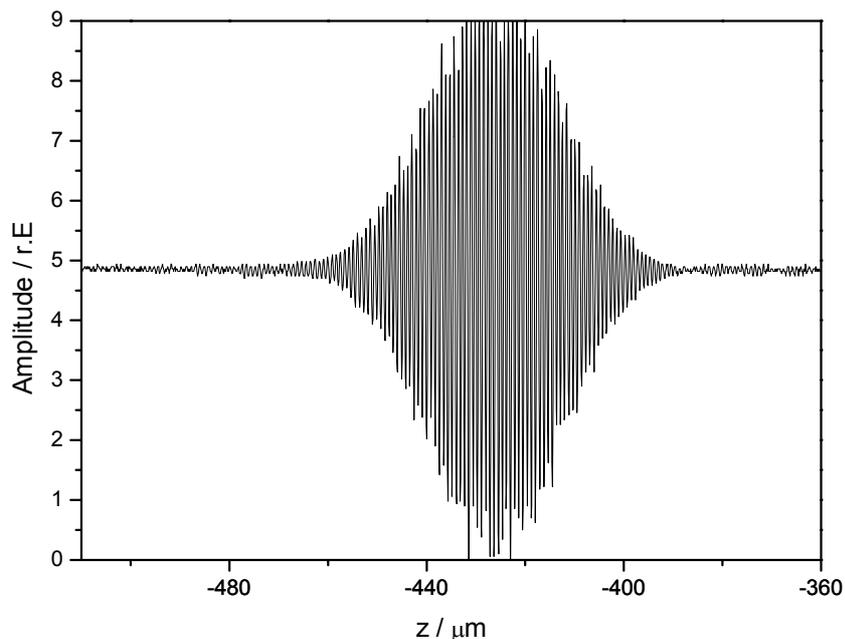


Abb. 4.9: Kohärenzfunktion nach Ausgleich der Dispersion in Referenz- und Objektstrahl.

und die dazugehörigen Korrelogramme dargestellt. Diese Messungen dienen dazu, um die Untersuchungsobjekte für die weiteren Messungen genauer kennen zu lernen

Das erste Testobjekt, dargestellt in Abb. 4.10, besteht aus zwei Schichten: einer Glasplatte, deren obere Seite angeraut wird, und einer darunter liegenden, mit weißem Lack besprühten Metallschicht. Die Glasplatte kann gekippt und die Metallplatte mittels einer Schraube verbeult werden. Dieses Objekt wird später auch für schichtenselektive Verformungsmessungen genutzt. In Abb. 4.11 ist die Tiefenmessung dargestellt. Der Reflex an der rauhen Glasplatte ist kleiner als der Reflex der glatten Rückseite des Glases. Mit einem Brechungsindex $n = 1,5$ für Glas errechnet sich die Glasdicke aus dem Abstand der beiden Reflexe zu etwas mehr als 1 mm. Die geweißte Metallplatte liegt ca. 2,5 mm hinter der Glasscheibe. Der Reflex hier sieht deutlich ausgeschmierter als die Reflexe von der Glasplatte aus, was daran liegt, dass die Lackschicht als Volumenstreuer zu betrachten ist. Ein ähnlicher Effekt wird am nächsten Objekt untersucht.

Das zweite Objekt ist ein Federblech, das mit einem matten, weißen Lack besprüht wird. Eine der Messungen ist in Abb. 4.12 dargestellt. Zu erwarten ist ein exponentielles Abfallen des Signals über der Tiefe x aufgrund der Absorption und evtl. ein Signalpeak in der Tiefe, in der der Übergang zwischen Lack und Metall erfolgt. Zu sehen ist jedoch nach einem ersten Signal, welches von der Oberfläche zu kommen scheint, ein Abfallen der Modulation auf null und daran anschließend ein Signal, das größer als das erste ist. Die Lackschicht selber ist ca. 25 μm dick, wie es sich aus Abb. 4.13 herleiten lässt.

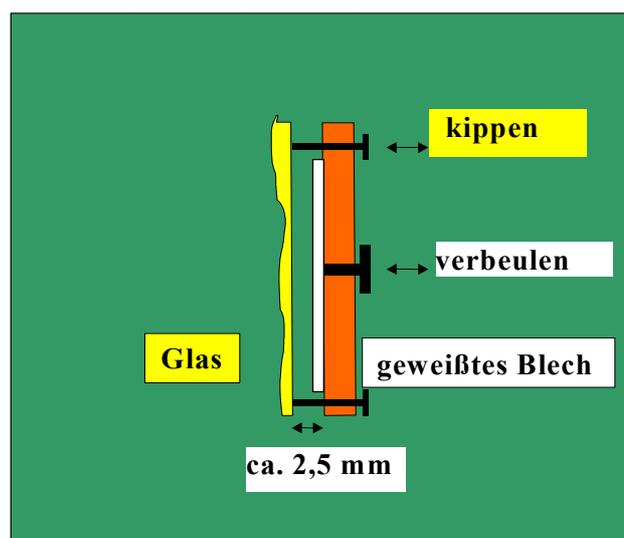


Abb. 4.10: Skizze eines Testobjekts.

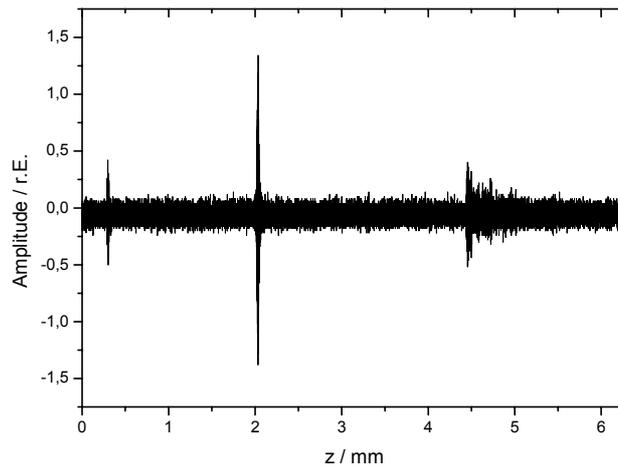


Abb. 4.11: Tiefenmessung an dem in Abb. 4.10 dargestellten Testobjekt.

Dieser Wert wird mit einem optischen Profilometer bestimmt. Es funktioniert über eine Fokusfehlerfunktion, indem während einer Messung Licht mit einer Linse auf die zu untersuchende Oberfläche fokussiert wird. Eine zu vermessende Oberfläche kann nun unter diesem Fokus in $x - y$ - Richtung hindurch gefahren werden. Ist die Oberfläche nicht mehr im Fokus der verwendeten Linse, so wird die Linse nachgeführt. Der Weg z , den die Linse verfahren werden muss um die Oberfläche im Fokus zu halten, gibt direkt die Topographie der Oberfläche an. Näheres zu diesem Verfahren ist in [GS00] nachzulesen.

Obwohl die Messung eine Dicke der Lackschicht von nur ca. $25 \mu\text{m}$ ergibt, ist noch mehr als $500 \mu\text{m}$ unterhalb der Oberfläche ein Signal zu erkennen. Mit ähnlichen Effekten beschäftigen sich die Autoren von [HB98]. Sie kommen zu dem Schluss, dass, wenn sich

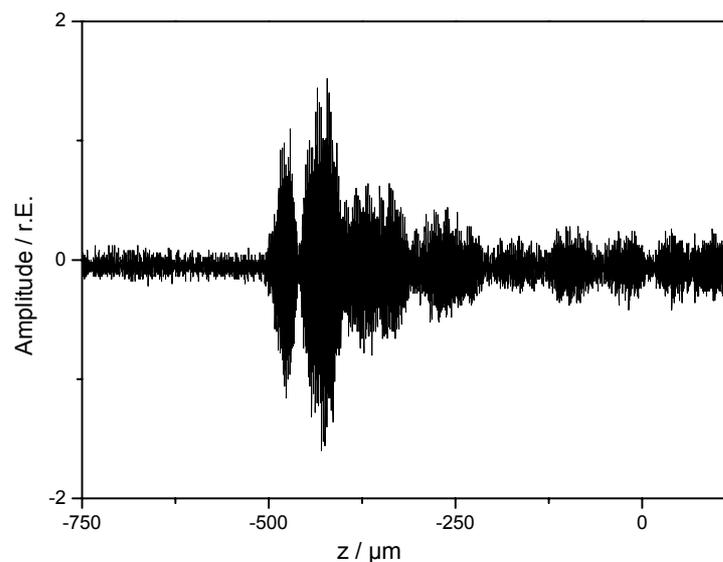


Abb. 4.12: Tiefenprofil, gemessen an einem geweißten Federblech.

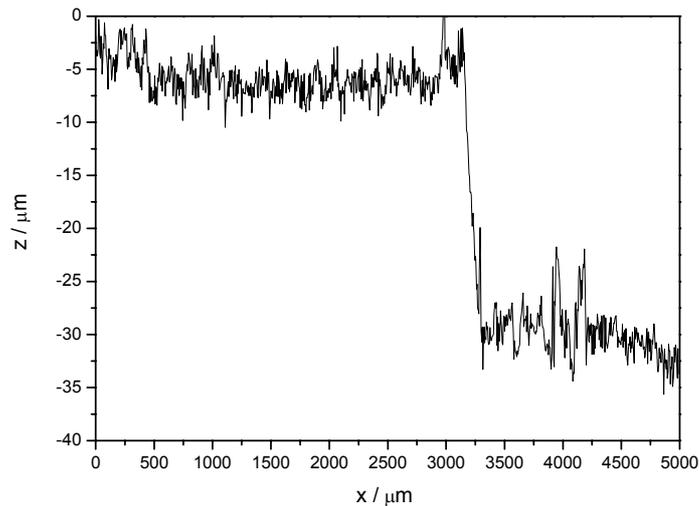


Abb. 4.13: Profilometermessung an der Kante der Lackschicht auf dem geweißten Federblech.

zwei Signale aus unterschiedlichen Tiefen überlagern und zwischen diesen Signalen ein dispersives Medium liegt, die Überlagerung der beiden Signale zu einer Schwebung führen kann. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass sich das von der Oberfläche kommende Signal gerade noch mit dem am Metall reflektierten Licht überlagert und es so zu einem Einbruch in der Kohärenzfunktion kommt. Die kleineren Signale, die von der Tiefe her aus dem Metall zu kommen scheinen, lassen sich durch Vielfach-Reflexe zwischen Lackoberfläche und Metallschicht erklären.

Eine punktweise Tiefenmessung wird auch an einem Terrakotta-Fragment durchgeführt. Die Messung ist in Abb. 4.14 zu sehen. Ähnlich, wie bei der geweißten Metallplatte, sind hier mehrere Signale hintereinander zu erkennen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Kapitel 3

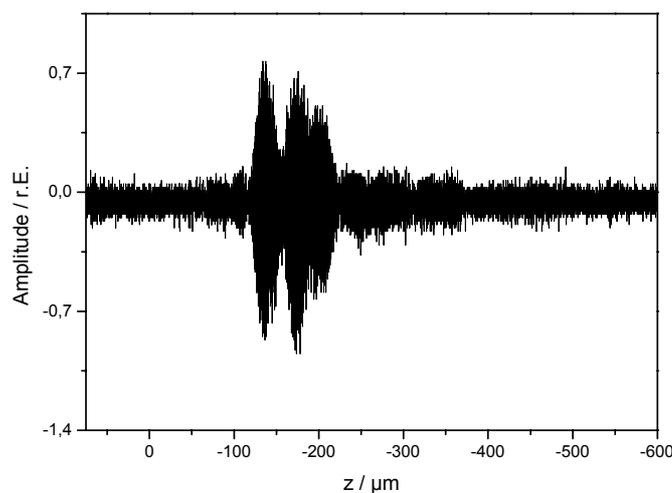


Abb. 4.14: Tiefenmessung an einem Terrakotta-Fragment.

zeigt ein ähnliches Signal, wie es auch dort gemessen wurde. Der Abstand der einzelnen Peaks entspricht in etwa der in Kapitel 3 abgeschätzten Dicke der Lackschichten von $50 \mu\text{m}$. Der genaue Abstand würde sich wieder bei Kenntnis des Brechungsindex berechnen lassen, liegt aber unter $50 \mu\text{m}$. Für einen Brechungsindex von 1,5 wäre der Abstand der Schichten etwas größer als $30 \mu\text{m}$.

In der vorliegenden Messung ist die Auflösung und damit die Trennung der Signale deutlich schlechter als z.B. bei der Kohärenzradarmessung in Abb. 3.8 an einer ähnlichen Lackschicht. Dies liegt daran, dass die dort verwendete Lichtquelle eine fast 3-mal kürzere Kohärenzlänge hat.

4.3.3 Fazit der punkweisen Messungen

Bei den Messungen unter Verwendung einer Fotodiode hat sich wie erwartet gezeigt, dass Strukturen, die deutlich weiter als die Kohärenzlänge auseinander liegen, gut vermessen werden können. Liegen die Strukturgrößen jedoch in der Größenordnung der Kohärenzlänge, kann es zu einer Überlagerung der Kohärenzfunktionen kommen.

4.3.4 Flächige LCS-Strukturmessungen

In diesem Kapitel geht es um die eigentliche Nutzung des LCS-Systems. Die Nutzung als flächig messendes System. Hierfür wird die Fotodiode gegen die Kamera eingetauscht. Es wird ein räumlicher Phasenshift eingestellt, wie in Kapitel 2.2 beschrieben. Die bei Verwendung der SLD als Lichtquelle aufgenommenen Bilder entsprechen nun Gl. 2.16.

Um jedoch den Effekt, dass nur das Licht aus einer bestimmten Tiefe zur Messungen genutzt werden kann, zu berücksichtigen, muss bei der Bestimmung der Fouriertransformierten des Interferogramms die bisher gemachte Vereinfachung einer unendlich hohen Kohärenzlänge eingeschränkt werden. Eine Betrachtung von Gl. 2.17 unter der Annahme einer begrenzten Kohärenzlänge erfordert einen Kohärenzfaktor γ_k , wie er in Abb. 4.15 dargestellt ist. Im

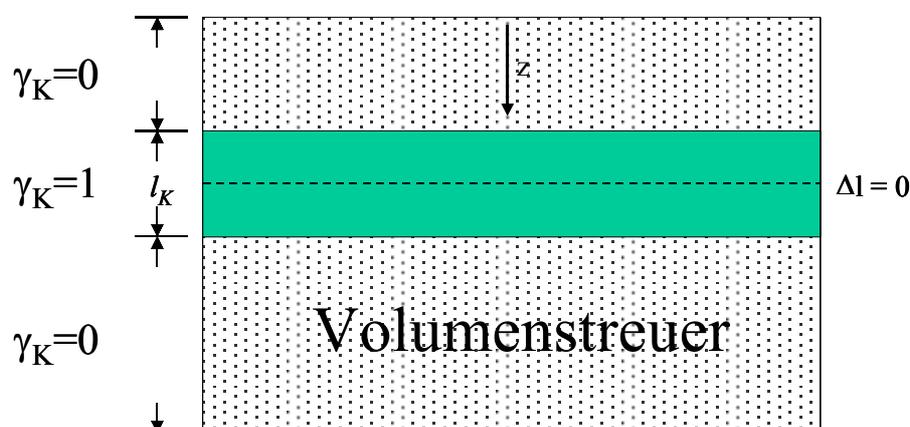


Abb. 4.15: Schematische Darstellung der kohärenten Zone in einem Volumenstreuer bei begrenzter Kohärenzlänge.

einfachsten Fall ist $\gamma_k = 1$, wenn die Wegdifferenz zwischen Objekt- und Referenzstrahl kleiner als die Kohärenzlänge der Lichtquelle ist. In allen anderen Fällen ist sie Null. Damit ist Gl. 2.18 für ein $\Delta l < l_K$ gültig. Ansonsten ergibt sich kein Seitenband im Spektrum, sondern nur die betragmäßige Addition von Objekt- und Referenzlicht, die als Specklehalo mit hellem Punkt in der Mitte erscheint.

Wenn bei der FTM die Rückverschiebung des Seitenbandes erfolgt, bedeutet dies, dass nicht das gesamte zugrundeliegende Specklemuster, sondern nur ein kleiner Teil des Objektlichts aus dem Bereich $\Delta l < l_K$ rekonstruiert wird. Dieser Bereich entspricht der zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Kohärenzschicht. Das Gleiche gilt für die Berechnung der Phase ϕ .

Es ist somit möglich, das Licht aus unterschiedlichen Tiefen eines Objektes zu rekonstruieren, was direkt zu OCT-Messungen führt oder aber die Phase des Lichtes aus einer bestimmten Tiefe zu rekonstruieren und dies für zwei unterschiedliche Objektzustände, was ESPI-Messungen ermöglicht. In Abb. 4.16 links ist ein Specklemuster dargestellt, wie es bei der Beleuchtung eines Objektes mit einer kurzkohärenten Lichtquelle entsteht, wenn das Objekt eine Rauigkeit aufweist, die größer als die Kohärenzlänge ist. In diesem Fall handelt es sich um eine mit Kreide besprühte Metallplatte. Die Kreideschicht ist dicker als die Kohärenzlänge der Lichtquelle. Das dazugehörige Histogramm zeigt, dass die Intensitätsverteilung im Specklemuster keiner Exponentialverteilung folgt, wie es für ein kohärentes Specklemuster in

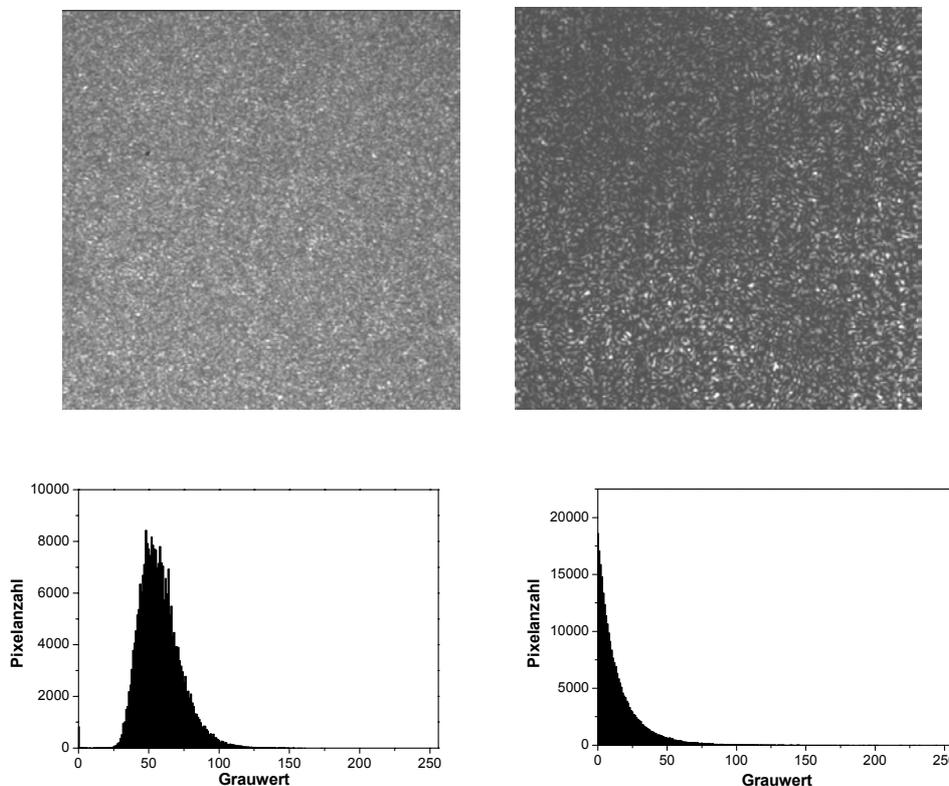


Abb. 4.16: Links: Specklemuster, wie es bei der Beleuchtung eines Volumenstreuers mit einer Lichtquelle mit begrenzter Kohärenzlänge entsteht. Rechts: Specklemuster, wenn durch die FTM nur der kohärente Anteil berücksichtigt wird. Unten: Zugehörige Histogramme.

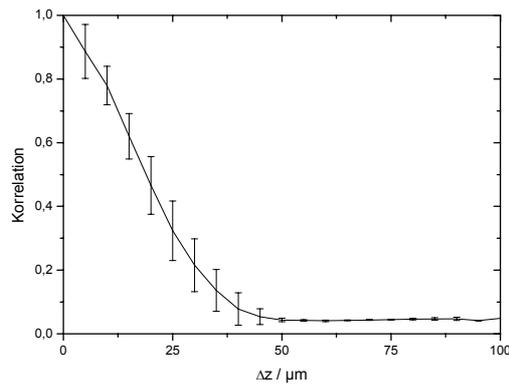


Abb. 4.17: Links: Korrelation von aus der Tiefe z rekonstruierten Specklebildern aufgetragen über ihren Abstand in z -Richtung Δz .

Kapitel 2 vorhergesagt wurde. Es handelt sich hier um die inkohärente Überlagerung mehrerer Specklemuster [Goo75].

Wird nun die Intensität nach der FTM rekonstruiert, so wird nur das Licht aus dem in Abb. 4.15 grün markierten Bereich, also nur der kohärente Anteil, rekonstruiert. Das daraus resultierende Specklemuster ist in Abb. 4.16 rechts dargestellt. Das dazugehörige Histogramm zeigt die erwartete Exponentialverteilung der Intensitäten. In dem rekonstruierten Specklebild fallen mehrere senkrechte, parallele Streifen auf. Diese Streifen entstehen durch eine nicht perfekte Synchronisation der verwendeten Kamera. Die XC-75 schickt ein analoges Signal zum Rechner. Dort wird es digitalisiert, in dem jedem Pixel im Bild ein bestimmtes Stück aus dem analogen Signal zugeordnet wird. Ist diese Übertragung nicht absolut pixelsynchron, so kann es zu den zusätzlichen parallelen Streifen kommen. Die Modulation kann in Abb. 4.16 zwar deutlich erkannt werden, ihre Amplitude ist jedoch deutlich geringer als das Messsignal und kann bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden.

In Abb. 4.17 ist eine weitere Messung an einem mit Kreide besprühten Objekt dargestellt. Es werden alle $2 \mu\text{m}$ entlang der z -Achse Interferogramme aufgenommen und das Objektlicht rekonstruiert. Die resultierenden Bilder werden miteinander korreliert. Dies wird für verschiedene Anfangswerte von z durchgeführt.

Diese Messung stellt noch einmal die z -Auflösung des Systems da. Bereiche, die weniger als $50 \mu\text{m}$ optischen Weg auseinander liegen, zeigen noch eine Korrelation. Je dichter die Gebiete zusammenliegen, um so höher ist ihrer Korrelation.

Für eine LCS-Verformungsmessung bedeutet dies, dass auch noch Schichten, die $50 \mu\text{m}$ auseinander liegen, miteinander wechselwirken. Gebiete mit einem Abstand, der größer ist als die Kohärenzlänge von $30 \mu\text{m}$, sind jedoch nur noch zu weniger als 20 % korreliert. Der Einfluss auf eine Messung ist damit als sehr gering einzuschätzen. Es ist aber zu erkennen, dass die Annahme eines Kohärenzfaktors γ_k , der bei Wegunterschieden von mehr als der Kohärenzlänge gleich Null ist, nur eine Näherung ist.

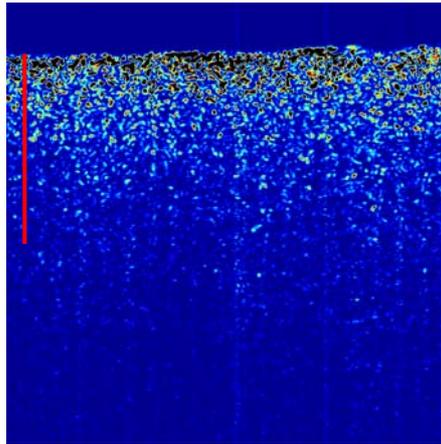


Abb. 4.18: 2-D-Tiefenprofil, gemessen an einem Korundblock. Die Länge und die Tiefe des Schnitts betragen jeweils ca. 1 mm.

Ein Resultat aus dieser Messung ist, dass der begrenzende Faktor in z-Richtung für die Korrelation hier nicht mehr die Specklelänge ist, wie sie es in Kapitel 2.32 ist, die sich bei einer Vergrößerung von 6,4 und einer Wellenlänge von $\lambda_0 = 840 \text{ nm}$ nach Gl. 2.36 zu $232 \text{ }\mu\text{m}$ berechnet, sondern eindeutig die begrenzte Kohärenzlänge der Lichtquelle mit $l_k = 30 \text{ }\mu\text{m}$.

Eine weitere Möglichkeit der Darstellung der aus einer definierten Tiefe z reflektierten Lichtintensität ist die Darstellung eines Tiefenschnitts. Hierzu wird in regelmäßigen Abständen z.B. alle $4 \text{ }\mu\text{m}$ in der Tiefe ein Interferogramm aufgenommen und die Intensitäten in diesem Bild berechnet. Wird nun zu jeder Tiefe die gleich Zeile bzw. Spalte eines Bildes genommen, so ergibt sich ein Schnitt der Intensitäten aus unterschiedlichen Tiefen eines Objekts. Zur Demonstration wird als Objekt ein Block aus Korund verwendet. Die Länge des in Abb. 4.18 dargestellten Schnittes ist ca. 1 mm. Die Tiefe z beträgt ebenfalls 1 mm. Die Farbkodierung ist wie in Abb. 3.12 gewählt. Es ist zu erkennen, dass das meiste Licht von der

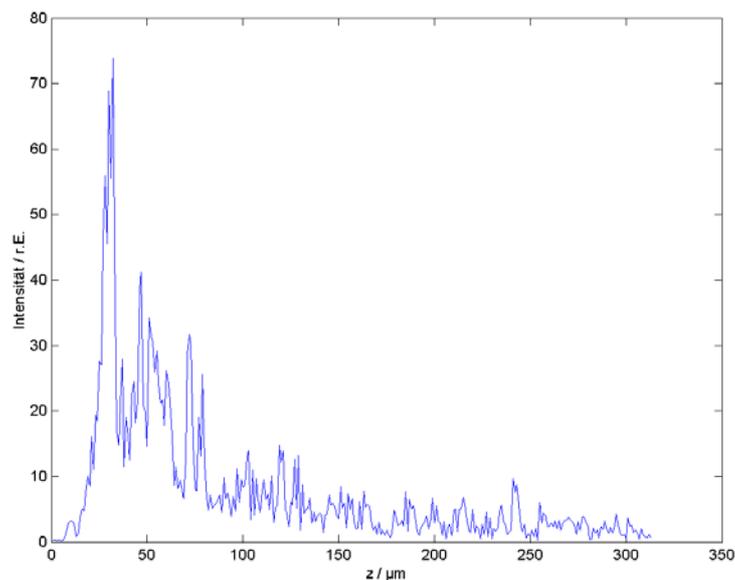


Abb. 4.19: Schnitt (1-D-Tiefenprofil) durch das in Abb. 4.22 dargestellte 2-D-Tiefenprofil.

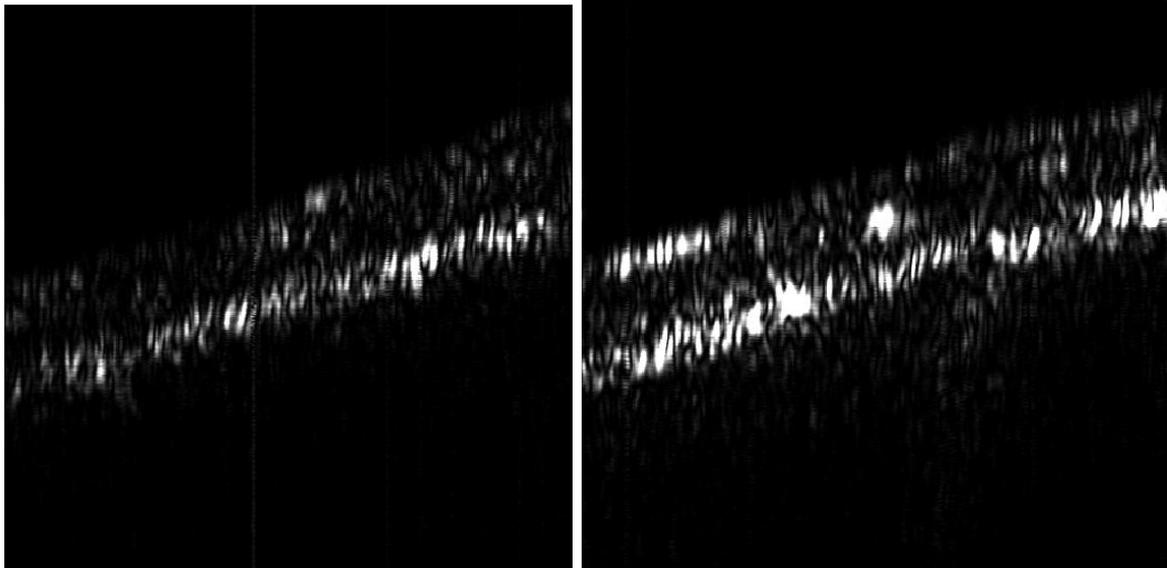


Abb. 4.20: 2-D-Tiefenprofil an einer auf Glas aufgetragenen Lackschicht. Links: Ohne Polfilter. Rechts: Mit Polfilter vor dem CCD-Sensor. Gemessen an exakt der selben Position.

Oberfläche reflektiert wird. Danach nimmt die Intensität mit der Eindringtiefe ab. In Abb. 4.19 ist ein Schnitt durch die Messung dargestellt. Der Schnitt erfolgt entlang der rot eingezeichneten Linie in Abb. 4.18. Die Messung ist durch Speckle stark verrauscht, zeigt aber tendenziell ein exponentielles Abfallen mit der Eindringtiefe. In der OCT ist dieses Speckle-Rauschen ein unerwünschtes Übel und wird z.B. durch Mittelungsverfahren reduziert [BR00].

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der ausgenutzt werden kann, um die Dynamik des Systems zu verbessern, ist die Polarisation des Lichts. Es ist durch den Einsatz eines Polfilters möglich, Streulicht zu unterdrücken. Um eine hohe Dynamik des Systems zu gewährleisten, muss möglichst alles Licht, das keine Information für die Messung liefert, vor dem Erreichen der Kamera ausgeblendet werden. Licht, das mehrfach gestreut wird, enthält nicht mehr die gewünschte Tiefeninformation, es ändert aber zumeist auch seine Polarisationsrichtung. Dieses Licht kann mit einem Polfilter, der in Richtung der Polarisation des eingestrahnten Lichts ausgerichtet ist, abgeblockt werden.

In Abb. 4.20 ist dargestellt, wie der Einsatz eines Polfilters die Messung verbessert. Gemessen wird an einer mit HEMA gefestigten Lackschicht, aufgebracht auf einen Objektträger aus Glas. Es werden nur Graustufen dargestellt, damit die Auswirkungen des Polfilters besser zu beurteilen sind. Die Zuordnung der Graustufen zu den Intensitätswerten erfolgt linear. In beiden Bildern, in Abb. 4.20 links ohne Polfilter und in Abb. 4.20 rechts mit Polfilter, werden dieselben Grauwerte benutzt. Bei Verwendung des Polfilters ist die Trennung zwischen erwünschtem und unerwünschtem Licht deutlich besser. Für beide Bilder wird die gleiche Intensität im Objekt- und im Referenzstrahl gewählt. Bei Verwendung des Polfilters wird zur Erreichung des gleichen Helligkeitswerts auf dem CCD-Sensor, wie ohne Polfilter, mehr

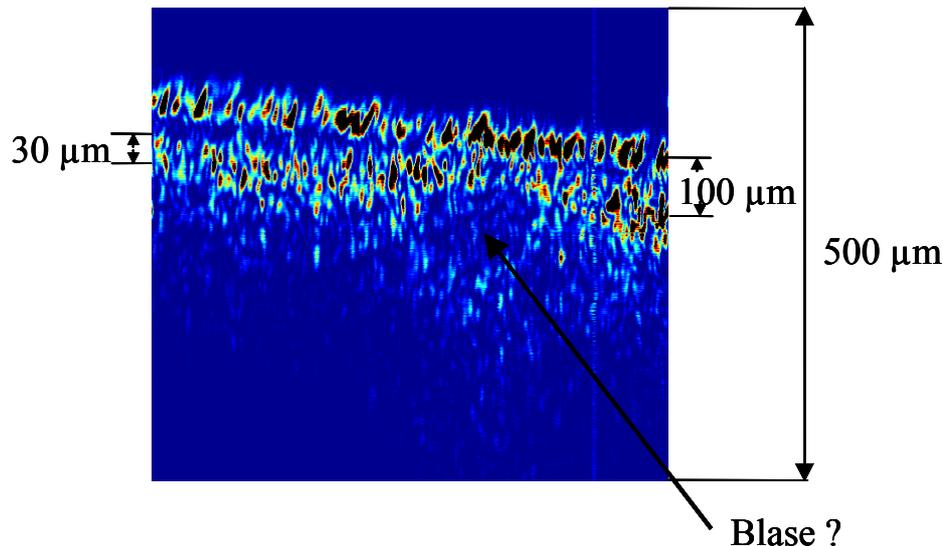


Abb. 4.21: 2-D-Tiefenprofil gemessen an F012/98. Länge des Profils ca. 1 mm, Tiefe ca. 500 μm . Der Abstand der beiden zu detektierenden Schichten beträgt ca. 100 μm . Die Markierung mit einer Breite von 30 μm zeigt exemplarisch eine mögliche Kohärenzschicht an. Unter der zweiten Lackschicht könnte an der eingezeichneten Stelle eine Blase liegen, die die Lackschichten hochdrückt.

Licht von der SLD benötigt, da ein großer Teil des Streulichtes nicht mehr zu dem Signal auf dem CCD-Sensor beitragen kann. Das Licht, das nun den CCD-Sensor durch den Polfilter hindurch erreicht, ist zu einem größeren Anteil Nutzlicht. Die Modulation auf dem CCD-Sensor steigt und die errechneten Intensitäten werden größer. Die Dynamik des Systems steigt.

Ohne Polfilter ist der Übergang zwischen Luft und Lackschicht in Abb. 4.20 nur teilweise zu sehen. Strukturen in der Lackschicht sind nur zu erahnen. Mit dem Polfilter ist der Verlauf zwischen der Grenzschicht Luft zu Lack und dem Übergang Lack zu Glas gut zu erkennen. Der Einsatz eines Polfilters erhöht somit den Dynamikbereich des Systems, da das Verhältnis von Nutzlicht zu Streulicht verbessert wird.

In Abb. 4.21 ist eine Tiefenmessung an dem mit PEG/PU behandelten Fragment F012/98 dargestellt. Die Länge des Schnitts ist 1 mm, die Tiefe, bis zu der gemessen wird, ist 500 μm . Die Farbkodierung der Intensitäten erfolgt, wie in Kapitel 3 in Abb. 3.12, von schwarz über rot und gelb nach blau. Es sind deutlich zwei Schichten zu erkennen. Ihr Abstand beträgt zumeist ca. 70 - 100 μm . In einem kleinen Bereich berühren sich die Schichten beinahe. Hier scheint sich unter der Oberfläche eine Blase zu befinden.

Weiß gestrichelt ist ein 30 μm tiefer Bereich eingezeichnet, der die Orientierung der Kohärenzschicht darstellt. Bei einer Verformungsmessung könnte nicht an nur einer Schicht gemessen werden, da die Schichten schief zu der Kohärenzschicht liegen. Die Probe müsste so nachjustiert werden, dass die zu vermessende Schicht parallel zu der Kohärenzebene in der Kohärenzschicht liegt. Selbst dann könnte die untere Schicht nicht ganz erfasst werden, da der Bereich bei der Blase einen zu großen Höhenunterschied aufweist.

Wie zu erwarten, ähnelt diese Messung sehr der OCT-Messung in Abb. 3.12. Der Verlauf der Lackschichten ist ähnlich gut zu detektieren. Es bleibt zu erwähnen, dass der hier dargestellte Schnitt nur ein Teil der Messung ist. Da mit der Kamera für jede Tiefe ein 2-D-Bild aufgenommen wird, steht am Ende der Messung die Information für ein $1 \times 1 \times 0,5 \text{ mm}^3$ großes Volumen zur Verfügung. Ein weiterer Unterschied zu gängigen OCT-Messungen ist, dass die Intensität aus einer definierten Tiefe aus einer einzelnen Aufnahme gewonnen werden kann.

Im rechten Bereich des Bildes ist kaum erkennbar eine senkrechte Linie zu sehen. Sie ist ein Artefakt, das auf einen unsauberen Referenzstrahl zurückzuführen ist.

Für Strukturmessungen hat sich wie erwartet gezeigt, dass der limitierende Faktor für die z-Auflösung die Kohärenzlänge ist, sowohl für punktweise als auch für flächige Messungen. Im nächsten Abschnitt wird untersucht, wie die Kohärenzlänge Verformungsmessungen an geschichteten Objekten beeinflusst.

4.4 LCS-Verformungsmessungen

Eine erste Messung, bei der die Kombination aus Kurzkohärenzlichtquelle und phasensensitiver Verformungsmessung ausgenutzt wird, wird mit der CCD-Kamera als Detektor durchgeführt. An einer Metallplatte, in die das Wort Holo eingeritzt und die dann mit Kreidespray besprüht wird, soll zuerst die Tiefe der eingeritzten Buchstaben bestimmt werden. In Kapitel 2 ist in Gl. 2.8 die entstehende Intensität auf einem CCD-Sensor beschrieben, wenn die Kohärenzlänge der Lichtquelle unendlich ist. Wenn nun das Messobjekt verkippt wird und ein zweites Interferogramm aufgenommen und von dem ersten abgezogen wird, entstehen Korrelationsstreifen. Ist die Kohärenz der Lichtquelle begrenzt, so entstehen nur in den Bereichen Korrelationsstreifen, in denen die Weglängendifferenz zwischen Objekt- und Referenzstrahl kleiner als die Kohärenzlänge ist. Es werden zuerst die Weglängen zwischen Objekt- und Referenzstrahl so eingestellt, dass sich das Licht von der Oberfläche des Objekts kohärent mit dem Licht des Referenzstrahl überlagert. Es können nun, z.B. durch Verkipfung des Objekts, Korrelationsstreifen auf der Oberfläche des Untersuchungsobjekts erzeugt werden. Das Gleiche kann dann in den eingeritzten Buchstaben erfolgen, in dem die Weglängen nun so angepasst werden, dass das Licht aus den Buchstaben kohärent mit dem Referenzstrahl überlagert wird. Aus der Wegdifferenz, die notwendig ist, das Kohärenzgebiet einmal auf die Oberfläche und einmal auf die Buchstaben einzustellen, kann direkt die Tiefe der Buchstaben abgelesen werden. Die Messung ist in Abb. 4.22 dargestellt. Der Ausschnitt ist ca. 0,5 cm hoch und etwas mehr als 1 cm breit. Die Buchstaben liegen 1,6 mm tiefer als die Oberfläche. Bei dieser Messung handelt es sich grundsätzlich schon um eine tiefenselektive Verformungsmessung. Zwar wird das Objekt im Ganzen verkippt, jedoch wird diese Verkipfung nur in den Gebieten detektiert, in denen es zu einer kohärenten Überlagerung von Objekt- und Referenzstrahl kommt.

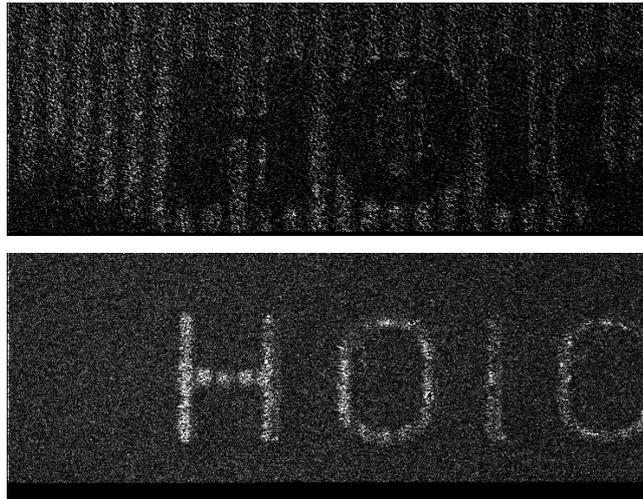


Abb. 4.22: Korrelationsstreifen bei Verwendung einer SLD als Lichtquelle. Durch eine Kippung werden etwas mehr als 20 Korrelationsstreifen erzeugt. Die Bildbreite beträgt ca. 1 cm. Die Tiefe der Buchstaben beträgt ca. 1,6 mm.

Als nächste Messung wird ein weiteres Testobjekt vermessen, das Abb. 4.10 mit einer Veränderung entspricht. Anstatt der Glasscheibe wird ein Stück Papier als oberste Schicht verwendet. Die Messergebnisse sind in Abb. 4.23 dargestellt. Es geht hier darum, die Leistungsfähigkeit des Aufbaus an einem bekannten System zu demonstrieren. Deshalb wird zunächst als Lichtquelle die DBR-LD verwendet. Diese Messung ist auf der linken Seite von Abb. 4.23 zu sehen. Wird die oberste Papierschicht verkippt, kann das resultierende Sägezahnbild, zu sehen in Abb. 4.23 links oben, sehr gut ausgewertet werden. Wird aber die

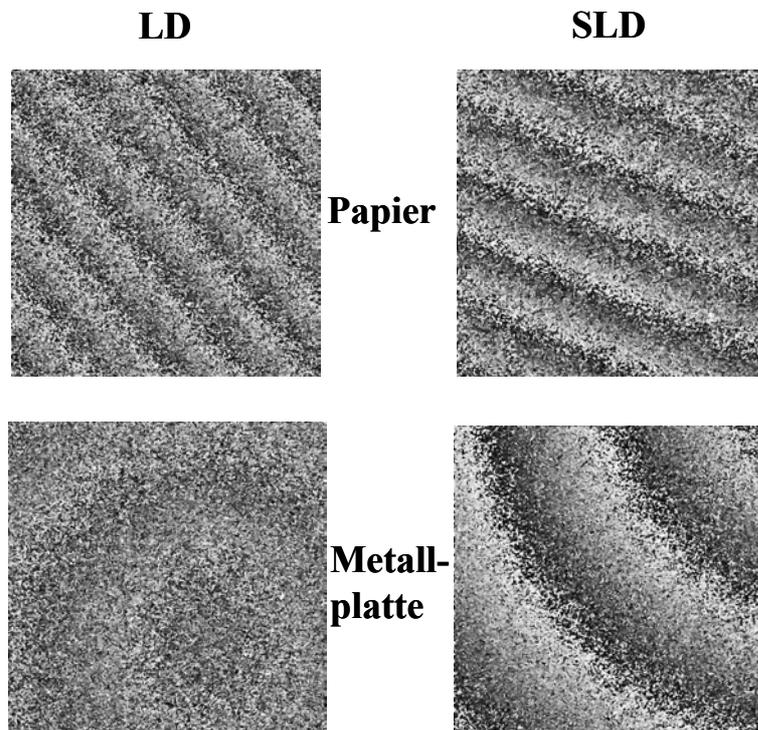


Abb. 4.23: Vergleich von ESPI-Messungen mit einer LD und einer SLD. Das Papier liegt vor der Metallplatte. Bei der Messung mit der SLD wird die Wegdifferenz zwischen Objekt- und Referenzstrahl entsprechend der Position des Papiers und der Metallschicht abgeglichen.

geweißte Metallplatte unterhalb des Papiers ausgebeult, so kann diese Verformung, zu sehen in Abb. 4.23 links unten, nur ansatzweise erahnt werden. In Abb. 4.23 rechts ist die gleiche Messung jedoch mit der SLD als Lichtquelle dargestellt. Zuerst wird Δl so eingestellt, dass das Licht von der Papierschicht innerhalb von l_K liegt. Wird nun das Papier verkippt, so ergibt sich wieder ein sehr gut auszuwertendes Sägezahnbild, zu sehen in Abb. 4.23 rechts oben. Als Nächstes wird Δl so eingestellt, dass das Licht von der geweißten Metallplatte innerhalb von l_K liegt. Wird die Metallplatte verbeult, so kann das entstehende Sägezahnbild, zu sehen in Abb. 4.23 rechts unten, leicht ausgewertet werden. Die Trennung von erwünschtem und unerwünschtem Licht durch die Kohärenzlänge bringt hier einen deutlichen Vorteil. Sogar die Messung der vorderen Papierschicht wird besser, wenn das von der dahinterliegenden, geweißten Metallplatte reflektierte Licht unterdrückt wird.

Wie in Kapitel 2 gezeigt wird, führt eine In-Plane-Verschiebung zu einer Dekorrelation. Ist die Verschiebung größer als der Speckledurchmesser, so sind die miteinander zu verrechnenden Bilder komplett dekorreliert. Wie bereits erwähnt, gibt es die Möglichkeit mittels der FTM, gezielt In-Plane-Bewegungen auszurechnen und zu kompensieren. Ist die In-Plane-Verschiebung bekannt, können die Bilder um diesen Betrag zurückverschoben und die Specklemuster somit wieder übereinander gebracht werden. Der Vorteil, der dadurch erreicht wird, ist in [FB01] beschrieben. Eine Verifizierung der Ergebnisse kann [MB02] entnommen werden. Der Vorteil der LCS ist nun, dass das Specklemuster der untersten Schicht getrennt von dem Specklemuster der darüberliegenden Schicht betrachtet werden kann. Bei einer Messung mit einer langen Kohärenzlänge wäre dies nicht möglich. Eine Verschiebung zweier Schichten gegeneinander, die innerhalb der Kohärenzlänge liegen, kann dann nicht berechnet werden.

In Abb. 4.24 ist dargestellt, wie die Zurckverschiebung wirkt. Hier wird die untere Schicht so stark verkippt, dass gleichzeitig eine Verschiebung eingeführt wird, die deutlich größer als der Speckledurchmesser ist. Es wird eine Verschiebung von 5,4 Pixeln gemessen. Das

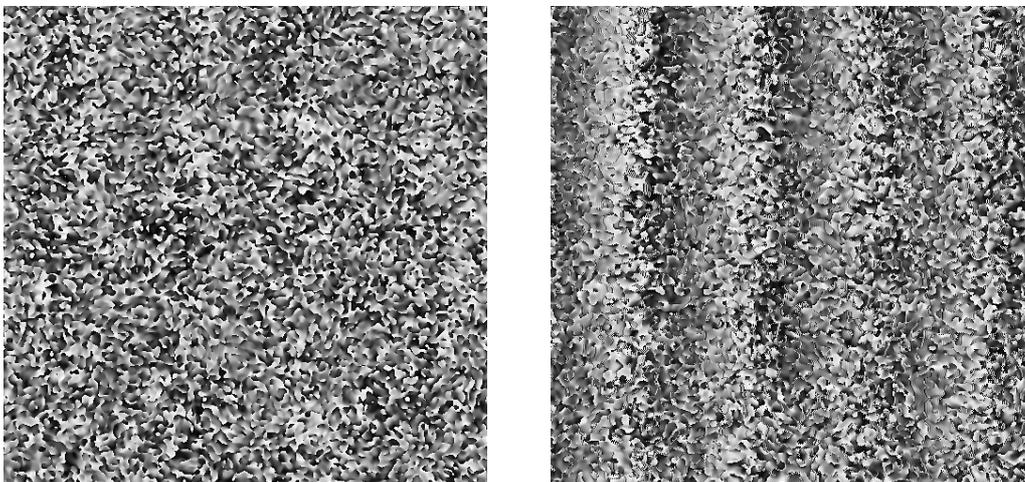


Abb. 4.24: Verbesserung des Sägezahnbildes durch Zurückrechnen einer vorliegenden In-Plane-Verschiebung. Gemessen an einer Metallschicht, durch eine Papierschicht hindurch. Links: Vor der Rückverschiebung. Rechts: Nach der Rückverschiebung

Sägezahnbild ohne Zurückverschieben der Bilder ist in Abb. 4.24 links zu sehen. Nur nach Rückverschiebung kann die Verkippung der Metallplatte, zu sehen in Abb. 4.24 rechts, detektiert werden.

4.4.1 Theoretische Betrachtung zur Auflösung bei LCSI-Verformungsmessungen

Wie sich während der Messungen am Testobjekt herausgestellt hat, ist die Qualität der Sägezahnbilder, die bei einem zweischichtigen System an der unteren Schicht gemessen werden, deutlich schlechter als die Qualität der Sägezahnbilder, die an der oberen Schicht gemessen werden. Eine Bewegung der oberen Schicht während der Messung verschlechtert das Ergebnis einer Messung an der unteren Schicht. Diese Effekte schränken die Einsatzmöglichkeiten des LCSI-Systems bei Verformungsmessungen ein. Um eine Einschätzung dieser Einschränkungen zu erhalten, wird in diesem Abschnitt ein einfaches Modell entwickelt. Es wird speziell darauf eingegangen, welchen Einfluss der Abstand zwischen der oberen und der unteren Schicht auf die Messungen hat, wie eine Bewegung der oberen Schicht die Messung an der darunter liegenden Schicht beeinflusst und wie sich eine Bewegung der unteren zu vermessenden Schicht auf die Messung selber auswirkt.

Wie in den vorhergehenden Kapiteln schon mehrfach erwähnt wurde, ist für ESPI-Messungen die Korrelation der einer Messung zugrundeliegenden Specklemuster die bestimmende Größe. In Kapitel 2.3.2 und 2.3.3 geht es um die Dekorrelation durch Bewegungen des Untersuchungsobjekts. Als Resultat ergibt sich, dass die Specklegröße, der Speckledurchmesser in x-y-Richtung und die Specklelänge in z-Richtung als begrenzende Größen angesehen werden können. Ein weiterer Effekt, der zu Dekorrelation führt, ist jedoch eine Änderung in der Mikrotopografie der zu untersuchenden Oberfläche. In [FB00] wird darauf hingewiesen, dass eine totale Dekorrelation eintritt, wenn die Konturen einer Oberfläche ihre Höhen zufällig um im Durchschnitt ca. $0,15 \lambda$ der zur Erzeugung des Specklemusters verwendeten Wellenlänge ändern. Dies führt dazu, dass das Sägezahnbild einer Messung nicht mehr auszuwerten ist. Für die hier verwendete Lichtquelle ergibt sich somit ein Wert von ca. 126 nm für die zu einer totalen Dekorrelation führende zufällige Höhenänderung einer Oberfläche. Eine Höhenänderung der Oberfläche ist für den Objektstrahl gleichbedeutend mit einer Weglängenänderung. Bei einer Messanordnung, bei der senkrecht beleuchtet und aus der gleichen Richtung beobachtet wird, bedeutet eine Höhenänderung des betrachteten Objekts eine doppelt so große Weglängenänderung des Objektstrahls.

Zur quantitativen Bestimmung, wie gut ein Sägezahnstreifenbild ist, wird in [JB00] vorgeschlagen, die Standardabweichung $\sigma_{\Delta\phi}$ der Phasen $\Delta\phi_{gem}(x,y)$ in einem gemessenen Sägezahnstreifenbild von den Phasen $\Delta\phi_{ideal}(x,y)$ des idealen Sägezahnstreifenbildes zu berechnen. Dies ergibt

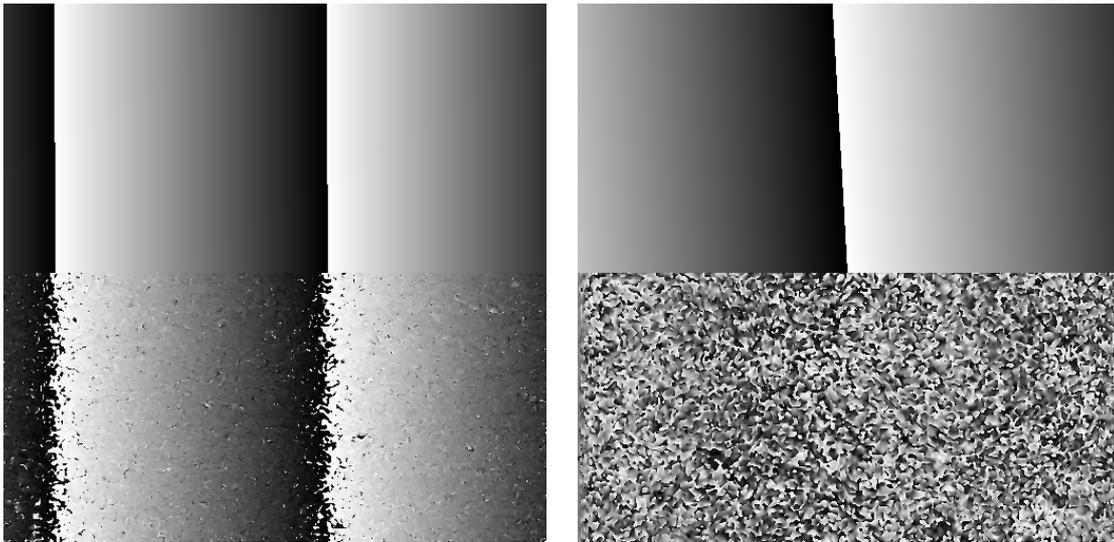


Abb. 4.25: Links: Sehr gutes Sägezahnstreifenbild mit einer Standardabweichung vom darüber dargestellten idealen Sägezahnstreifenbild von $0,087 \pi$. Rechts: Sehr schlechtes Sägezahnstreifenbild mit einer Standardabweichung von dem darüber dargestellten idealen Sägezahnstreifenbild von $0,55 \pi$.

$$\sigma_{\Delta\phi} = \sqrt{\left\langle \left(\Delta\phi_{gem}(x, y) - \Delta\phi_{ideal}(x, y) \right)^2 \right\rangle}. \quad (4.4)$$

In Abb. 4.25 ist dies für zwei Beispiele dargestellt. Auf der linken Seite von Abb. 4.25 ist ein sehr gutes Sägezahnstreifenbild zu sehen. Die obere Hälfte des Bildes zeigt das simulierte ideale Sägezahnstreifenbild, die untere Hälfte das gemessene Sägezahnstreifenbild. Die Standardabweichung $\sigma_{\Delta\phi}$ berechnet sich hier zu $0,087 \pi$, was $0,043 \lambda$ oder bei einer Wellenlänge von $\lambda_0 = 840 \text{ nm}$ einer Wegdifferenz von 37 nm entspricht.

In Abb. 4.25 rechts ist ein sehr schlechtes Sägezahnstreifenbild gezeigt. Die Standardabweichung $\sigma_{\Delta\phi}$ beträgt hier $0,55 \pi$. Für ein Sägezahnbild, das total dekorreliert ist, müssen alle Phasen zufällig und gleichverteilt vorkommen. Die maximale Standardabweichung berechnet sich dann zu $\frac{\pi}{\sqrt{3}}$, was ca. $0,58 \pi$ entspricht. Umgerechnet in

Wellenlängen bedeutet dies eine Weglängenänderung von ca. 244 nm . Dies entspricht ungefähr dem Doppelten der zu einer Dekorrelation führenden zufälligen Höhenänderung. Dies ist nicht verwunderlich, da, wie bereits erwähnt, bei senkrechter Betrachtung eine Höhenänderung von 126 nm zweimal auf die Weglängenänderung des Lichts einwirkt und somit 252 nm entspricht.

4.4.1.1 Anteil des zu einer Messung beitragenden Lichts

Für die Betrachtung, welchen Einfluss bei einem zweischichtigen Objekt die einzelnen Schichten auf eine Messung haben, muss nur das zu einer Messung beitragende Licht berücksichtigt werden. Wie schon in den vorherigen Kapitel erwähnt, trägt nur das vom

Es ergibt sich ein Zylinder um den Punkt A mit dem Radius R der Höhe H , innerhalb dem alle Lichtwege durch A zur CCD-Kamera um weniger als die Kohärenzlänge variieren und somit zu einer interferometrischen Messung beitragen. Alles Licht, das innerhalb des Kreises mit dem Radius R und dem Mittelpunkt A auf Schicht 1 trifft und dann innerhalb des gleichen Kreises auf Schicht 2 reflektiert wird und in den Punkt A geht, trägt zu einer Messung bei.

Aus Gl. 4.6 folgt, dass R mit \sqrt{H} anwächst. Die Fläche der Stirnseiten des Zylinders, sowohl auf Schicht 1, wo das Licht auftrifft als auch auf Schicht 2, wo das Licht wieder reflektiert wird, werden somit mit H größer.

Eine Abschätzung für die Änderung der Lichtintensität des kohärenten Lichts mit zunehmendem H kann wie folgt gemacht werden. Für sehr kleine Abstände H gilt $H < R$. In diesem Fall sollte eine Variation von H kaum einen Einfluss auf die durch den Punkt A hindurch zur CCD-Kamera gehende Lichtintensität haben. Andererseits gilt für große Abstände H : $H \gg R$. Die von der Schicht 1 auf der Schicht 2 ankommende Lichtintensität fällt mit $1/H^2$ ab. Die Fläche auf Schicht 1, die kohärent zum Licht beiträgt, wächst, wie in Gl. 4.6 zu sehen ist, mit H an. Die durch die Schicht 1 einfallende kohärente Lichtintensität wächst also mit H , der Anteil, der davon die Schicht 2 innerhalb der zum kohärenten Licht beitragenden Fläche erreicht, fällt mit $1/H^2$ ab. Es bleibt somit ein Netto-Lichtabfall von $1/H$, der innerhalb der zum kohärenten Licht beitragenden Fläche auf Schicht 2 auftrifft. Das Licht, das aus diesem Gebiet auf Schicht 2 reflektiert wird, muss nun zu dem Punkt A gelangen. Auf diesem Weg fällt die Lichtintensität noch einmal mit $1/H^2$ ab, woraus eine Abnahme der kohärenten Lichtintensität im Punkt A mit $1/H^3$ erfolgt.

Die kohärente Lichtintensität sollte also für sehr kleine H konstant bleiben und dann immer schneller abnehmen, bis für große H eine Abnahme mit $1/H^3$ erfolgt.

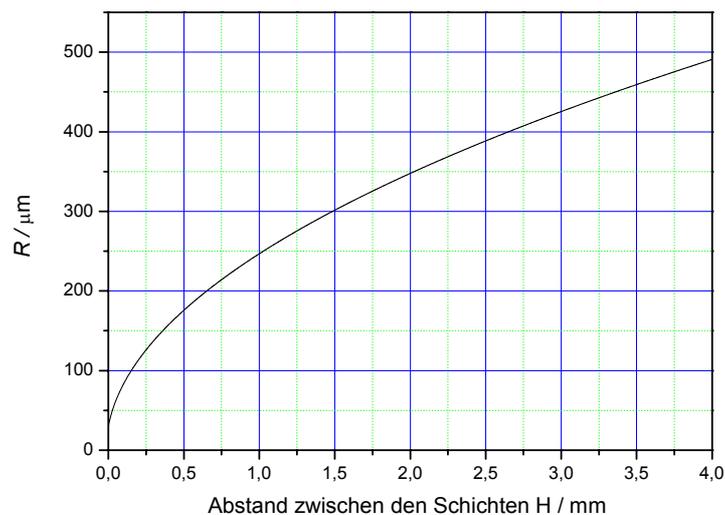


Abb. 4.27: Änderung des Radius R aufgetragen über den Abstand H zwischen Schicht 1 und Schicht 2 für eine Kohärenzlänge von $30\mu\text{m}$. Daraus resultiert nach Gl. 4.5 der Wert von $R=30\mu\text{m}$ für $H=0$.

4.4.1.2 Messungen zur kohärenten Lichtintensität

Die im vorhergehenden Abschnitt gemachte Abschätzung, dass die Intensität des kohärenten Lichtanteils mit dem Abstand der Schichten abnimmt, wird nun experimentell überprüft. Dazu wird an einem zweischichtigen Objekt gemessen. Die obere Schicht besteht aus einem dünnen Papier, die untere Schicht aus einer geweißten Metallplatte. Der Abstand zwischen beiden Schichten kann verändert werden. Der betrachtete Bereich hat eine Kantenlänge von 1 mm. Der Weglängenunterschied zwischen Objekt- und Referenzstrahl wird so eingestellt, dass das Licht der unteren Schicht kohärent zum Referenzstrahl ist.

Der Abstand H zwischen der oberen Schicht und der unteren Schicht wird variiert. Zu jeder Einstellung wird ein Interferogramm aufgenommen. In Abb. 4.28 wird nun die mittlere Intensität der rekonstruierten Specklebilder über dem Abstand doppeltlogarithmisch aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Intensität mit dem Abstand stark abfällt. Zum Vergleich ist ein Abfall mit $1/H$ aufgetragen. Es ist am Anfang der Kurve keine konstante Intensität festzustellen, was sich darin begründet, dass der kleinste Abstand, bei dem gemessen wird, in dieser Messung $350\ \mu\text{m}$ beträgt. Hier wird keine konstante Lichtintensität, sondern schon ein deutlicher Abfall in der kohärenten Lichtintensität mit dem Abstand erwartet. Genauso ist zu größeren Werten von H kein Abfall mit $1/H^3$ zu erkennen. Dieser Verlauf wird jedoch erst bei sehr großen Werten von H erwartet, die in diesem Experiment nicht erreicht werden. Der Verlauf der Kurve in Abb. 4.28 vermittelt jedoch eine leichte Tendenz dahin, dass sich der Betrag der Steigung der gemessenen Werte mit zunehmendem H verstärkt.

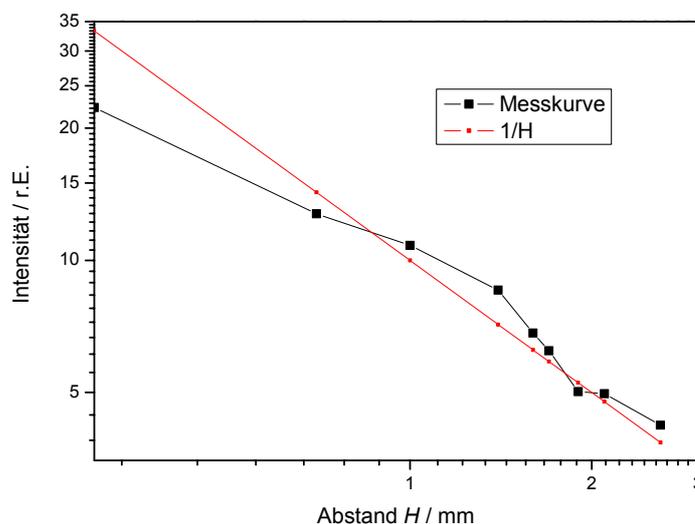


Abb. 4.28: Gemessene Intensität der aus der Tiefe der Schicht 2 rekonstruierten Specklebilder, aufgetragen über den Abstand H zwischen Schicht 1 und Schicht 2, verglichen mit einer $1/H$ Abhängigkeit.

Die Längenänderung beträgt

$$\Delta S = \sqrt{(H - \Delta H)^2 + R^2} - \sqrt{H^2 + R^2} + \Delta H. \quad (4.6)$$

In Abb. 4.31 ist die Weglängenänderung ΔS , erzeugt durch eine Parallelverschiebung der Schichten ΔH , für verschiedene Abstände der Schichten H aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich ΔS mit zunehmendem H langsamer ändert. Es bleibt anzumerken, dass ΔS , die maximale Änderung der zu der kohärenten Lichtintensität in A beitragenden Lichtwege, nicht gleichzusetzen ist mit der Standardabweichung von der idealen Phase eines Sägezahnbildes oder der daraus herzuleitenden Korrelation. Zwar wird in der Einleitung dieses Abschnittes ein Wert für eine relative Oberflächenänderung und der damit einhergehenden Weglängenänderungen angegeben, der zu einer Dekorrelation führt, jedoch gibt dieser Wert die Standardabweichung von einer mittleren Weglängenänderung an. Dieser Wert, der einer Standardabweichung von der mittleren Weglängenänderung von 252 nm entspricht, resultiert aus der Statistik, mit der sich die Höhen ändern. Bei der vorliegenden Betrachtung wird jedoch nur einen Wert betrachtet, der auch noch der maximalen Weglängenänderung entspricht. Dies bedeutet wie gesagt, dass ΔS nicht direkt mit der gemessenen Standardabweichung gleichzusetzen ist. ΔS gibt einen Hinweis auf die zu erwartenden Weglängenunterschiede und vor allem gibt das Verhalten von ΔS bei Änderung von H bzw. ΔH einen Eindruck über die zu erwartenden Tendenzen der relativen Weglängenänderungen.

Dies ist zu berücksichtigen, wenn im weiteren Verlauf die theoretisch gewonnenen

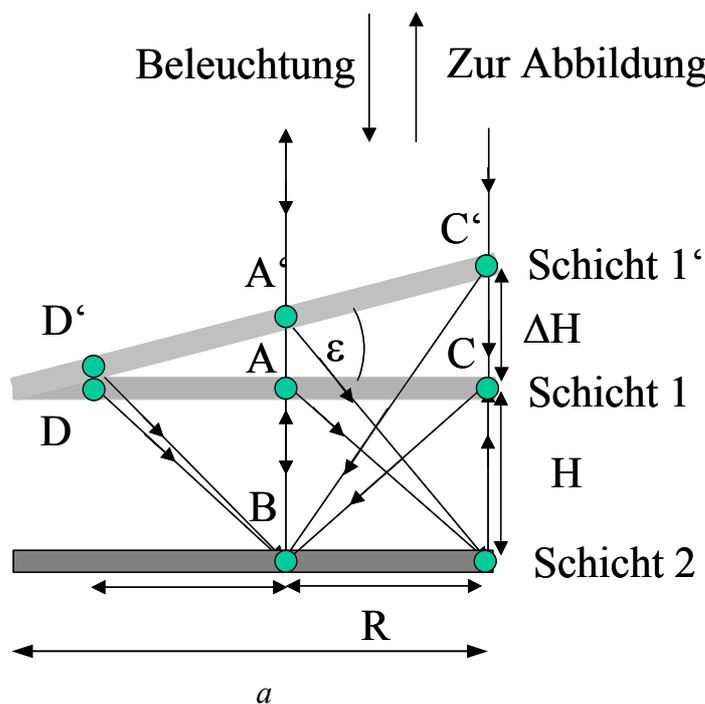


Abb. 4.30: Skizze zur Betrachtung der auftretenden Wegunterschiede bei Verkippung der Schicht 1 um den Winkel ε und einer daraus resultierenden Höhenänderung ΔH .

Erkenntnisse mit Messergebnissen verglichen werden.

Da bei Verformungsmessungen selten eine reine Parallelverschiebung entsteht, sondern meist eine Deformation, die eher einer Kippung der oberen Schicht entspricht, wird aus den vorher gemachten Überlegungen abgeschätzt, wie sich eine Verkippung von Schicht 1 auf die Korrelation auswirkt. In Abb. 4.30 ist einmal das Beispiel einer Kippung von Schicht 1 skizziert. Der Zusammenhang zwischen der Höhenänderung ΔH und dem Kippwinkel ε ergibt sich über die Kantenlänge des betrachteten Bereichs a zu

$$\Delta H = \tan \varepsilon \cdot a, \quad (4.7)$$

wenn die Drehachse am Rand des betrachteten Bereichs liegt. Zwar spielt die Höhenänderung von A für die Berechnung der Wegdifferenz durch den Punkt C keine Rolle, doch sorgt die Verkippung dafür, dass sich die Weglänge des Objektstrahls entlang \overline{DBA} im Vergleich zum Verlauf entlang $\overline{D'BA'}$ deutlich weniger ändert, als sie es bei einer Höhenänderung der gesamten Schicht um ΔH tut. Für eine Verkippung bleibt somit der maximale Wegunterschied ΔS gleich, die Zusammensetzung der einzelnen Wegänderung ändert sich jedoch. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, scheint es angebracht, bei einer Verkippung ein mittleres ΔH zu verwenden. Eine simple Abschätzung wäre, ΔH zu halbieren und somit für die Berechnung von ΔS ΔH durch $\Delta H/2$ zu ersetzen. Als Resultat bleibt Abb. 4.31 auch für eine Kippung gültig. Die Werte für H verdoppeln sich jedoch.

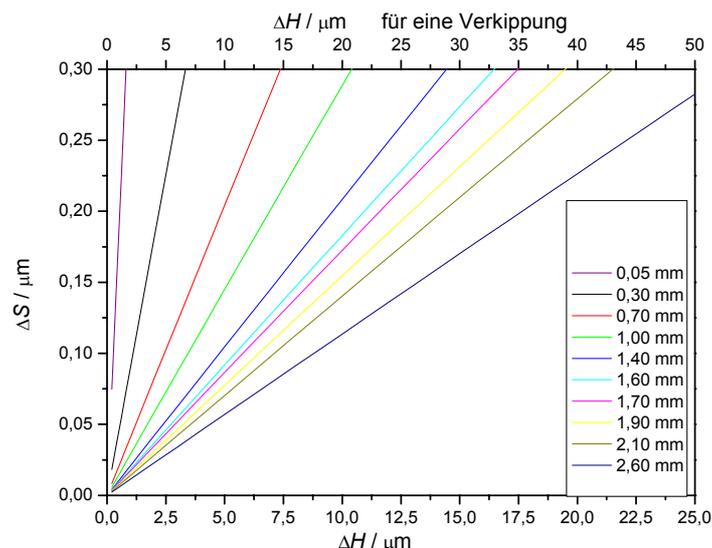


Abb. 4.31: Aufgetragen ist die maximale Wegdifferenz ΔS für den Punkt A über einer Bewegung der oberen Schicht ΔH für verschiedene Abstände der Schichten von 0,05 bis 2,6 mm. Bei der unteren Abszisse ist ΔH für eine Parallelverschiebung aufgetragen. Die obere Abszisse stellt eine Abschätzung von ΔH für eine Verkippung dar.

4.4.1.4 Messung des Einflusses der Verkipfung der oberen Schicht auf die Korrelation

An dieser Stelle wird experimentell überprüft, ob sich der Einfluss einer Verkipfung der oberen Schicht auf die untere Schicht auswirkt, wie es sich in der theoretischen Betrachtung darstellt. Es ist zu überprüfen, ob bei einer Messung an der unteren Schicht eine Bewegung der oberen Schicht zu einer Dekorrelation führt und, ob sich dieser Einfluss mit einer Vergrößerung des Abstandes zwischen den Schichten abschwächt.

Es wird mit dem selben Testobjekt wie bei der vorherigen Messung gearbeitet. Wie erwähnt, kann der Abstand zwischen beiden Schichten verändert werden. Beide Schichten können zusätzlich einzeln verkippt werden. Der betrachtete Bereich hat eine Kantenlänge von 1 mm. Der Weglängenunterschied zwischen Objekt- und Referenzstrahl wird so eingestellt, dass das Licht der unteren Schicht kohärent zum Referenzstrahl ist.

Es wird der Einfluss der Verkipfung der oberen Schicht auf die Verformungsmessung an der unteren Schicht gemessen. Hierzu wird bei verschiedenen Abständen H die obere Schicht in mehreren kleinen Schritten von ca. $\Delta H = 500$ nm verkippt. Zu jeder Verkipfung wird ein Interferogramm aufgenommen. Das Sägezahnbild, das den Zustand der unteren Schicht vor der Verkipfung der oberen Schicht mit dem Zustand der unteren Schicht nach dieser Verkipfung vergleicht, sollte immer eine konstante Phase aufweisen, also ein Sägezahnbild mit 0 Streifen sein, da die untere Schicht ja selber nicht verkippt wird. In Abb. 4.32 ist für unterschiedliche Abstände H die Standardabweichung des gemessenen Sägezahnbilds von dem errechneten idealen Sägezahnbild aufgetragen.

Im Vergleich zur Theorie sind hier die gleichen Tendenzen zu erkennen. Mit zunehmendem H kann die obere Schicht weiter verkippt werden, bis es zu einer Dekorrelation der

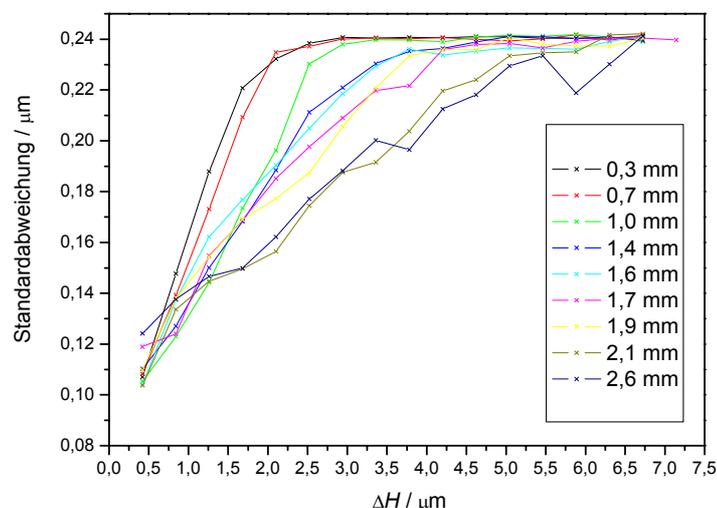


Abb. 4.32: Standardabweichung vom idealen Sägezahnbild, aufgetragen über eine Höhenänderung der oberen Schicht für verschiedene Abstände H zwischen den Schichten. Die Höhenänderung wird über eine Verkipfung erzeugt.

Sägezahnbilder kommt. Für ein H von 300 μm ergibt sich eine maximale Höhenänderung durch Verkippung von ca. 3 μm . Diesem Wert entspricht in der Theorie in Abb. 4.31 ein ΔS von ca. 120 nm. Bei einem Abstand von 2,1 mm ergibt die Messung einen Wert von 6,5 μm , bevor es zu einer totalen Dekorrelation kommt. Dies entspricht in der Theorie einem Wert für ΔS von ca. 50 nm. Anders ausgedrückt, ergibt die Theorie vor allem für große Werte von H einen geringeren Einfluss einer Verkippung der oberen Schicht auf eine Messung an der unteren Schicht, als er sich experimentell ermitteln lässt. Selbst, wenn angenommen wird, dass ein ΔS von 120 nm ausreichend ist, um zu einer totalen Dekorrelation zu führen, so ergibt sich aus der Theorie für ein H von 2,1 mm eine fast 3 mal höhere erlaubte Verkippung als aus der Messung.

4.4.1.5 Einfluss einer Bewegung der unteren Schicht auf die Korrelation

Eine Parallelverschiebung der unteren Schicht, dargestellt in Abb. 4.33, ist grundsätzlich ähnlich zu betrachten, wie der vorherige Fall. Ermittelt wird die maximale Abweichung der Lichtwege von dem idealen Lichtweg.

Für eine Parallelverschiebung von Schicht 2 in Richtung auf Schicht 1 berechnet sich der Wegunterschied \overline{ABA} zu $\overline{AB'A}$ verglichen mit \overline{DCA} zu $\overline{DC'A}$ aus der Formel

$$\Delta S = \sqrt{(H - \Delta H)^2 + R^2} - \sqrt{H^2 + R^2} + \Delta H. \quad (4.8)$$

Diese Formel ist identisch zu Gl. 4.6, was auf Grund der Symmetrie für diesen Fall zu erwarten ist.

Betrachten wir jedoch den Fall einer Kippung, dargestellt in Abb. 4.34, was einer Verformungsmessung gleich kommt, so ergibt sich folgendes Bild:

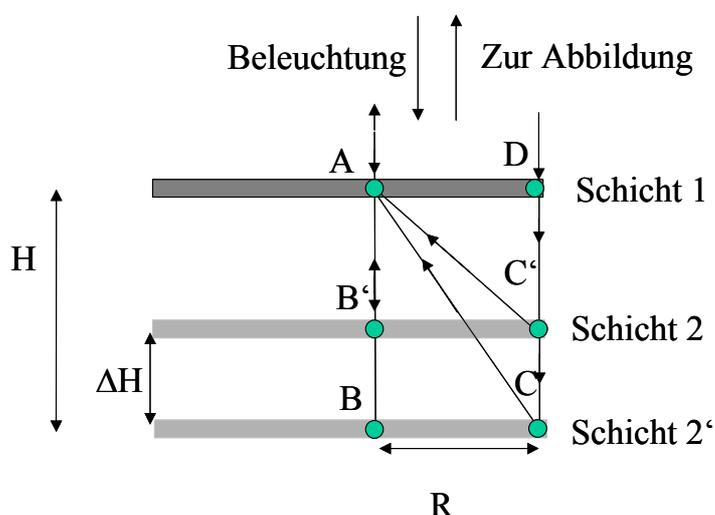


Abb. 4.33: Skizze zur Betrachtung der auftretenden Wegunterschiede bei einer Höhenänderung ΔH der unteren Schicht.

Bei einer Verformungsmessung an Schicht 2 bei einer Verkippung um den Winkel ε vollführt jeder Punkt eine Höhenänderung. Diese Höhenänderung führt für den senkrecht einfallenden und wieder senkrecht reflektierten Lichtstrahl \overline{ABA} vor der Verkippung zu dem Strahl $\overline{AB'A}$ nach der Verkippung. Die Weglängenänderung führt zu der zu messenden Verformung

$$\Delta H_B = \tan \varepsilon (a - R). \quad (4.9)$$

Für den Punkt C bedeutete dies, dass eine Weglängenänderung von $2 \times BB' = 2\Delta H_B$ detektiert werden soll.

Nach den im vorigen Abschnitt gemachten Betrachtungen trägt aber auch das Licht, das den Weg \overline{DCA} gelaufen ist, zu der Messung an dem Punkt A bei. Für dieses Licht gilt nach der Verkippung jedoch nicht der Weglängenunterschied $2\Delta H_B$. Der Wegunterschied ΔS der Wege \overline{DCA} vor der Verkippung und $\overline{DC'A}$ nach der Verkippung zu \overline{ABA} vor der Verkippung und $\overline{AB'A}$ nach der Verkippung ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\Delta S = \Delta H + \sqrt{H^2 + R^2} - \sqrt{(H - \Delta H)^2 + R^2} - 2\Delta H_B, \quad (4.10)$$

wobei sich die Höhenänderung ΔH_B an der Stelle B aus Gl. 4.9 berechnet.

Die Werte für ΔS für verschiedene Werte von H sind in Abb. 4.35 aufgetragen. Die Auftragung erfolgt sowohl über den Winkel ε als auch für die Höhe ΔH , wobei hierfür noch einen Strecke a angenommen werden muss. Diese ist hier wieder 1 mm.

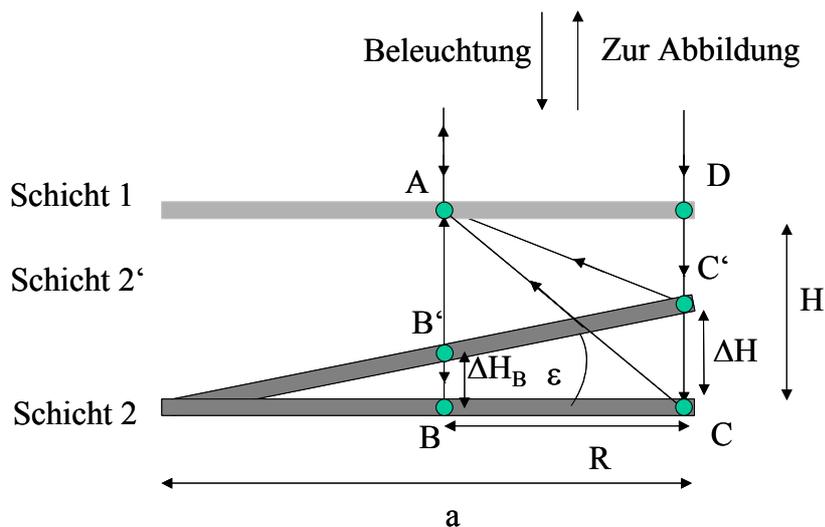


Abb. 4.34: Skizze zur Betrachtung der auftretenden Wegunterschiede bei Verkippung der Schicht 2 um den Winkel ε und einer daraus resultierenden Höhenänderung ΔH .

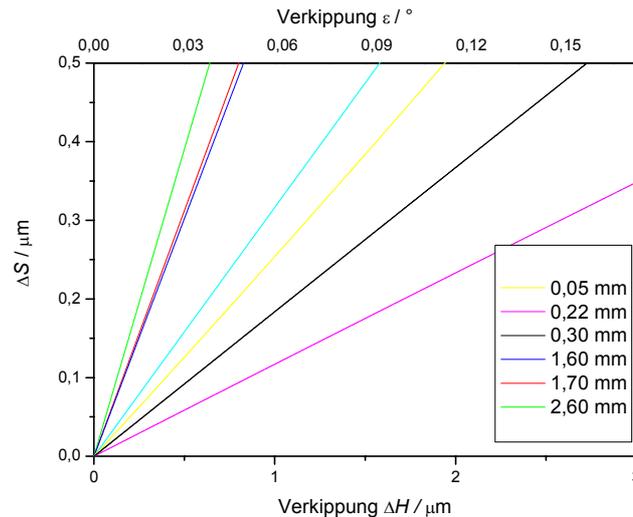


Abb. 4.35: Aufgetragen ist die maximale Weglängendifferenz im Punkt A bei Verkippung der unteren Schicht. Die untere Abszisse drückt die Verkippung der unteren Schicht für einen Bereich mit einer Kantenlänge von 1 mm nach Gl. 4.8 über die Höhenänderung ΔH aus. Die obere Abszisse zeigt den vom Abbildungsmaßstab unabhängigen Winkel ϵ .

Ein Resultat dieser Abschätzung ist, dass mit zunehmendem Abstand H die maximal detektierbare Verformung abnimmt. Je größer der Abstand der Schichten ist, um so kleiner darf die Verkippung der unteren Schicht sein, bis es bei einer Verformungsmessung an der unteren Schicht zu einer totalen Dekorrelation kommt. Dieses Verhalten ist gegenläufig zu der Abschätzung bei einer Parallelverschiebung. Der Einfluss einer Parallelverschiebung der unteren Schicht auf eine Verformungsmessung an der unteren Schicht nimmt mit zunehmendem Abstand der Schichten ab.

Für einen Untersuchungsbereich mit der Kantenlänge 1 mm zeigt sich für einen Abstand der Schichten von $50 \mu\text{m}$ die Auswirkung des unterschiedlichen Verhaltens zwischen Parallelverschiebung und Verkippung. Hier sollte die Verkippung der unteren Schicht eigentlich einen kleineren Wegunterschied ΔS erzeugen, als bei $220 \mu\text{m}$. Es ergibt sich jedoch der umgekehrte Fall. Eine Betrachtung von Abb. 4.31 zeigt, dass für ein H von $50 \mu\text{m}$ nicht die Verkippung, sondern die Parallelverschiebung der begrenzende Faktor ist. Wie in Abb. 4.31 zu sehen ist, führt für ein H von $50 \mu\text{m}$ eine Höhenänderung von $1 \mu\text{m}$ schon zu einem ΔS von 250 nm . In diesem Fall ist somit alleine die Höhenänderung die Begrenzung und nicht mehr die Verkippung, wobei für alle anderen dargestellten Werte die Kippung deutlich schneller zu einer Vergrößerung von ΔS führt als eine einfache Höhenänderung.

4.4.1.6 Messung der Dekorrelation bei Verkipfung der unteren Schicht

In diesem Abschnitt findet die experimentelle Überprüfung statt, welchen Einfluss die Verkipfung der unteren Schicht auf eine Verformungsmessung an dieser Schicht hat.

Für diese Messung wird wieder der Abstand H zwischen der oberen und der unteren Schicht des Testobjekts variiert. Für jeden Abstand H findet eine Verkipfung der unteren Schicht in mehreren kleinen Schritten statt, wobei nun die obere Schicht konstant gehalten wird. Es wird die Standardabweichung der Sägezahnbilder über der Verkipfung aufgetragen. Das Ergebnis ist in Abb. 4.36 dargestellt. Es kann jetzt ermittelt werden, welche Verkipfung bei einem Abstand H zu einer vollständigen Dekorrelation führt.

Die im vorherigen Abschnitt aufgestellte Theorie gilt für den Kippwinkel ε und ist nicht von der Vergrößerung abhängig. Es ergibt sich somit, dass für eine größere Messfläche und somit für ein größeres a mehr Sägezahnstreifen detektiert werden können, da auch ΔH nach Gl. 4.7 linear mit a wächst. Die hier gemessenen Werte gelten für eine Messfläche mit der Kantenlänge 1 mm, wenn die Drehachse am Rand des Messbereichs liegt. Es kann somit ein Vergleich mit den theoretischen Werten in Abb. 4.35 gemacht werden, wenn dort die untere Abszisse betrachtet wird.

Für einen Abstand von 220 μm kann noch knapp eine Verkipfung von 2 μm detektiert werden. Für einen Abstand von 1,6 mm führt schon eine Verkipfung von ca. 250 nm zu einer totalen Dekorrelation. Im Vergleich dazu ergibt die Theorie bei einem H von 220 μm ein ΔS von 250 nm bei einem ΔH von 2,5 μm . Für $H=1,6$ mm ergibt sich bei einem ΔH von 0,25 μm ein ΔS von 200 nm. Die Messung bestätigt die Tendenz, die in der Theorie aufgezeigt wird. Je größer der Abstand H wird, um so weniger darf sich die untere Schicht verkippen. Dies ist

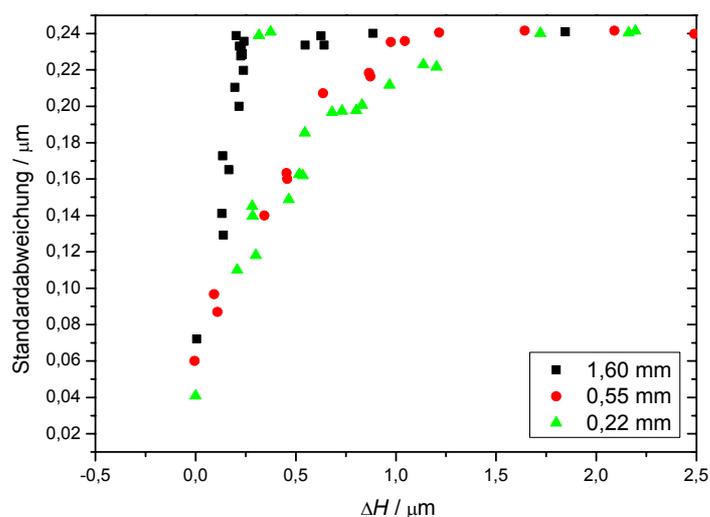


Abb. 4.36: Standardabweichung der gemessenen Sägezahnbilder aufgetragen über die Verkipfung der unteren Schicht bei einer Kantenlänge des Untersuchungsbereichs von 1 mm. Eingezeichnet sind die Kurven für drei unterschiedliche Abstände H .

gleichbedeutend damit, dass weniger Sägezahnstreifen zu detektieren sind. Bei der Vermessung einer Fläche mit einer Kantenlänge von 1 mm und einem Schichtabstand von ca. 220 μm können bestenfalls 4 Sägezahnstreifen detektiert werden.

4.5 Fazit der Auflösungsabschätzung bei Verformungsmessungen

Es bleibt festzustellen, dass bei einem geschichteten System der Einfluss der Schichten auf die Lichtwege eine große Einschränkung für die Messung an der unteren Schicht bringt. Die theoretischen Abschätzungen basieren auf einem sehr einfachen Modell, wobei die grundsätzlichen Tendenzen des Modells mit den Ergebnissen der Messungen übereinstimmen.

Für die Abhängigkeit der kohärenten Intensität von dem Abstand der Schichten ergibt sich eine starke Abnahme mit zunehmendem H , wobei der gemessene Abfall zwischen den theoretisch erwarteten Werten liegt, diese aber nicht exakt bestätigen kann.

Für den Einfluss einer Verkippung der oberen auf eine Messung an der unteren Schicht ergibt sowohl die Theorie als auch das Experiment, dass der Einfluss der Verkippung mit zunehmendem H geringer wird. Die Tendenzen, die sich hier in der Theorie für ΔH ergeben, gleichen den Tendenzen in den Messungen, doch ergibt eine erste Abschätzung, dass die Theorie größere Bewegungen zulässt als die Messung zeigt. Eine Begründung hierfür kann in der Lage der Drehachse zu suchen sein. Liegt die Drehachse im Experiment nicht am Rand des betrachteten Bereichs, sondern noch weiter außerhalb, so würde sich das ΔH vergrößern und somit zu einer schnelleren Vergrößerung von ΔS führen. Im Experiment ist die Drehachse jedoch nicht exakt genug zu bestimmen.

Auch die Betrachtung des Einflusses der Bewegung der unteren Schicht auf eine Messung an der unteren Schicht zeigt eine Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment, was die grundsätzlichen Tendenzen angeht. Mit zunehmendem Abstand wird die detektierbare Verformung kleiner. Die Dekorrelation durch eine Verkippung ist für die untere Schicht größer als die Dekorrelation durch eine vergleichbare Parallelverschiebung, solange der Abstand der Schichten größer als ca. 100 μm ist.

Um die Theorie zu verbessern, müssen alle Weglängenänderungen berücksichtigt werden und nicht nur der maximale. Hieraus könnte sich direkt eine Änderung der Korrelation berechnen lassen. Es müsste jedoch zusätzlich bekannt sein, wie stark eine Weglängenänderung aus einem bestimmten Gebiet der Probe zur Dekorrelation beiträgt. Ein wichtiger Ansatz hierfür wäre eine Berücksichtigung der Streucharakteristik der einzelnen Schichten.

Der Einfluss, den die gemachten Abschätzungen auf reale Messungen haben, wird im Folgenden erläutert.

Allein die Abnahme der Intensität des zu einer Messung beitragenden Lichts mit dem Abstand H ist bei dem sowieso schlechten Verhältnis zwischen Streu- und Nutzlicht zu beachten, doch kann nach [JB00] mit einem Verhältnis von Objekt- zu Referenzlicht von $1/1000$ noch relativ gut gemessen werden. Das optimale Lichtverhältnis für Messungen, die mit der FTM ausgewertet werden, liegt demnach zwischen $1/10$ und $1/100$. Diese Abschätzung besagt zwar, dass auch noch mit wenig Objektlicht gemessen werden kann, sie berücksichtigt aber nur das Verhältnis von Referenz zu Objektlicht und bezieht kein Streulicht ein. Da im vorliegenden Fall das Objektlicht geringer wird, die Referenzstrahlintensität konstant bleibt und das Streulicht zunimmt, wird die Auswirkung auf eine Messung gravierender sein. Mit zunehmendem Abstand zwischen den Schichten, wird eine Messung somit schlechtere Ergebnisse aufgrund höherer Dekorrelation durch weniger Nutzlicht zeigen.

Für die Bewegung der oberen Schicht ergibt sich eine Abhängigkeit, die unabhängig von der Vergrößerung ist. Verändert sich der Abstand zwischen beiden Schichten durch eine Parallelverschiebung entweder der unteren oder der oberen Schicht, so führt dies zu einer Dekorrelation bei einer Messung an der unteren Schicht. Bei Abständen, wie sie bei den Lackschichten auf den Terrakotta-Fragmenten vorkommen, kann eine Parallelverschiebung von weniger als $1 \mu\text{m}$ zu einer starken Dekorrelation führen.

Für die Messungen an den Terrakotta-Fragmenten bedeutet dies, dass die Oberfläche keine Verformung vollführen darf, die zu mehr als mehr als 1 bis 2 Sägezahnstreifen führt, damit an der unteren Schicht noch eine Verformung detektiert werden kann.

Für eine Verformung an der unteren Schicht ergibt sich, dass alleine die Verformung der Schicht zu einer Dekorrelation führt. Diese Dekorrelation ist abhängig von der Größe des zu untersuchenden Bereichs und von dem Abstand der Schichten. Wieder auf die Terrakotta-Fragmente bezogen ergibt sich, dass nicht mehr als ein Sägezahnstreifen detektiert werden kann.

4.6 Messungen an Terrakotta-Fragmenten

Nach diesen Vormessungen, die die Eignung des Systems sowohl für OCT-Messungen als auch für ESPI-Messungen zeigen und auch den Einsatz als LCSI-System an Testobjekten bestätigen, werden nun Messungen an den Terrakotta-Fragmenten durchgeführt. In Abb. 4.36 ist noch einmal verdeutlicht, wie wichtig es ist, dass die gesamte zu vermessende Schicht keine Höhenänderungen aufweist, die größer als die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle sind. Auf der linken Seite in Abb. 4.36 wird eine Messung mit der DBR-LD an Fragment F011/98 auf der schwarzen Lackschicht durchgeführt. Der betrachtete Bereich ist ca. 1 cm^2 groß. Zur Erzeugung von Sägezahnstreifen wird das Fragment insgesamt verkippt. Es sind, wie zu erwarten, Sägezahnstreifen über das gesamte Bild zu erkennen. In Abb. 4.36 rechts wird die gleiche Messung unter Verwendung der SLD dargestellt. Es sind nur in einem

Teilbereich Sägezahnstreifen zu erkennen. Diese Sägezahnstreifen sind qualitativ sogar leicht besser als die Sägezahnbilder, die bei Verwendung der DBR-SLD entstehen. Der Effekt ist damit zu erklären, dass nur dort Sägezahnstreifen entstehen können, wo die Oberfläche innerhalb der Kohärenzschicht liegt. Die Oberfläche der hier vermessenen Probe weist jedoch über den betrachteten Bereich Unebenheiten auf, die größer als die Kohärenzlänge der SLD sind. Dies bedeutet aber auch, dass kein Licht aus einer Tiefe, die größer als die Kohärenzlänge ist, zu der Messung beitragen kann. Dies führt zu der Verbesserung der Sägezahnstreifen. Auf ESPI-Messungen an Volumenstreuern wird z.B. in [LA95] eingegangen. Für die folgenden Messungen bedeutet dies, dass der betrachtete Bereich verkleinert werden muss. Solange es nicht anders erwähnt wird, sind die Untersuchungsbereiche ca. $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ in ihrer x-y-Ausdehnung.

4.6.1 Schichtenselektive Verformungsmessung an Terrakotta-Fragmenten

4.6.1.1 F006/98

Das erste Terrakotta-Fragment, an dem eine schichtenselektive Verformungsmessung durchgeführt wird, ist das mit HEMA gefestigte Fragment F006/99. Damit eine schichtenselektive Verformungsmessung durchgeführt werden kann, muss zunächst die Lage der Schichten bestimmt werden.

In Abb. 4.37 ist ein Tiefenprofil gemessen an Fragment F006/99 dargestellt. Es werden in einem Abstand von $z = 2 \mu\text{m}$ Interferogramme aufgenommen und in einem zentralen Bereich gemittelt über 256×256 Pixel die Intensität des zu der Messung beitragenden Lichts aus der

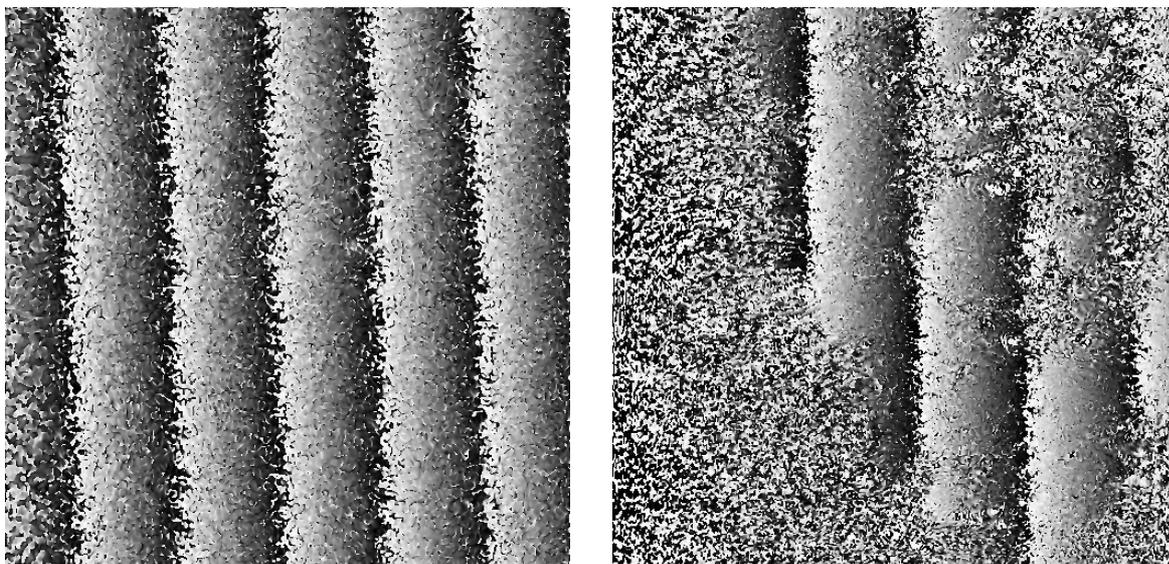


Abb. 4.36: Verformungsmessung an einem Terrakotta-Fragment, das große Unebenheiten in der Topographie aufweist. Die Sägezahnstreifen werden durch eine Verkippung des gesamten Fragments erzeugt. Links: Gemessen mit einer DBR LD. Rechts: Gemessen mit einer SLD

jeweiligen Tiefe ausgewertet. Der Reflex von der Oberfläche ist deutlich zu erkennen. Ca. 70 μm unter diesem Reflex ist ein kleinerer aber gut detektierbarer weiterer Reflex von einer zweiten Schicht zu sehen. Für eine schichtenselektive Messung bietet es sich an, in dieser Tiefe zu messen. Anhand der Messung kann festgestellt werden, dass die Schichten gut zum System ausgerichtet sind. Zwischen den beiden Peaks fällt die Intensität wieder auf einen Wert, der nur noch einem Rauschen entspricht. Dies ist ein Zeichen dafür, dass das von der zweiten Schicht kommende Licht keinen Einfluss auf die erste Schicht hat und umgekehrt.

In Abb. 4.38 ist eine schichtenselektive Verformungsmessung an F006/99 dargestellt. In Abb. 4.38 oben ist das Weißlichtbild der Messfläche zu sehen. Hier ist in der linken oberen Ecke eine Stelle zu erkennen, an der die obere Lackschicht fehlt.

Die beiden Intensitätsbilder in der Mitte von Abb. 4.38 zeigen die Intensität des aus der jeweiligen Tiefe kohärent reflektierten Lichts. Rechts ist die Intensität des kohärenten Lichts dargestellt, wenn die Kohärenzschicht auf die Oberfläche eingestellt ist und links, wenn die Kohärenzschicht auf die ca. 70 μm tiefer liegende Schicht eingestellt ist. Das Intensitätsbild von der Oberfläche weist in der linken oberen Ecke keine Intensität auf. Dies ist eine Stelle, von der kein Licht zurückreflektiert wird, da an dieser Stelle, wie bereits erwähnt, die obere Lackschicht fehlt. An diesem Gebiet können keine Verformungswerte gemessen werden. In Abb. 4.38 unten sind die Sägezahnbilder dargestellt, die jeweils aus einer Änderung der relativen Luftfeuchte von 60 auf 70 % r.F. in der Klimakammer resultieren. Unten links in Abb. 4.38 ist die auftretende Verformung, die an der unteren Schicht gemessen wird dargestellt und unten rechts die Verformung, die an der oberen Schicht gemessen werden

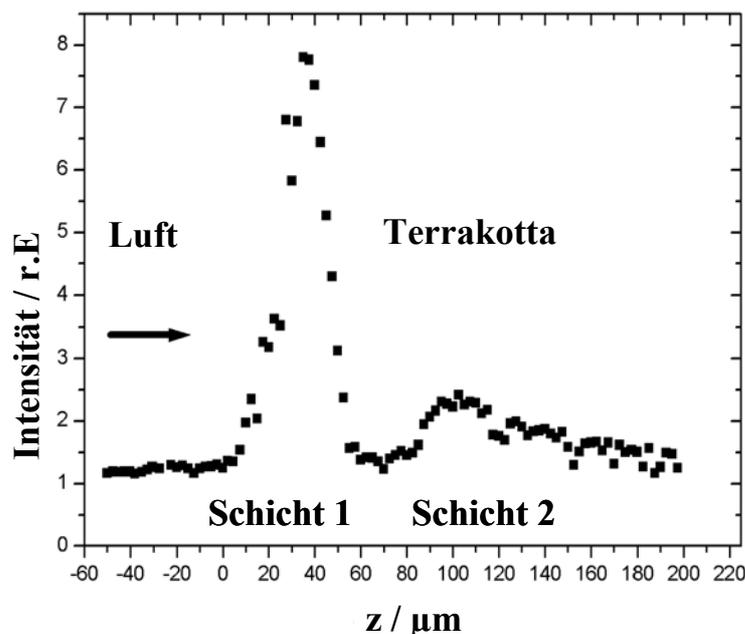


Abb. 4.37: Tiefenprofil durch Fragment F006/99. Die Null an der z-Achse ist zufällig gewählt.

kann.

Es ist anzumerken, dass die Messungen in den beiden Tiefen zeitlich nacheinander erfolgen. Dies bedeutet, es wurde erst eine Messung an der oberen Schicht und dann eine Messung an der unteren Schicht durchgeführt. Zwar erfolgen beide Messungen bei gleichen Klimaänderungen, jedoch kann nicht direkt bei dem Auftreten eines Effektes an der einen Schicht auf seine gleichzeitige Auswirkung an der anderen Schicht geschlossen werden. Der Vergleich der absolut gemessenen Verformungswerte kann jedoch durchgeführt werden. Während die obere Schicht eine deutliche Verformung von bis zu einem Streifen zeigt, ist bei der unteren Schicht nur eine Verformung vom Bruchteil eines Streifens zu erkennen. Dies könnte dafür sprechen, dass die Feuchtigkeit nur langsam zur unteren Lackschicht vordringt.

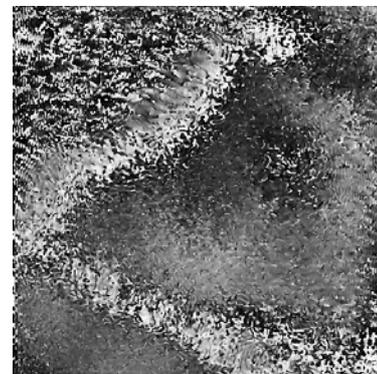
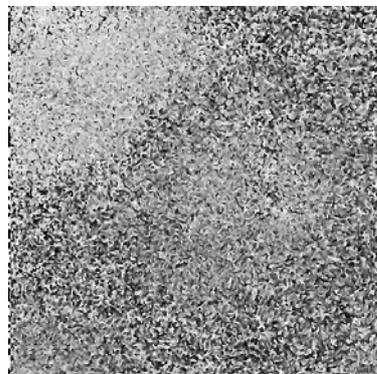
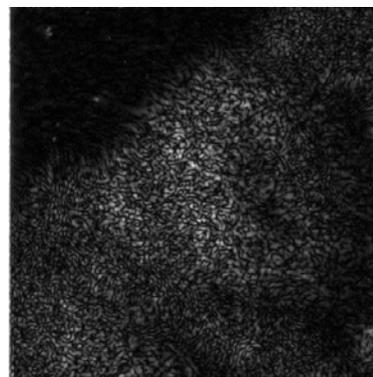
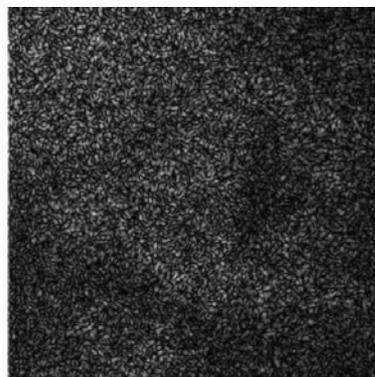
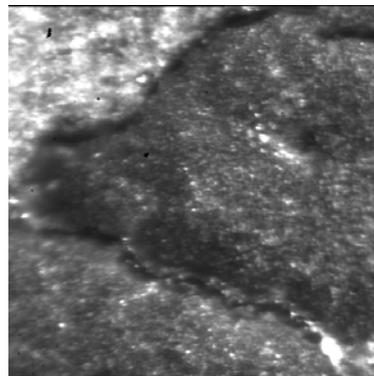


Abb. 4.38: Schichtenselektive Messung an F006/99. Oben: Weißlichtbild des Messbereichs. Mitte links : Rekonstruierte Intensität der tieferen Schicht. Mitte rechts: Rekonstruierte Intensität der Oberfläche. Unten links: Verformungsmessung an der tieferen Schicht bei einer Feuchtigkeitsänderung von 60 auf 70 %r.F. Unten rechts: Verformungsmessung bei der gleichen Feuchtigkeitsänderung an der Oberfläche.

Um diese Vermutung bestätigen zu können, muss an beiden Schichten eine gleichzeitige Messung erfolgen.

4.6.1.2 F011/98

Es wird eine schichtenselektive Verformungsmessung an dem mit HEMA gefestigten Fragment F011/98 durchgeführt. Dies ist das Fragment, dessen Verhalten bisher am besten untersucht wurde. Die Messung an der oberen Schicht kann daher mit bekannten Ergebnissen verglichen werden, da sie zu ähnlichen Resultaten, wie die Mikroskop-ESPI-Messungen führen sollten.

Es wird wieder zu Beginn eine Strukturmessung, dargestellt in Abb. 4.39, durchgeführt. Unter der oberen Lackschicht ist in einer Tiefe von 100 μm eine deutlich abgegrenzte zweite Schicht zu erkennen. An diesen beiden Schichten wird eine Verformungsmessung durchgeführt. Wie am Verlauf der Schichten zu erkennen ist, muss das Messobjekt jedoch erst leicht verkippt werden, damit die zu vermessenden Schichten parallel zur Kohärenzschicht liegen. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Abb. 4.40 dargestellt. Das Weißlichtbild in Abb. 4.40 oben zeigt bei genauer Betrachtung viele kleine Unterbereiche. Die Intensitätskarten von beiden Schichten in der Mitte von Abb. 4.40 zeigen eine recht gleichmäßige Intensitätsverteilung. Nur ein kleiner Bereich am oberen Rand des Intensitätsbildes der unteren Schicht, dargestellt in Abb. 4.40 mitte links, zeigt eine sehr niedrige Intensität. Ein wesentlicher Unterschied zu der vorhergehenden Messung liegt darin, dass hier die Messung an beiden Schichten gleichzeitig erfolgt. Während des Klimawechsels wird abwechselnd Schicht 1 und Schicht 2 angefahren und Interferogramme aufgenommen.

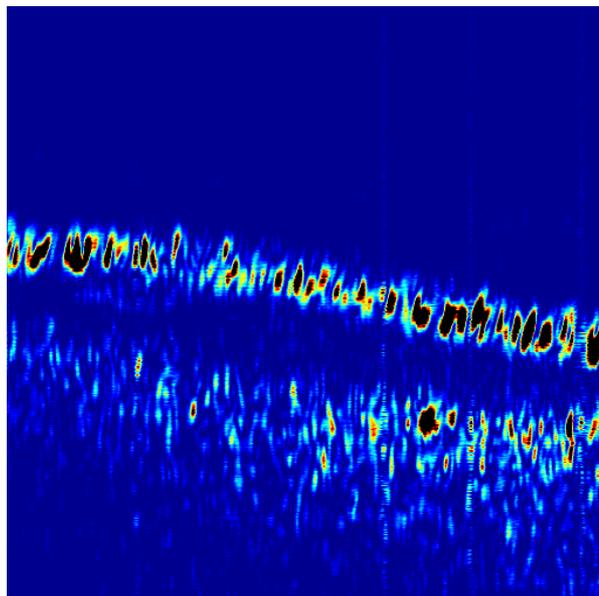


Abb. 4.39: 2-D-Tiefenprofil gemessen an F011/98. Länge des Profils ca. 1 mm, Tiefe ca. 512 μm .

Die dargestellten Sägezahnbilder entstehen bei einer Feuchtigkeitsänderung von 68 auf 73 % r.F. Das Sägezahnbild, das die Verformung der oberen Schicht darstellt, zu sehen in Abb. 4.40 unten rechts, zeigt eine Verformung von ca. einem halben Sägezahnstreifen. Die dabei entstehende Struktur zeigt wieder abflachende Schüsseln. Die Verformungsmessung steht in guter Übereinstimmung mit den in Kapitel 2 erzielten Ergebnissen. Bei der Betrachtung des Sägezahnbildes der unteren Schicht, dargestellt in Abb. 4.40 unten links, ist fast keine Verformung zu erkennen. Die einzelnen Unterbereiche, die an der Oberfläche zu erkennen sind, lassen sich erahnen. In Abb. 4.41 ist dargestellt, was passiert, wenn sich die Oberfläche stärker verformt; hier bei einem Feuchtigkeitswechsel von 90 auf 80 % r.F. Rechts in Abb. 4.41 ist das Sägezahnbild der Verformungsmessung an der Oberfläche zu erkennen. Die Verformungen betragen hier bis zu einem Sägezahnstreifen. Im Verformungsbild der tieferen

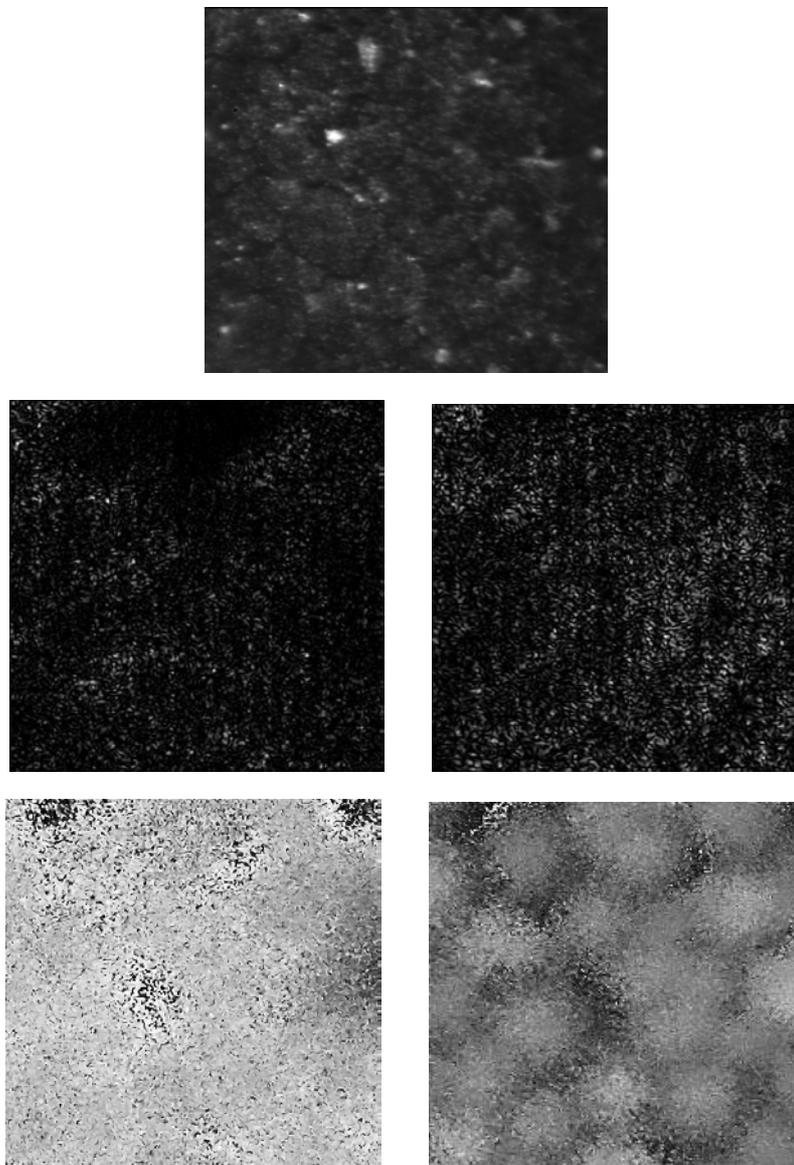


Abb. 4.40: Ausschnitt aus der schichtenselektiven Verformungsmessung an F011/98 in dem Bereich in dem auch Abb. 4.39 gemessen wurde. Oben: Weißlichtbild des Messbereichs. Mitte: rekonstruierte Intensitäten, links in 100 μm Tiefe, rechts an der Oberfläche. Unten: Dazugehörige Sägezahnbilder bei einer Feuchtigkeitsänderung in der Klimakammer von 68 auf 73 % r.F.

zweiten Schicht in Abb. 4.41 links ist hingegen die Verformung nur noch zu erahnen, da die Dekorrelation recht hoch ist. Die Korrelation beträgt gerade noch 25 %. Um dieses Problem zu umgehen, ist es notwendig, Bilder mit einer hohen Wiederholrate auszuwerten. Die Verformung kann dann in mehreren kleinen Schritten aufaddiert werden. In Abb. 4.42 ist der Verlauf der gesamten Messung aufgetragen. Die Verformung an der unteren und an der oberen Schicht wird wie schon in Kapitel 2.5.3.1 beschrieben durchgeführt. Die Sägezahnbilder, die hierfür verglichen werden, liegen jeweils 2 Minuten auseinander. Treten während dieser Zeit schon hohe Dekorrelationen auf, kann bis auf einen Bildabstand von 30 Sekunden zurückgegangen werden. Dies ist der Zeitabstand, mit dem in dieser Messung die Interferogramme aufgenommen werden.

Die Auswertung der Verformungsmessung an der oberen Schicht ergibt eine maximale Verformung von ca. 5 μm dies deckt sich gut mit den Ergebnissen aus Kapitel 2.5. Die Messung an der unteren Schicht ergibt eine maximale Verformung von ca. 2 μm . Dies bedeutet für die untere Schicht eine etwas geringere Verformung als für die obere Schicht, wenn berücksichtigt wird, dass die Verformung an der oberen Schicht die Bewegung der unteren Schicht beinhaltet. Weiterhin ist zu sehen, dass die Verformung der unteren Schicht, zeitgleich mit der Verformung der oberen Schicht erfolgt. Die Lackschicht reagiert somit insgesamt recht schnell auf eine Feuchtigkeitsänderung. Dies ist ein Effekt, der so nicht erwartet wird. Es wird mit einem verzögerten Eindringen der Feuchtigkeit zu tieferen Schichten hin gerechnet. Daraus resultierende Spannungen sollten zu der Schüsselbildung führen. Scheinbar ist nicht das zeitverzögerte Eindringen der Feuchtigkeit über die Oberfläche ausschlaggebend. Es bleibt damit noch die Möglichkeit, dass das Eindringen der Feuchtigkeit über die Risse zu einem Spannungsaufbau zwischen Schüsselmitte und Schüsselrand und somit zu einem Aufrollen führt.

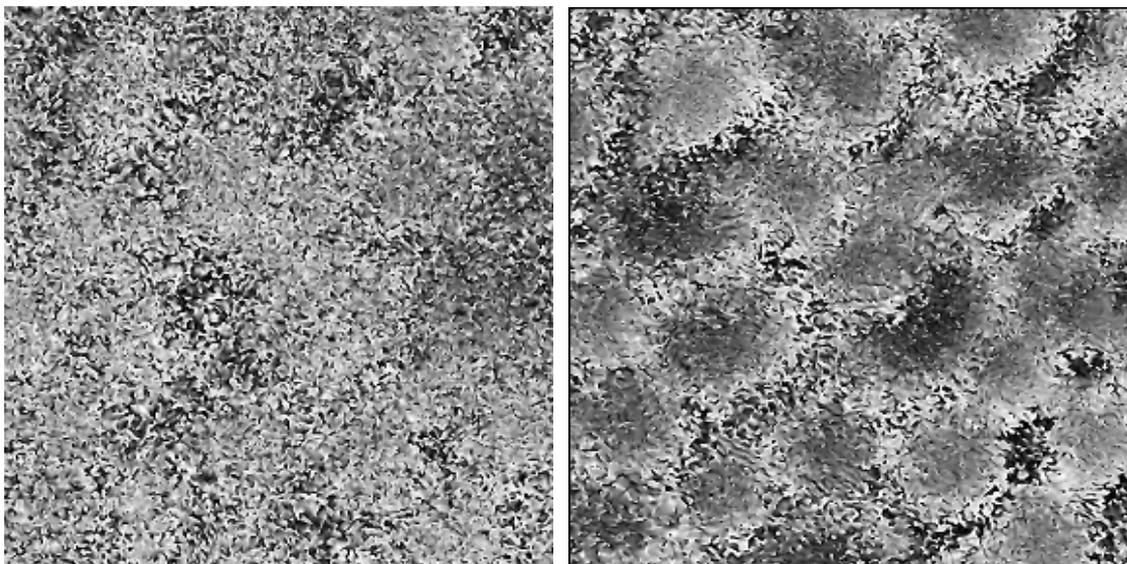


Abb. 4.41: Sägezahnbilder aus der gleichen Messung wie Abb. 4.30, jedoch bei einer Feuchtigkeitsänderung von 90 auf 80 % r.F. Links: In 100 μm Tiefe. Rechts: An der Oberfläche.

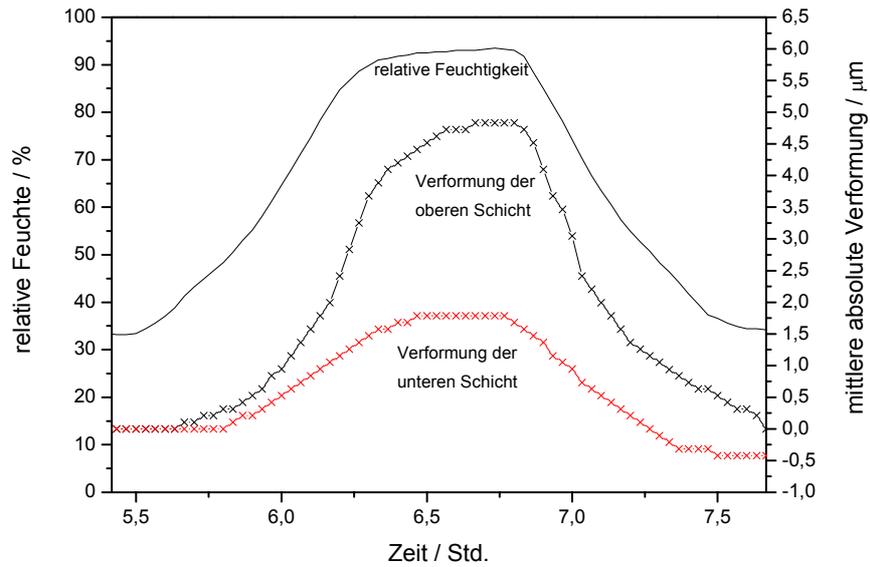


Abb. 4.42: Schichtenselektive Verformungsmessung an F011/98. Die Feuchtigkeitsänderung in der Klimakammer ist als durchgezogene Linie und die zugehörige mittlere absolute Verformung als Kreuz, für jeden Messwert dargestellt. Die roten Kreuze stehen für die Messung an der unteren Lackschicht und die schwarzen Kreuze für die Messung an der oberen Lackschicht.

4.6.1.3 F005/98

Die abschließende Messung wird an Fragment F005/98 durchgeführt. Dieses mit HEMA behandelte Fragment macht bisher den stabilsten Eindruck. Eine Verformungsmessung an dem schwarzen Grundierungslack hat fast keine Reaktion auf Feuchtigkeitsänderungen gezeigt. In Abb. 4.43 ist ein Schnitt durch den Grundierungslack auf Fragment F005/98 dargestellt. Die Oberfläche macht einen sehr geschlossenen Eindruck. Es dringt fast gar kein

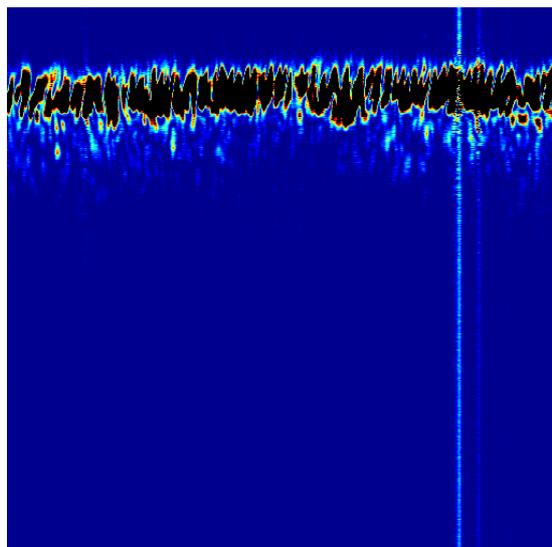


Abb. 4.43: 2-D-Tiefenprofil gemessen an F005/98. Länge des Profils ca. 1 mm, Tiefe ca. 512 μm.

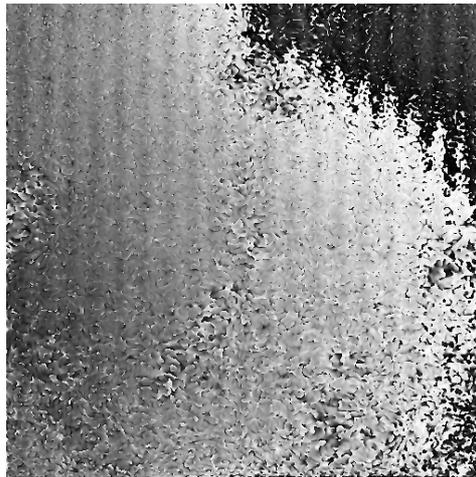


Abb. 4.44: Sägezahnbild einer Verformungsmessung an F005/98, aufgenommen bei einer Feuchtigkeitsänderung von 30 auf 50 % r.F. Zwischen der Aufnahme der miteinander verrechneten Bilder liegen 6 Stunden.

Licht in die Probe ein. Die Messung kann kein zweischichtiges System auflösen. Da nach Auskunft des BLfD die Proben fast ausnahmslos mit einer doppelten Grundierungsschicht versehen sind, müssen diese hier so dicht zusammen liegen, dass sie mit dem hier verwendeten System nicht mehr aufgelöst werden können. Da nur eine Schicht zu erkennen ist, wird auch nur an dieser Schicht eine Verformungsmessung durchgeführt, diese Messung erfolgt jedoch ebenfalls mit der kurzkohärenten Lichtquelle. Das Fragment wird vor dieser Messung einen Tag lang bei ca. 30 °C und fast 100 % r.F. gelagert, um einen besonders hohen Stress, vor allem auf das Festigungsmittel, auszuüben. Es wird dann kontinuierlich mehreren Klimazyklen ausgesetzt. Ein Auszug aus der Messung ist in Abb. 4.44 dargestellt. Es werden zwei Interferogramme miteinander verglichen, die im Abstand von 6 Stunden aufgenommen wurden. In der Zwischenzeit sind 3 komplette Klimazyklen durchgeführt worden. Nach sechs Stunden Messung haben die Feuchtigkeitswechsel nur zu einer leichten Verkipfung der Oberfläche geführt. Die Korrelation ist immer noch sehr hoch. Sie liegt bei über 80 %. Dies spricht dafür, dass während der 6 Stunden fast keine Änderungen an der Oberfläche stattgefunden haben. Das typische Craquelémuster ist nicht zu erkennen. Die Geschlossenheit der Oberfläche scheint diese sehr stabil zu machen. Sie bietet scheinbar fast keine Angriffsmöglichkeit für das Eindringen von Feuchtigkeit.

4.7 Diskussion LCSI

Das LCSI-System ist sowohl ein ESPI- als auch ein OCT-System. Das Auflösungsvermögen bei OCT-Messungen ist mit einem konventionellen OCT-System vergleichbar. Die laterale Auflösung hängt auch hier vom abbildenden System und die Tiefenauflösung von der verwendeten Lichtquelle ab. Die Strukturvermessung von Objekten mittels der LCSI hat sich als vergleichbar zu ähnlichen OCT-Messungen herausgestellt. Durch Einsatz des räumlichen Phasenschiebens besteht eine schnelle und einfache Methode, die innere Struktur von

teiltransparenten Objekten zu vermessen. Es ist somit gut möglich, Schichtungen zu erkennen und hierdurch die geeigneten Stellen für eine Verformungsmessung ausfindig zu machen. Durch eine geschickte Wahl von zwei Lichtquellen mit unterschiedlicher Mittenwellenlänge oder durch Vergleichsmessungen mit und ohne dispersivem Medium [MF00], [BV99], [DM99] und [HF99], ist es möglich, weitere Objekteigenschaften zu bestimmen. Es könnte z.B. der Brechungsindex der einzelnen Schichten gemessen werden [FY96], [HO98]. Auch spektroskopische Eigenschaften des Untersuchungsobjekts können ermittelt werden [Fuj00b]. Hieraus wäre es evtl. möglich, den Verbleib von PEG/PU oder HEMA innerhalb der Strukturen zu detektieren.

Bei Verformungsmessungen, die nicht an tieferen Schichten erfolgen, ist die Qualität der Sägezahnbilder vergleichbar mit denen normalen Mikroskop-ESPI-Messungen. Bei Messungen an Volumenstreuern ist sie sogar besser. Durch die kurze Kohärenzlänge kommt es jedoch auch zu Einschränkungen, so können z.B. nur Flächen vermessen werden, die innerhalb der Kohärenzschicht liegen.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass sich das LCS-System als geeignet herausgestellt hat, um Verformungen an geschichteten Objekten zu vermessen. Es gibt jedoch starke Einschränkungen. Bei Messungen an tiefer gelegenen Schichten, durch eine Schicht hindurch, beeinflusst die Bewegung der oberen Schicht die Messung an der unteren Schicht. Je größer der Abstand der Schicht voneinander ist, um so kleiner wird dieser Effekt. Bei Schichten, die nur einige 10- 100 μm auseinander liegen führen schon Verformungen der oberen Schicht, die einen Sägezahnstreifen ergeben zu einer vollständigen Dekorrelation der Messung an der darunter liegenden Schicht. Eine Verformungsmessung der unteren Schicht kann sogar bei konstanter oberer Schicht nicht mehr als ein bis zwei Sägezahnstreifen zeigen, bevor es zu einer vollständigen Dekorrelation kommt. Es ist deshalb notwendig, mit einer hohen Bildaufnahmezeit zu arbeiten. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zwischen der Aufnahme zweier Bilder zu einer totalen Dekorrelation kommt, wird dadurch kleiner. Durch die Verwendung eines räumlichen Phasenshifts, können die Interferogramme mit der Bildrate der verwendeten Kamera aufgenommen werden. Dies führt zu einer Auswertung mittels zeitlicher Demodulation [Hun93] [JB00].

5 Zusammenfassung und Ausblick

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Untersuchung von Farbaufrägen auf Kulturgütern unter Verwendung von Speckle-Messtechniken mit unterschiedlicher Kohärenz.

Die Objekte, die in dieser Arbeit untersucht werden, sind Teile der Terrakotta-Armee des Ersten Chinesischen Kaisers und im Speziellen Lackschichten auf den Terrakotta-Fragmenten. Diese Lackschichten zeigen bei Austrocknung eine starke Schrumpfung, die zur Zerstörung der Lackschichten und der teilweise darauf befindlichen farbigen Pigmentschichten führt. Dieses Verhalten soll durch eine Festigung unterbunden werden.

In einer Zusammenarbeit zwischen dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD), der Materialprüfungsanstalt (MPA) Bremen, der Universität Oldenburg und dem Museum der Terrakotta-Armee unter Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMB+F) werden vor allem zwei Festigungsmethoden favorisiert, die soweit wirksam sind, dass die damit gefestigten Proben nicht mehr klimatisiert gelagert werden müssen. Die genauen Auswirkungen dieser Festigungsmethoden werden nun mit unterschiedlichen Specklemesstechniken untersucht.

Zuerst werden Messungen mit einem Mikroskop-ESPI-System durchgeführt (Electronic Speckle Pattern Interferometry; ESPI). Dieses System wird mit einem Laser mit einer Kohärenzlänge von einigen 10 cm betrieben. Die Verwendung eines Mikroskops ist notwendig, um die auftretenden Verformungsgebiete mit einem Durchmesser von einigen 10 bis zu einigen 100 μm aufzulösen. Es wird eine 6,4-fache Vergrößerung benutzt, was die Detektion von Verformungsgebieten bis hinunter zu einer Größe von $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ erlaubt. Um das System besonders für schnell auftretende Verformungen nutzen zu können, wird ein räumlicher Phasenshift eingeführt.

Die Verformungsmessungen, die an den verschieden gefestigten Fragmenten durchgeführt werden, zeigen, dass die Festigung der Lackschichten eine Reaktion auf Feuchtigkeitsänderungen nicht vollständig verhindert. Bei der ersten Methode, bei der in der Probe befindliches Wasser durch Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) ersetzt und dieses mittels eines Elektronenstrahls gehärtet wird, kommt es nach einiger Zeit zu dem Auftreten von Craquelémustern in der Lackschicht, wobei die Entstehung dieses Craquelémusters schon detektiert werden kann, bevor es unter dem Lichtmikroskop sichtbar wird. Weiterhin kann durch reproduzierbare Messungen das Langzeitverhalten beurteilt werden. Es ist festzustellen, dass die Bewegung der einzelnen Schollen des Craquelémusters mit der Zeit an Dynamik zunehmen.

Die zweite Festigungsmethode, bei der das Wasser in der Probe durch PEG (Polyethylenglycol 200) ersetzt wird und die Lackschicht mittels PU (Polyurethan) an den Untergrund geklebt wird, führt zwar nicht zu einer Craquelébildung, jedoch treten auch hier Risse auf. Die Verformung der Lackschicht im Bereich dieser Risse kann dann noch deutlich größer sein als bei der Verwendung von HEMA.

Da das Verhalten der Lackschichten auf die Festigungsmethoden mit dem Aufbau der Schichten in Zusammenhang stehen muss, werden Strukturmessungen durchgeführt. Diese Strukturmessungen erfolgen mit Hilfe des Kohärenzradars und der OCT (Optical Coherence Tomographie). Bei beiden Verfahren werden Lichtquellen mit einer Kohärenzlänge von 10 bis 20 μm verwendet. Es zeigt sich, dass der zweischichtige Aufbau der meisten Fragmente sehr gut aufgelöst werden kann. Es können Stellen lokalisiert werden, an denen nur eine Schicht vorliegt. Liegen zwei Schichten vor, so kann der Verlauf dieser Schichten zueinander detektiert werden. Der Abstand der Schichten liegt in den meisten Fällen im Bereich von 30 μm .

Im letzten Teil dieser Arbeit wird ein neues Verfahren, hier mit LCS (Low Coherence Speckle Interferometry) bezeichnet, entwickelt, um Verformungsmessungen an geschichteten Objekten und im Speziellen an den zwei Lackschichten auf den Terrakotta-Fragmenten tiefenselektiv durchführen zu können, wodurch das Verhalten einer der Lackschichten unabhängig von dem Verhalten der anderen Lackschicht beobachtet werden kann. Das LCS-System vereint die Eigenschaften eines Mikroskop-ESPI- und eines OCT-Systems. Hierzu wird der bisher im Mikroskop-ESPI verwendete Laser durch eine SLD mit einer Kohärenzlänge von 30 μm ersetzt. Es ist nun möglich, mit dem System Schichten, die weiter als die Kohärenzlänge der Lichtquelle auseinander liegen, getrennt voneinander zu vermessen.

Der Einsatz an Testobjekten zeigt die Fähigkeiten des Systems, die deutlich über die eines normalen ESPI-Systems hinausgehen. Es kann an einem mit HEMA gefestigten Terrakotta-Fragment festgestellt werden, dass bei Feuchtigkeitsänderungen eine höhere Mobilität der oberen der beiden Lackschichten vorliegt. Dieses Verhalten muss durch die Vermessung mehrerer verschiedener Proben unter gleichen Feuchtigkeitsbedingungen noch weiter verifiziert werden. Wenn dieses Verhalten für HEMA grundsätzlich bestätigt werden könnte, würde dies eine Begründung für das auftretende Craquelémuster und die feuchtigkeitsbedingte Schüsselbildung liefern.

Eine einzelne mit HEMA gefestigte Probe zeigt weder ein Craquelémuster noch eine feuchtigkeitsbedingte Schüsselbildung. Strukturmessungen mit dem LCS-System ergeben, dass hier nur eine Lackschicht nachgewiesen werden kann. Wenn hier zwei Lackschichten vorliegen, dann ist ihr Abstand kleiner als die Kohärenzlänge und kann somit nicht mehr aufgelöst werden.

Das neu entwickelte LCS-System zeigt sich für die gestellten Aufgaben als gut geeignet.

Die Kombination aus Strukturmessung zur Detektion möglicher Messbereiche und ihrer Position mit der Fähigkeit, an diesen Bereichen Verformungsmessungen durchführen zu können, stellt eine sinnvolle Ergänzung zu herkömmlichen ESPI-Messungen da.

Das LCS-System weist jedoch bei Messungen an tiefer liegenden Schichtungen deutliche Einschränkungen auf. Dadurch, dass das Licht über die einzelnen Schichten, die es passieren muss, um zu der zu vermessenden Schicht zu gelangen, mit diesen wechselwirkt, führt eine Bewegung der Schichten zu einer Dekorrelation. Für die meisten Messungen bedeutet dies, dass nur Verformungen bis zu ein bis zwei Sägezahnstreifen detektiert werden können.

Um die Auflösung des Systems in dieser Hinsicht zu verbessern, müssen die grundlegenden Mechanismen, die zu dieser Dekorrelation führen, geklärt werden. In dieser Arbeit wird anhand eines simplen Modells ein erster Eindruck über die zu der Dekorrelation beitragenden Prozesse und ihre Auswirkungen gegeben. Für eine genauere Betrachtung ist aber die Einbeziehung der Streucharakteristik der zu vermessenden Objekte unumgänglich.

Die Verbesserungen aber auch die Einschränkungen, die die Verwendung einer kurzkohärenten Lichtquelle bei Mikroskop-ESPI-Messungen bringt, werden in dieser Arbeit recht ausführlich behandelt. Der Einsatz eines räumlichen Phasenshifts für OCT-Messungen ist jedoch auch neu und zeigt deutliche Vorteile besonders durch die Möglichkeit, die Lichtintensität aus einer Tiefe mit der Aufnahme eines einzigen Bildes bestimmen zu können. Gerade schnell ablaufende Prozesse müssten sich mit dieser Methode gut verfolgen lassen.

Die Weiterentwicklung des LCS-Systems, z.B. durch die Verwendung anderer Lichtquellen mit unterschiedlicher Wellenlänge und Kohärenz, oder durch den Einsatz neuartiger Bildaufnehmer wie z.B. CMOS-Kameras, mit einer besonders hohen Dynamik, birgt mit Sicherheit neue und interessante Einsatzmöglichkeiten.

6 Literaturverzeichnis

- [AE99] A. El Jarad, Anwendung der Videoholographie für mikroskopische Bereiche zur Untersuchung von Alterungsprozessen historischer Farbschichten, Diplomarbeit, Universität Oldenburg (1999).
- [AH99] P. Aswendt, R. Höfling, K. Hiller, Testing microcomponents by speckle interferometry, *EUROPTO Conference on Microsystems Metrology and Inspection SPIE proc.* 3825, München (1999), 165-173.
- [BB95] T. Bothe und J. Burke, Minimierung störender Phasenfluktuationen beim Einsatz des Phasenshiftverfahrens in der elektronischen Specklemusterinterferometrie. Diplomarbeit, Universität Oldenburg (1995).
- [BB97] T. Bothe, J. Burke und H. Helmers, Spatial phase shifting in electronic speckle pattern interferometry: Minimization of phase reconstruction errors, *Appl. Opt.* 36.22 (1997), 5310-5316.
- [BB98] E. Beaurepaire, A.C. Boccara, M. Lebec, L. Blanchot und H. Saint-Jalmes, Full-field optical coherence microscopy, *Opt. Lett.* 23.4 (1998).
- [BD97] M. Bashkansky, M.D. Duncan, M. Kahn, D. Lewis III and J. Reintjes, Subsurface defect detection in ceramics by high-speed high-resolution optical coherent tomography, *Opt. Lett.* 22.1 (1997), 61-63.
- [BD98] M. D. Duncan and M. Bashkansky, Subsurface defect detection in materials using optical coherence tomography, *Opt. Exp.* 2.13 (1998), 540-543
- [Bin94] L. Binwu, Die ewigen Kämpfer, Verlag Sanqin, Provinz Shaanxi (1994).
- [BH00] M. A. Beeck und W. Henschel, Laser Metrology- A Diagnostic Tool in Automotive Development Processes, *International Conference on Trends in Optical Nondestructive Testing*, Lugano (2000).
- [BL71] J. N. Butters und J. A. Leendertz, A double exposure technique for speckle pattern interferometry, *J. Phys. E: Sci. Instr.* 4 (1971), 277-279.
- [BL93] A. Brotzeit und A. Lemke, Investigations on applicability of highly birefringent single-mode optical glass fibers in electronic speckle interferometry (ESPI), Diplomarbeit, Universität Oldenburg, (1993).
- [BR00] M. Bashkansky und J. Reintjes, Statistics and reduction of speckle in optical coherence tomography, *Opt. Lett.* 25.8 (2000).

- [BS01] S. Bourquin, P. Seitz und R.P. Salathé, Optical coherence topography based on a two-dimensional smart detector array, *Opt. Lett.* 26.8 (2001).
- [BS78] *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band III Optik, Walter de Gruyter Berlin (1978).
- [Bu98] A. A. Burganskii, A. G. Levandovskii und G. G. Levin, Application of Longitudinal Optical Tomography for Dental Introskopy in vitro, *Optics and Spectroscopy* 84.3 (1998), 439-442.
- [BV99] G. Brun, I. Verrier, D. Troadec, C. Veillas, J. P. Goure, Low coherence interferometric technique for detection of transparent objects in turbid media, *Opt. Comm.* 168 (1999), 261-275.
- [CB01] Hrsg./Ed.: C. Blänsdorf, E. Emmerling und M. Petzet, Die Terrakottaarmee des Ersten Chinesischen Kaisers Qin Shihuang, *Arbeitsheft des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege*, **83**, Karl M. Lipp Verlag, München (2001).
- [CC93] H. Chiang, W. Chang und J. Wang, Imaging through random scattering media by using cw broadband interferometry, *Opt. Lett.* 18.7 (1993), 546-548.
- [DB99] A. Dubois, A. C. Boccara und M. Lebec, Real-time reflectivity and topography imagery of depth-resolved microscopic surfaces, *Opt. Lett.* 24.5 (1999), 309-311.
- [DL97] H. Dirks und K. Lindner, Zum Einsatz von Glasfasern in der Elektronischen Specklemuster-Interferometrie (ESPI), Diplomarbeit, Universität Oldenburg, (1997).
- [DM99] D. P. Dave und T. E. Millner, Optical low-coherence reflectometer for differential phase measurements, *Opt. Lett.* 25.4 (2000), 227-229.
- [Do00] Á. F. Doval, A systematic approach to TV holography, *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000), R1-R36.
- [Et95] Peter Ettl, Studien zur hochgenauen Objektvermessung mit dem „Kohärenzrada“, Diplomarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg (1995).
- [Ett96] Dr. Ettemeyer GmbH & Co., Neu Ulm, *ISTRA*, Programmbeschreibung, Version 2.01 (1996).
- [Eth93] E. Emmerling und C. Thieme, Zur Farbfassung der Terrakottaarmee des 1. Kaisers Qin Shihuangdi, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München (1993).

- [FB00] T. Fricke-Begemann, G. Gülker, K. D. Hinsch und H. Joost, Mural inspection by vibration measurements with TV-holography, *Opt. Las. Eng.* 32 (2000), 537-548.
- [FB01] T. Fricke-Begemann und J. Burke, Speckle interferometry: Three-dimensional deformation field measurement with a single interferogram, *Appl. Opt.* 40.28 (2001), 5011-5022.
- [FB02] T. Fricke-Begemann, Optical Measurement of Deformation fields and Surface Processes with Digital Speckle Correlation, Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (2002).
- [FJ01] M. H. Frosz, M. Juhl, M. H. Lang, Optical Coherence Tomography: System Design and Noise Analysis, Riso National Labatory Roskilde, July (2001).
- [FO93] W. Stöbel, *Fourieroptik-Eine Einführung*, Springer, Berlin (1993).
- [Fuj93] E. A. Swanson, J. A. Izatt, M. R. Hee, D. Huang, C. P. Lin, J. S. Schuman, C. A. Puliafito, J. G. Fujimoto, In vivo retinal imaging by optical coherence tomography, *Opt. Lett.* 18.21 (1993) 1864-1866.
- [Fuj99] W. Drexler, U. Morgner, F. X. Kärtner, C. Pitris, S. A. Boppart, X. D. Li, E. P. Ippen, J. G. Fujimoto, In vivo ultrahigh-resolution optical coherence tomography, *Opt. Lett.* 24.17 (1999) 1221-1223.
- [Fuj00] J. G. Fujimoto, W. Drexler, U. Morgner, F. Kärtner und E. Ippen, Optical Coherence Tomography, *Opt. Phot. News* Jan. (2000), 24-31.
- [Fuj00b] U. Morgner, W. Drexler, F. Kärtner, X. D. Li, C. Pitris, E. P. Ippen, J. G. Fujimoto, Spectroscopic optical coherence tomography, *Opt. Lett.* 25.2 (2000) 111-113.
- [FY96] T. Fukano, I. Yamaguchi, Simultaneous measurement of thicknesses and refractive indices of multiple layers by a low-coherence confocal interference microscope, *Opt. Lett.* 21.23 (1996), 1942-1944.
- [Geo01] Das Puzzle des Jahrhunderts, *Geo*, 7 (2001), 68-84.
- [GG93] G. Gülker, Deformations- und Korrelationsmessungen an Denkmalgestein unter Feuchteinfluß mit Elektronischer Specklemuster Interferometrie (ESPI), Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (1995).
- [GG95] G. Gülker, Monitoring of humidity induced deformations on fragment of Qin Shihuang's terracotta warriors due to humidity changes using video-holography, *AG angewandte Optik und Institut für Technische und Angewandte Physik*, Universität Oldenburg (1995).

- [GG97] G. Gülker, Monitoring of climatic deformations on fragments of Qin Shihuang's terracotta warriors using video-holography, Part II, *AG angewandte Optik und Institut für Technische und Angewandte Physik*, Universität Oldenburg (1997).
- [Goo75] J.W. Goodman, Statistical Properties of Laser Speckle Patterns, *Laser Speckle and Related Phenomena*, Hrsg. J. C. Dainty, Springer Verlag, Berlin (1975).
- [GS00] G. Schulz, Leistungscharakteristika eines optischen Profilometers, Schriftliche Hausarbeit zur Prüfung für das Lehramt an Gymnasien, Universität Oldenburg (2000).
- [Häu92] T. Dresel, G. Häusler und H. Venzke, Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar, *Appl. Opt.* 31.7. (1992), 919-925.
- [Häu97] M. Bail, G. Häusler, J. M. Herrmann, F. Kiesewetter, M. W. Lindner und A. Schultz, Optical coherence tomography by „spectral radar“ for the analysis of human skin, *SPIE* 3196 (1997).
- [Häu98] P. Ettl, B. Schmidt, M. Schenk, I. Laszlo, G. Häusler, Roughness parameters and surface deformation measurements by „Coherence Radar“, *Int. Conf. On Appl. Opt. Met., Balatonfüred*, Jun. (1998), 1-8.
- [HB98] C. K. Hitzenberger, A. Baumgartner, A. F. Fercher, Dispersion induced multiple signal peak splitting in partial coherence interferometry, *Opt. Comm.* 154 (1998), 179-185.
- [HF99] C. K. Hitzenberger, A.F. Fercher, Differential phase contrast in optical coherence tomography, *Opt. Lett.* 24.9 (1999), 622-624.
- [HH97] H. Hinrichs, K. D. Hinsch, J. Kickstein, M. Böhmer, Light-in-flight holography for visualization and velocimetry in three-dimensional flows, *Opt. Lett.* 22.11 (1997), 828-830.
- [HL02] I. Hsu, C. Lu, C. Deng, C. C. Yang, C. Chiang, C. Lin und Y. Kiang, Optical coherence tomography using nonlinear optics in fiber for broadband source generation, *Opt. Comm.* 212 (2002), 391-396.
- [HO98] M. Haruna, M. Ohmi, T. Mitsuyama, H. Tajiri, H. Maruyama, M. Hashimoto, Simultaneous measurement of the phase and group indices and the thickness of transparent plates by low-coherence interferometry", *Opt. Lett.* 23.12 (1998), 966-968.
- [HS94] H. Stöcker, Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch Frankfurt am Main (1994).

- [HT92] H. Hallbauer und M. Teerling, Theoretische und experimentelle Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Oberflächenveränderungen und der Dekorrelation zugehöriger Laser-Speckle-Felder, Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (1992).
- [Hun93] J. Huntley, H. Saldner, Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis, *Appl. Opt.* 32.17 (1993), 3047-3052.
- [IK99] G. Indebetouw, P. Klysubun, Optical sectioning with low coherence spatiotemporal holography, *Opt. Com.* 172 (1999), 25-29.
- [IK00] G. Indebetouw, P. Klysubun, Imaging through scattering media with depth resolution by use of low-coherence gating in spatiotemporal digital holography, *Opt. Lett.* 25.4 (2000), 212-214.
- [IK01] G. Indebetouw, P. Klysubun, T. Kim, T. Poon, Imaging properties of scanning holographic microscopy, *J. Opt. Soc. Am. A* 17.3 (2000), 380-390.
- [IK02] P. Klysubun, G. Indebetouw, A posteriori processing of spatiotemporal digital microholograms, *J. Opt. Soc. Am. A* 18.2 (2001); 326-330.
- [IO89] K. J. Ebeling, *Integrierte Optoelektronik*, Springer-Verlag, Berlin (1989).
- [IR00] I. Rogner, Festigung und Erhaltung der polychromen Qi-Lackschichten der Terrakottakrieger des Qin Shihuangdi durch Behandlung mit Methacryl-Monomeren und Elektronenstrahlbehandlung, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München (2000).
- [JB00] J. Burke, Application and Optimisation of the spatial Phase Shifting Technique in Digital Speckle Interferometry, Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (2000).
- [JP81] J. Poeck, Die Superlumineszenzdiode: Ein breitbandiges Sendeelement für die optische, Dissertation, Technische Universität München (1981).
- [JW77] R. Jones und C. Wykes, Decorrelation effects in speckle-pattern interferometry; 2. Displacement dependent decorrelation and applications to the observation of machine-induced strain, *Opt. A.*, 24.5, (1977), 533-550.
- [JW83] R. Jones und C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press (1983).
- [KE89] K. J. Ebeling, *Integrierte Optoelektronik*, Springer-Verlag Berlin (1989).
- [KC85] K. Creath, Phase shifting speckle interferometry, *Appl. Opt.* 24.18 (1985), 3053-3058

- [KN89] A. Kramer und H. Neunaber, Laserspeckle-Verfahren zur Untersuchung von Verformungen an Steinen, Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (1989).
- [KW97] C. Kunze und Volker Wilkens, Optimierung der räumlichen Phasenschiebetechnik in der elektronischen Specklemuster-Interferometrie (ESPI) zur Messung von 3-D-Verformungen, Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (1997).
- [LA95] F. Lange, M. Adams, Untersuchung von Depolarisationseffekten an rauen Oberflächen als begrenzende Faktoren in der elektronischen Specklemuster Interferometrie, Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (1995).
- [Lau93] W. Lauterborn, T. Kurz, M. Wiesenfeldt, *Kohärente Optik*, Springer Verlag Berlin (1993).
- [LB94] L. Binwu, *Die ewigen Kämpfer*, Verlag Sanqin, Provinz Shaanxi (1994).
- [LS00] G. Li, P. Sun, P. C. Lin, Y. Fainman, Interference microscopy for three-dimensional imaging with wavelength-to-depth encoding, *Opt. Lett.* 25.20 (2000), 1505-1507.
- [MB02] R. A. Martínez-Celorio, B. Barrientos, F. J. Sanchez-Marín, IL. M. López, J. A. Rayas, Out-of-plane displacement measurement by electronic speckle pattern interferometry in presence of large in-plane displacement, *Opt. Comm.* 208 (2002), 17-24.
- [MF00] D. F. Murphy und D. A. Flavin, Dispersion-insensitive measurement of thickness and group refractive index by low-coherence interferometry, *Appl. Opt.* 39.25 (2000), 4607-4615.
- [MF79] M. Francon, *Laser Speckle and Applications in Optics*, Academic Press New York (1979).
- [NS81] P. Neiswander und G. A. Slettemoen, Electronic speckle pattern interferometric measurements of the basilar membrane in inner ear, *Appl. Opt.*, 20.24 (1981), 4271-4276.
- [OL97] O. J. Lökberg, B. E. Seeberg und K. Vestli, Microscopic video speckle interferometry, *Opt. Las. Eng.*, 26 (1997), 313-330.
- [OP91] M. Owner-Petersen, Dekorrelation and fringe visibility: On the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers, *J. Opt. Soc. Am. A*, 8.7, (1991), 1082-1089.

- [ÖS02] D. Ösling, T. Storen, A. Royset, O. J. Lokberg, L. O. Svaasand, T. Lindmo, Multiple-depth probing by wavelength multiplexed Low Coherence Interferometry, Norwegian University of Science and Technology (2002).
- [PT02] G. Pedrini und H. J. Tiziani, Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system, *Appl. Opt.* 41.22 (2002), 4489-4496.
- [PTB84] A. Abou-Zeid, Emissionswellenlänge kommerzieller Laserdioden als Funktion ihrer Betriebsparameter, PTB-Mitteilungen Forschen und Prüfen, 94, PTB Braunschweig (1984).
- [SB93] M. Sjö Dahl, L. R. Benckert, Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy, *Appl. Opt.* 32.13 (1993), 2278-2284.
- [Sch90] V. Schaible, Überlegungen zum Phänomen der Schüsselbildung an Leinwandgemälden, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 4.2 (1990), 235-250.
- [SF93] J. Schwider, O. Falkenstörfer, H. Schreiber, A. Zöllner und N. Streibl, New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry, *Opt. Eng.* 32.8 (1993), 1883-1885.
- [So75] Sony XC-75, Sony Service Manual XCM-7573.
- [SS98] H. Sagehorn und R. Schuh, Aktive Phasenregelung in einem elektronischen Specklemuster Interferometer (ESPI) mit Glasfaserführung, Diplomarbeit, Universität Oldenburg (1998).
- [Thie93] C. Thieme, Zur Farbfassung der Terrakottaarmee des I. Kaisers Qin Shihuangdi- Untersuchung und Konservierungskonzept, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München (1993).
- [Tia92] F. Tianchou, Die unterirdische Tonarmee des Kaisers Qin Shi Huang, Verlag neue Welt, Beijing (1992).
- [Tuch00] V. Tuchin, Tissue Optics – Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis, SPIE PRESS, Bellingham (2000).
- [Wen96] Z. Wenli, The Qin Terracotta Army, Scala Books, London (1996).
- [Zei] Zeiss, Oberkochen, Stereomikroskop SV8 und Aufsatzkamera MC 63.

7 Danksagung

Hiermit bedanke ich mich bei allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Insbesondere danke ich Professor Dr. Klaus Hinsch, der mir die Möglichkeit gegeben hat, bei ihm in der Arbeitsgruppe zu promovieren, für die vielen anregenden Diskussionen, nach denen ich immer wieder voller neuer Ideen steckte.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Professor Dr. Karlheinz Maier für seine Bereitschaft, sich als Korreferent zur Verfügung zu stellen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Dr. Gerd Gülker für die gute Zusammenarbeit und dafür, dass er mir immer mit einem guten Rat zur Seite stand.

Ein ganz besonderer Dank gilt Akram Eljarad, mit dem ich unendlich viele Diskussionen geführt habe, für dessen Beitrag zu dieser Arbeit. In diesem Zusammenhang bedanke ich mich auch bei Holger Joost, für seinen Rat vor allem in elektronischen Dingen. Mit ihm ist unsere dreier Kaffeerrunde komplettiert worden.

Ein Dank geht auch an alle anderen Mitglieder der Arbeitsgruppe, wie z.B. Dr. Thomas Fricke-Begemann und Dr. Heinz Helmers, die für jedes Problem ein offenes Ohr hatten.

In diesem Zusammenhang danke ich unserem Techniker Rolf Harms, der auch die unmöglichen Proben und Probenhalter möglich gemacht hat. Karin Wolff danke ich dafür, dass sie mich und mein Chaos im Büro ertragen hat, was bestimmt nicht immer leicht war.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeitern des Projekts für die vielen Diskussionen und die immer wieder interessanten Projekttreffen.

Meinen Eltern danke ich für ihrer fortwährende Unterstützung und ihre aufbauenden Worte, vor allem Freitags, bei einer schönen Tasse Kaffee im Wohnzimmer (Ja schon wieder Kaffee).

Bei meiner Schwester bedanke ich mich dafür, dass sie meinetwegen das letzte halbe Jahr auf den Computer verzichtet hat.

Meiner Frau Karen danke ich für alles. Dafür, dass sie so viel Geduld mit mir gehabt hat, dass sie meine Arbeit tausend und ein mal gelesen hat und dafür, dass sie mich in allem unterstützt hat. (Ich liebe Dich!!!)

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe.

Oldenburg, Februar 2003

Arne Kraft

Lebenslauf

Persönliche Daten

Vor- und Zuname: Arne Kraft
 Geburtsdatum: 07.07.1972
 Geburtsort: Brake
 Staatsangehörigkeit: deutsch
 Familienstand: verheiratet
 Straße und Wohnort: Schildstr. 5
 27753 Delmenhorst

Bildungsgang

Schulbesuche: 1978 – 1982 Grundschule in Brake, Kirchhammelwarden
 1982 – 1984 Orientierungsstufe in Brake – Süd
 1984 – 1991 Gymnasium Brake
 Studium: 01.10.1992 – 20.03.1998 Carl von Ossietzky Universität
 Oldenburg
 Studienfach: Diplomphysik
 Diplomarbeit: Herstellung und Charakterisierung planarer Thermoelemente
 (Zur Untersuchung des Wärmeübertrags in einem UHV-STM)

Berufstätigkeit

Universität Oldenburg: 1.5.1998 – 30.11.2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der
 Arbeitsgruppe Angewandte Optik.
 Projekt: Untersuchungen zur Erhaltung chinesischer
 Polychromien der Qin- und Han-Zeit mittels
 elektronenmikroskopischer, videoholografischer sowie
 ausgewählter biologischer und chemischer Methoden.

Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge

G. Gülker, K. D. Hinsch, A. Kraft, Deformation monitoring on ancient terracotta warriors by microscopic TV-holography, *Opt. Las. Eng.* 36.5 (2001) 501-513.

W. Muller-Hirsch, A. Kraft, M. T. Hirsch, J. Parisi, A. Kittel, Heat transfer in ultrahigh vacuum scanning thermal microscopy, *Journal of Vacuum Science & Technology A-Vacuum Surfaces and Films* 17.4,Part1 Jul-Aug 1999 (1999), 1205-1210.

G. Guelker, K. D. Hinsch, A. Kraft, Lasers in the conservation of artworks LACONA IV: "Deformation monitoring on polychrome chinese terracotta warriors using tv-holography", ICOMOS France, Paris (2001), 211-214.

G. Guelker, K. D. Hinsch, A. Kraft, TV-holography on a microscopic scale: deformation monitoring on polychrome terracotta warriors, Proc. Int. Conf. Lausanne 'Interferometry in speckle light', Springer, Berlin (2000) 337-344.

A. Kraft, G. Gülker, K. D. Hinsch, 102. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik, DGaO, 05. - 09.06.01, Tiefenaufgelöste Verformungsmessungen an historischen Farbschichten mit Kurzkohärenz-Videoholografie, Göttingen (2001), 94.

A. Kraft, G. Gülker, K. D. Hinsch, 101. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik, DGaO, 13.-17.6.00, Kurzkohärenz-Videoholografie zur schichtenselektiven Verformungsmessung, Jena (2000) 16.

A. El Jarad, G. Gülker, K. D. Hinsch, A. Kraft, 103. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik, DGaO, 22. - 25.05.02, Mikroskop-ESPI: Möglichkeiten und Grenzen bei der Detektion von kleinskaligen Verformungen ausgelöst durch Salzkristallisation, Innsbruck (2002) 68.

A. Kraft, G. Gülker, K. D. Hinsch, A. El Jarad, SPIE, Low-coherence videoholography for sub-surface deformation measurements in layered objects, SPIE 'Laser Interferometry' Vol.4101 SPIE Proceedings, Bellingham (2000) 89-96.