

Weiterentwicklung der Shearografie mit räumlichem Phasenschieben als zerstörungsfreies Prüfverfahren für die automatisierte Serienüberwachung

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultäten
der Universität des Saarlandes

von
Christopher Petry

Saarbrücken

2021

Tag des Kolloquiums: 30.11.2021

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Jörn Walter

Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Martin Spies

Prof. Dr.-Ing. Michael Schuth

Prof. Dr. rer. nat. Georg von Freymann

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Frank Aubertin

Danksagung

Insbesondere danke ich Herrn Priv.-Doz. Dr. rer. nat. habil. Martin Spies dafür, mir die kooperative Promotion an der Universität des Saarlandes ermöglicht zu haben. Er hat mir zu jeder Gelegenheit wertvolle, konstruktive Ratschläge zur wissenschaftlichen Praxis gegeben. Besonders wirkungsvoll empfand ich seine Perspektive für die Herausforderungen der angewandten Forschung. Er verfolgte den Fortschritt meiner Arbeit mit großem Interesse und investierte viel Zeit in meine Unterstützung, was mich sehr motiviert hat. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schuth für die individuelle Förderung bei der wissenschaftlichen Arbeit in seinem Technikum OGKB, auch im Bereich meiner persönlichen Entwicklung. Seine Philosophie, „es gibt kein Problem, das unlösbar ist“, beschränkt sich nicht auf die Forschung. Sie schafft ein allgemeines Verständnis und Bewusstsein für die Umwelt, wodurch neue Wege entstehen. Bemerkenswert war auch seine stetige Begeisterung für meine fortschreitenden Forschungsergebnisse. Somit blieben umfangreiche und tiefgründige Diskussionen zwischen Tür und Angel nicht aus, die meine Fähigkeit zur Selbstkritik steigerten. Gleichzeitig durfte der Praxisbezug nie zu kurz kommen, was bei der Arbeit in einem fensterlosen Laserlabor mehr oder weniger unbewusst auftreten kann.

Ich danke den derzeitigen, als auch ehemaligen Mitarbeitern des OGKB Teams, allen HiWis und Assistenten, durch deren Unterstützung und Entlastung ich meine Arbeit vorantreiben konnte. Besonders erwähnenswert ist das Arbeitsklima im Technikum, zu dem jeder einzelne durch Motivation, Eigenständigkeit, Kreativität und seinem ganz individuellen Wesen beiträgt und beigetragen hat. Auch möchte ich den Laboringenieuren des OGKB danken, Herr Dipl.-Ing. Hammes und insbesondere Herr Dipl.-Ing. Robert. Er stand mir nicht nur mit Fachwissen zur optischen Messtechnik, sondern auch in allen anderen Lebenssituationen eines Doktoranden immer mit kritischem Rat und förderlicher Tat zur Seite. Ebenso danke ich allen Studenten, die trotz dem Weg des höchsten Widerstandes ins Technikum gefunden haben. Die hohen Ansprüche an ihre Arbeit war ihnen wohl bewusst, da sie mit noch höherer Leistung und Effektivität darauf antworteten und die Forschung entscheidend mit vorantrieben. In diesem Sinne danke ich auch der noch kleinen, doch stetig wachsenden Anzahl an Doktoranden der Fachrichtung Maschinenbau und Elektrotechnik an der Hochschule Trier. Ich hoffe sehr, dass die bedingungslose Zuarbeit, welche ich erleben durfte, auch zukünftig bestehen bleibt.

Ein Dankeschön gilt auch weiteren Mitarbeitern der Hochschule: den praktischen Realisten aus der Zentralwerkstatt Metallbau, insbesondere Herr Schmitt und Herr Gauer, den Problemlösern des Rechenzentrums sowie der Zentralwerkstatt Elektrotechnik und den guten Seelen des Sekretariats Maschinenbau, Frau Walter, Frau Mertes und Frau Kesselheim. Zudem danke ich Prof. Dr.-Ing. Zoppke, Prof. Dr.-Ing. Koch, Prof. Dr.-Ing. Böhm und Prof. Dr.-Ing. P. König für ihre freundliche Unterstützung. Nicht zuletzt danke ich Prof. Lianxiang Yang und seinen Doktoranden von der Oakland University in Michigan, USA, für die jahrelange und gewinnbringende Zusammenarbeit mit dem OGKB. Bei dem Aufenthalt in seinem Labor gewährte er tiefe Einblicke in seine Forschungsarbeit, darüber hinaus stand er stets für einen direkten Austausch zur Verfügung. Ich danke dem BMWi für die Förderung und der Firma Mesolt Engineering GmbH aus Trier sowie der Firma MS-ELECTRONICS GmbH aus Nistertal für die reibungslose Zusammenarbeit in dem gemeinsamen ZIM-Projekt. Das Verständnis für die Schnittstelle von Theorie und Praxis war dabei mehr als wertvoll für mich.

Zuletzt danke ich meinen Freunden und meiner Familie für ihr Verständnis in der gesamten Zeit meines Studiums und für die Unterstützung. Besonders danke ich meinem Onkel Harald, der meine Leidenschaft für den Maschinenbau geweckt hat, meinem Vater Herbert für sein unermüdliches Interesse und die ansteckende Motivation, meiner Mutter Hannelore für jegliche Versorgung in seelischen Angelegenheiten und meinem besten Freund Sascha, der mich immer auf dem Boden der Tatsachen hält.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungen	VI
Nomenklatur	VIII
Zusammenfassung	XII
Abstract	XII
1. Einleitung	1
1.1. Leichtbau für die Mobilität der Zukunft	1
1.2. Die Anforderungen der Massenproduktion	2
1.3. Zerstörungsfreie Prüfung	2
1.4. Das Potential der Shearografie	5
1.5. Grenzen der Shearografie und Ziel dieser Arbeit	8
2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik	11
2.1. Begriffsklärung zur Speckle-Interferometrie	12
2.2. Beleuchtung	13
2.2.a. Laser	13
2.2.b. Kohärenz und Interferenz	14
2.2.c. Speckleerscheinung	20
2.2.d. Verwendung von Laserdioden	24
2.2.e. Lasersicherheit	26
2.3. Kameratechnik	27
2.4. Interferometer-Aufbau und Mechanik	31
2.4.a. Holografie	31
2.4.b. Shearografie	35
2.4.c. Vergleich von Holografie und Shearografie für die ZfP	42
2.5. Signalverarbeitung	43
2.5.a. Phasenschieben zur Berechnung der Interferenzphase	44
2.5.b. Berechnung der Differenzphase bei Speckle-Bildern	47
2.5.c. Maskierung und Filterung	48
2.5.d. Demodulation	49
2.5.e. Trendbereinigung	54
2.5.f. Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)	55
2.6. Messparameter und Störeinflüsse	57
2.6.a. Messauflösung	57
2.6.b. Messbereich	61

2.6.c.	Messabweichung.....	65
2.6.d.	Dekorrelation.....	66
2.6.e.	Einflussgrößen	70
3.	Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode	72
3.1.	Stand der Forschung.....	72
3.2.	Grundlagen der Fourier-Transformation und der Trägerfrequenzmethode	73
3.2.a.	Fourier-Transformation allgemein und für zeitabhängige Funktionen.....	73
3.2.b.	Fourier-Transformation für eindimensional-ortsabhängige Funktion	76
3.2.c.	Fourier-Transformation für zweidimensional-ortsabhängige Funktionen.....	78
3.2.d.	Angewandte Fourier-Transformation am Bild	81
3.2.e.	Grundlagen der Trägerfrequenzmethode	85
3.3.	Optische Aufbauten entsprechend dem Ausgangspunkt der Weiterentwicklungen	86
3.3.a.	MI FFT CF SPS oop ESPSI.....	86
3.3.b.	MI FFT CF SPS ip ESPSI	91
3.3.c.	MI FFT CF SPS dual-shear ESPSI	92
3.3.d.	FFT CF SPS ESPI	94
4.	Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie	96
4.1.	Mach-Zehnder-Interferometer mit virtuellem Doppelspalt	96
4.1.a.	Interferometer-Aufbau.....	97
4.1.b.	Erzeugung der Trägerfrequenz.....	99
4.1.c.	Auslegung der optimalen SPS-Parameter	101
4.1.d.	Vor- und Nachteile gegenüber MI FFT CF SPS oop ESPSI	105
4.1.e.	VDS MZ ESPI	105
4.2.	Gitterblenden	107
4.2.a.	Ansatz und Auslegung	107
4.2.b.	Anwendung	109
4.3.	Weiterentwicklungen des VDS MZ.....	111
4.3.a.	3D ESPSI und 3D ESPI.....	111
4.3.b.	Dual-shear ESPSI.....	120
4.3.c.	One-shot ESPSI	127
5.	Messgeräte, Steuerung und Software.....	133
5.1.	Mach-Zehnder Messgerät	133
5.1.a.	4f Modul	134
5.1.b.	RGB Beleuchtungsmodul.....	136
5.1.c.	Technische Daten	138
5.2.	Interferoskop.....	139

5.2.a.	Endoskopische Interferometrie	139
5.2.b.	Interferoskop 5 und Messsystem	139
5.2.c.	Technische Daten	143
5.3.	Mikroferoskop	143
5.3.a.	Mikroskopische Interferometrie	143
5.3.b.	Mikroferoskop 2	145
5.3.c.	Technische Daten	149
5.4.	Digitale Anregungs- und Beleuchtungssteuerung.....	149
5.4.a.	Steuerprogramm	150
5.4.b.	Steuergerät.....	151
5.4.c.	Technische Daten	152
5.5.	Softwareentwicklung OPTIS 4	152
6.	Fehlstellen- und Anregungsmechanik	157
6.1.	Fehlstellenmechanik.....	157
6.1.a.	Statische Belastung	159
6.1.b.	Dynamische Belastung	161
6.1.c.	Detektierbare Fehlstellendimension und -position.....	164
6.2.	Anregungsmechanik.....	168
6.2.a.	Anregungsarten und Anregungseinheiten	168
6.2.b.	Entwickelte Anregungseinheiten.....	170
6.2.c.	Anregungsverfahren.....	177
7.	Messungen und Auswertung.....	185
7.1.	Zusammengefasste Ergebnisse	185
7.2.	Ausgewählte Messungen	187
7.2.a.	MZ, Acrylschaumklebeband, diverse Fehlstellen, mechanisch/thermisch, TT	187
7.2.b.	MZ, CFK Bauteil aus Prepreg, diverse Fehlstellen, mechanisch/thermisch, ZfP	190
7.3.	Ausgewählte neuartige Messungen	193
7.3.a.	MZ, NFK Laminat, Riss, mechanisch, TT	193
7.3.b.	MZ 4f, Waben-Komposit Platte, Schlagschäden, mechanisch	197
7.3.c.	MZ 3D, Aluminiumstrebe und Keramikbecher, Bruch/Risse, mechanisch/thermisch	203
7.3.d.	MZ dual-shear (oop), Holzscheibe und Glasplatte, Risse/Bruch, thermisch	206
7.3.e.	IFK 5, GFK COPV, Gaseinschluss, thermisch, DS	210
7.3.f.	MFK 2, Rasierer-Schermesser, Bruch, mechanisch, VT	213
7.3.g.	MFK 2, Schaftfräser, Riss, thermisch, VT	215
8.	Automatisierung der Shearografie	217
8.1.	Automatisierungssoftware	218

8.1.a.	Automatische Datenerfassung und Datenevaluation	218
8.1.b.	Entwickelte Evaluationsalgorithmen	220
8.2.	Ausgewählte Prüfergebnisse aus dem Bereich der Automatisierung.....	229
8.2.a.	MZ, NFK Monocoque (proTRon EVOLUTION), Datenerfassung	229
8.2.b.	IFK 5, GFK COPV, Datenerfassung	234
8.2.c.	MZ, Kunststoff Kfz-Türgriffe, Datenevaluation	236
Fazit		241
Ausblick		245
Literaturverzeichnis		250
Abbildungsverzeichnis.....		263
Tabellenverzeichnis		285
Relevante Veröffentlichungen des Autors, chronologisch.....		287
Lebenslauf		289

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
1D, 2D, 3D	Eindimensional, zweidimensional, dreidimensional
AM	Amplitudenmodulation
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Akustische Emissionsprüfung
Blob	Binary Large Object (dt.: binäres großes Objekt)
bw	Black-white (Kamera) (dt.: schwarz-weiß)
CAD	Computer-Aided Engineering
CCD	Charge Coupled Device
CF	Carrier Frequency (dt.: Trägerfrequenz)
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CMOS	Complementary Metal Oxid Semiconductor
CT	Computertomografie
cw	Continious Wave (dt.: Dauerstrich, bezogen auf den Betriebszustand eines Lasers)
DH	Digital Holography (dt.: digitale Holografie)
DIC	Digital Image Correlation (dt.: digitale Bildkorrelation)
DMS	Dehnungsmessstreifen
DOE	Diffraktives Optisches Element
DS	Digital Shearography (dt.: digitale Shearografie)
ESD	Electrostatic Discharge (dt.: elektrostatische Entladung)
ESPI	Electronic Speckle Pattern Interferometry (dt.: elektronische Speckle-Muster Interferometrie)
ESPSI	Electronic Speckle Pattern Shearing Interferometry (dt.: elektronische Speckle-Muster Shear-Interferometrie)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast Fourier Transformation (dt.: schnelle Fourier-Transformation)
FM	Frequenzmodulation
FN	False Negative (dt.: fälschlicherweise als NIO klassifiziertes Gutteil)
FP	False Positive (dt.: fälschlicherweise als IO klassifiziertes Schlechtteil)
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GPU	Graphics Processing Unit (dt.: Grafikprozessor)
GUI	Graphical User Interface (dt.: grafische Benutzeroberfläche)
IFK	Interferoskop
IO	In Ordnung (im Rahmen einer Fehlstellenprüfung)
ip	In-plane (dt. in der Ebene)
IR	Infrarot
KIM	Kohärente Intensitätsmodulation
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (dt.: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung)
LD	Laserdiode
LV	Laser Vibrometer
MFK	Mikroferoskop
MI	Michelson-Interferometer
MZ	Mach-Zehnder-Interferometer
MZPM	Mikrozugprüfmaschine
NaN	Not A Number (dt.: keine Zahl / kein Zahlenwert)
NFK	Naturfaserverstärkter Kunststoff
NIO	Nicht in Ordnung (im Rahmen einer Fehlstellenprüfung)

Abkürzung	Bedeutung
OGKB	Technikum für optische Messtechnik, Gerätebau, Konstruktion und Bauteiloptimierung
oop	Out-of-plane (dt. aus der Ebene heraus)
POD	Probability Of Detection (dt.: Fehlstellen-Auffindwahrscheinlichkeit)
pol	Polarisationsunterscheidend
QE	Quanteneffizienz
RFID	Radiofrequenz-Identifikation
RGB	Rot-Grün-Blau (Kamera, Beleuchtung)
RMS	Root Mean Square (dt.: quadratischer Mittelwert)
ROI	Region Of Interest (dt. Bereich von Interesse)
RT	Durchstrahlungsprüfung
S	Shearogramm
SHM	Structural Health Monitoring (dt. Bauwerkstruktur-Überwachung)
SLM	Spatial Light Modulator (dt.: räumlicher Lichtmodulator)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (dt.: Signal-Rausch-Verhältnis)
SPO	Spannungsoptik
SPS	Spatial Phase Shift (dt.: räumliches Phasenschieben)
TM	Terahertz-Prüfung
TPS	Temporal Phase Shift (dt.: zeitliches Phasenschieben)
TT	Thermografie
UT	Ultraschall
UV	Ultraviolett
V	Verzerrungsbild
VDS	Virtueller Doppelspalt
VT	Visuelle Prüfung
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Nomenklatur

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit
<i>lateinisch</i>		
a	Doppelspaltabstand	m
a_0	Fourier-Koeffizient für den schwingungslosen Gleichanteil	-
a_l	Laterale Messauflösung	m/Pixel
a_{pol}	Optimaler VDS-Abstand beim pol FFT CF SPS	m
a_{RGB}	Optimaler VDS-Abstand beim RGB FFT CF SPS	m
$a_{RGB,polH}$	Optimaler VDS-Abstand beim RGB pol FFT CF SPS für den horizontal-polarisierten Lichtanteil	m
$a_{RGB,polV}$	Optimaler VDS-Abstand beim RGB pol FFT CF SPS für den vertikal-polarisierten Lichtanteil	m
a_{We}	Auslenkung einer Welle	-
a_{We}^*	Komplex konjugierte Auslenkung einer Welle	-
a_ω	Fourier-Koeffizient für cosinusförmige Schwingungsanteile	-
A_s	Signalamplitude	-
A_{We}	Amplitude einer Welle	-
b	Breite (einer Spaltapertur)	m
b_F	(Detektierbare) Fehlstellenbreite	m
b_K	Filterkernbreite	Pixel
b_m	Mindestaufspürbreite (einer Fehlstelle im Shearogramm)	-
b_{pol}	Optimale Spaltbreite beim pol FFT CF SPS	m
b_{Px}	Pixelbreite	m
$b_{Px,K}$	Angenommene Bildsensor Pixelbreite nach Kanalzerlegung	m
b_{RGB}	Optimale Spaltbreite beim RGB FFT CF SPS	m
$b_{RGB,pol}$	Optimale Spaltbreite beim RGB pol FFT CF SPS	m
b_{Sp}	Specklebreite	m
$\bar{b}_{Sp}$	Mittlere Specklebreite	m
b_ω	Fourier-Koeffizient für sinusförmige Schwingungsanteile	-
B (als Index)	Indikator für einen Parameter bzgl. der blauen Laserquelle	-
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
c_k	Fourier-Koeffizient für komplexe Schwingungsanteile (Ortsfunktion)	-
c_{k_x}	Fourier-Koeffizient für komplexe Schwingungsanteile in x-Richtung (Zweidimensionale Ortsfunktion)	-
c_{k_y}	Fourier-Koeffizient für komplexe Schwingungsanteile in y-Richtung (Zweidimensionale Ortsfunktion)	-
c_ω	Fourier-Koeffizient für komplexe Schwingungsanteile (Zeitfunktion)	-
d_{Dekor}	Dekorrelationsgrenzwert	m
dk	Frequenzdifferential (Ortsfunktion)	-
dk_x	Frequenzdifferential in x-Richtung (Zweidimensionale Ortsfunktion)	-
dk_y	Frequenzdifferential in y-Richtung (Zweidimensionale Ortsfunktion)	-
dt	Zeitdifferential	-
$\vec{dx}$	Kantenlängenvektor eines infinitesimal kleinen Quaders	m
dx	Kantenlänge in x-Richtung	m
dx	Ortsdifferential (in x-Richtung)	-
dy	Kantenlänge in y-Richtung	m
dy	Ortsdifferential (in y-Richtung)	-
dz	Kantenlänge in z-Richtung	m
$d\omega$	Frequenzdifferential (Zeitfunktion)	-

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit
<i>lateinisch</i>		
D	Durchmesser (einer Kreisapertur)	m
$\vec{D}$	Formabweichungsvektor	m
$\bar{D}_{Sp}$	Mittlerer Speckledurchmesser	m
D_u, D_v, D_w	Formabweichung in x-, y- und z-Richtung	m
e	Eulersche Zahl	-
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	Einheitsvektoren in x, y und z-Richtung	-
f	Objektivbrennweite	m
f_0	Trägerfrequenz	1/m
$f_{0,RGB,polH}$	Optimale Trägerfrequenz beim RGB pol FFT CF SPS für den horizontal-polarisierten Lichtanteil	1/m
$f_{0,RGB,polV}$	Optimale Trägerfrequenz beim RGB pol FFT CF SPS für den vertikal-polarisierten Lichtanteil	1/m
f_c	Cut-off-Frequenz (dt.: „Abschnitt“-Frequenz)	1/m
$f_{c,RGB,pol}$	Optimale Cut-off-Frequenz beim RGB pol FFT CF SPS	1/m
f_{Eigen}	Eigenfrequenzen einer schwingenden Struktur	1/s
f_g	Gitterfrequenz	1/m
$f_{g,RGB,pol}$	Gitterfrequenz beim RGB pol FFT CF SPS	1/m
f_{max}	Maximale Abtastfrequenz (eines Bildsensors)	1/m
$f_{max,K}$	Maximale Abtastfrequenz nach Kanalerlegung	1/m
$f_{m,n}$	Funktionswert an der Stelle (m,n) einer Matrix	-
$f(t)$	Zeitabhängige Funktion	-
$f(x)$	Ortsabhängige Funktion	-
f_x	Ortsfrequenz in x-Richtung	1/m
f_y	Ortsfrequenz in y-Richtung	1/m
$f(x,y)$	Zweidimensional-ortsabhängige Funktion	-
F	Kraft	N
$F(k)$	Wellenzahlabhängige Fourier Transformierte	-
$F(k_x, k_y)$	Zweidimensional-wellenzahlabhängige Fourier Transformierte	-
$F(\omega)$	Kreisfrequenzabhängige Fourier Transformierte	-
$ F(\omega) $	Amplitude der Fourier Transformierten	-
g	Gitterkonstante	m
g_{pol}	Gitterkonstante beim pol FFT CF SPS	m
g_{RGB}	Gitterkonstante beim RGB FFT CF SPS	m
$g_{RGB,pol}$	Gitterkonstante beim RGB pol FFT CF SPS	m
G (als Index)	Indikator für einen Parameter bzgl. der grünen Laserquelle	-
H	Höhe	
I	Intensität (der Bildaufnahme) (bei Messobjekt im Grundzustand)	W/m ²
I'	Intensität (der Bildaufnahme) (bei angeregtem Messobjekt)	W/m ²
I_0	Hintergrundintensität	W/m ²
I_{max}	Intensität an einem Maximum im Streifenmuster	W/m ²
I_{min}	Intensität an einem Minimum im Streifenmuster	W/m ²
Im	Imaginärteil eines Funktionswerts	-
k	Kreiswellenzahl	1/m
k_x	Kreiswellenzahl in x-Richtung	1/m
k_y	Kreiswellenzahl in y-Richtung	1/m
l_k	Kohärenzlänge	m
m	Zählwert (in x-Richtung)	-
M_a	Abbildungsmaßstab	-

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit
<i>lateinisch</i>		
M_S	Spaltenanzahl einer Matrix	-
n	Zählwert (in y-Richtung)	-
N	Streifenordnung	-
$N_{+\Theta}$	Streifenordnung unter positivem Beleuchtungswinkel	-
$N_{-\Theta}$	Streifenordnung unter negativem Beleuchtungswinkel	-
N_{ip}	Streifenordnung für den reinen ip Verzerrungsanteil	-
N_{oop}	Streifenordnung für den reinen oop Verzerrungsanteil	-
N_Z	Zeilenanzahl einer Matrix	-
P	Punkt als Ort im Raum	-
P_{el}	Elektrische Leistung	W
P_{opt}	Optische Leistung	W
P_W	Wärmeleistung	W
r	Radius (einer Kugelwelle)	m
R (als Index)	Indikator für einen Parameter bzgl. der roten Laserquelle	-
Re	Realteil eines Funktionswerts	-
s	Optische Pfadlänge (Spiegelweglänge eines Lichtstrahls)	m
Δs	Optische Pfaddifferenz (Spiegelverschiebung) / Gangunterschied (beim Doppelspalt)	m
S	Hintergrund(licht)spektrum	-
S'	Träger(frequenz)spektrum	-
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis	-
t	Zeitvariable	s
t_k	Kohärenzzeit	s
T	Tiefe	m
$\vec{u}$	Verschiebungsvektor	m
u	Verschiebung in x-Richtung	m
u_G	Verschiebung des G Gitters	m
u_R	Verschiebung des R Gitters	m
v	Verschiebung in y-Richtung	m
w	Verschiebung in z-Richtung	m
x	Ortsvariable	m
x (als Index)	Indikator für einen Parameter bzgl. einer Shearrichtung in x	-
$\vec{x}$	Ortsvektor	m
x_0	Ausgangsortsvariable	m
$\vec{x}_0$	Ausgangsortsvektor	m
y	Ortsvariable	m
y (als Index)	Indikator für einen Parameter bzgl. einer Shearrichtung in y	-
y_0	Ausgangsortsvariable	m
z	Ortsvariable	m
z_0	Ausgangsortsvariable	m
<i>griechisch</i>		
α	Winkel in einem Dreieck	°
γ	Interferenzkontrast, auch Lasermodulation genannt	-
$\delta, \delta_x, \delta_y$	Shearbetrag, Shearbetrag in x-Richtung, Shearbetrag in y-Richtung	m
$\delta_w, \delta_{wx}, \delta_{wy}$	Shearwinkel, Shearwinkel in x-Richtung, Shearwinkel in y-Richtung	°
Δ	Differenzphase(nbild) / Zusatzphase	°
Δ'	Differenzphase(nbild) demoduliert	°
ϵ	Linearisierter Verzerrungstensor	-
$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$	Dehnungsanteile der Verzerrung	-

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit
<i>griechisch</i>		
$\epsilon_{xy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}, \epsilon_{zy}$	Gleitungsanteile der Verzerrung	-
Θ_{xy}	Beleuchtungswinkel in der xy-Ebene	°
Θ_{xz}	Beleuchtungswinkel in der xz-Ebene	°
Θ_{yz}	Beleuchtungswinkel in der yz-Ebene	°
λ	Wellenlänge	m
$\Delta\lambda$	Wellenlängenbandbreite	m
λ_m	Mittlere spektrale Wellenlänge	m
λ_{max}	Maximale spektrale Wellenlänge	m
λ_{min}	Minimale spektrale Wellenlänge	m
λ_{RGB}	Wellenlänge(n) beim RGB FFT CF SPS	m
ν	Frequenz	1/s
$\Delta\nu$	Frequenzbandbreite	1/s
ν_{max}	Maximale spektrale Frequenz	1/s
ν_{min}	Minimale spektrale Frequenz	1/s
σ_{Std}	Rauschen / Standardabweichung	-
φ	Phasenwinkel	°
φ_0	Nullphasenwinkel	°
Φ	Interferenzphase(nbild) (bei Messobjekt im Grundzustand)	°
Φ'	Interferenzphase(nbild) (bei angeregtem Messobjekt)	°
$\Phi(\omega)$	Phase der Fourier Transformierten	°
Φ_0	Trägerphase	°
ω	Kreisfrequenz	1/s
<i>mathematisch</i>		
∂	Differentialoperator erster Ordnung	-
δ	Delta-Funktion / Dirac-Impuls	-
$\in$	Element (von)	-
$\mathbb{N}$	Menge der natürlichen Zahlen	-
$\mathbb{N}_0$	Menge der natürlichen Zahlen inkl. dem Wert 0	-

Zusammenfassung

Die Shearografie bietet ein hohes Potential als zerstörungsfreies Prüfverfahren für die zukünftige Serienüberwachung von Leichtbaukomponenten in der Automobil-Massenproduktion. In Anbetracht der Verfahrensgrundlagen und der Messgeräte nach dem Stand der Technik sind bzgl. des Zieleinsatzes Defizite feststellbar. Die eingeschränkte Robustheit der Shearografie gegen Umgebungseinflüsse wie Vibrationen kann vor allem durch eine Steigerung der Messgeschwindigkeit verbessert werden. Hier bietet sich die Methode des räumlichen Phasenschiebens als Alternative zum aktuell verwendeten zeitlichen Phasenschieben zur Shearogrammberechnung an. Die Methode nach dem Stand der Forschung ist aufgrund unterschiedlicher Problematiken jedoch nur bedingt industrietauglich. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuer optischer Aufbau vorgestellt, der die Problematiken löst und zudem erweiterte Einsatzmöglichkeiten bietet. Auf Basis dessen werden drei Messgeräte inkl. Software entwickelt. Darüber hinaus werden notwendige Anregungseinheiten für die shearografische Prüfung realisiert und optimierte Anregungsverfahren angewendet. Die verbesserte Funktionalität der neuen Messtechnik wird in zahlreichen Versuchen aufgezeigt und die Ergebnisse anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren vergleichend gegenübergestellt. Abschließend wird die Messtechnik mithilfe einer neu entwickelten Automationssoftware unter industrieähnlichen Bedingungen getestet.

Abstract

Shearography offers great potential as a non-destructive testing method for the future series monitoring of lightweight components in automotive mass production. Regarding the basic principles of the method and the state-of-the-art measuring devices, deficits can be identified with regard to the target application. The limited robustness of shearography against environmental disturbances such as vibrations can be improved primarily by increasing the measurement speed. Here, the method of spatial phase shifting suggests itself as an alternative to the currently used temporal phase shifting for shearogram calculation. However, the state-of-the-art method is only limited suitable for industrial use due to various problems. In the context of this work a new optical setup is presented, which solves the problems and also offers extended application possibilities. Based on this, three measuring devices including software are developed. Furthermore, the necessary excitation units for shearographic testing are realized and optimized excitation methods are applied. The improved functionality of the new measuring technique is demonstrated in numerous tests and the results are compared to other non-destructive testing methods. Finally, the measuring technique is tested under industry-like conditions with the help of a newly developed automation software.

1. Einleitung

Die Einleitung beschreibt zunächst den Stand der Technik des Leichtbaus und seine Bedeutung für die Mobilität. Durch den zunehmenden Leichtbau im Automobil stellen sich neue Anforderungen an die Qualitätssicherung durch zerstörungsfreie Prüfverfahren, was kurz dargestellt wird. Anschließend werden die Vorteile der Shearografie in dem Bereich aufgezeigt. Die Grenzen der am Markt verfügbaren Shearografie-Messsysteme, bezogen auf die Automobilindustrie, werden erörtert und daraus das Ziel dieser Arbeit abgeleitet.

1.1. Leichtbau für die Mobilität der Zukunft

Die unumkehrbare Philosophie des Leichtbaus in der Konstruktion gibt uns bereits die Natur vor, wo Ressourceneffizienz und Gewichtseinsparung entscheidende Bausteine für die notwendige Anpassungsfähigkeit aller Lebewesen sind. Durch die Übertragung auf die industrielle Wirtschaft leitet sich gerade im Bereich des Transportwesens ein Potential ab, das zur Gewährleistung der eigenen Wettbewerbsfähigkeit eines jeden Unternehmens genutzt werden muss. Historisch gewachsen war der Leichtbau zunächst notwendige Voraussetzung für die Luft- und Raumfahrt. Daraufhin fand er Anwendung im Transportwesen, beim Schiffsbau und im Schienenverkehr [1]. Im gegenwärtigen Zeitalter, in dem der ökologische Fußabdruck eine zentrale Rolle spielt, ist Leichtbau Thema des Personenverkehrs geworden [2]. Im Jahre 2010 gab es bereits mehr als 1 Milliarde PKW auf der Erde [3]. Alleine im Jahr 2019 wurden 75 Mio. Neuzulassungen von Personenkraftwagen weltweit registriert [4]. Die Reduktion des Energieaufwandes und -verbrauchs sowie die Verbesserung der Nachhaltigkeit für jedes Fahrzeug ergibt daher in Summe einen enormen Anteil. Der Leichtbau ist eine treibende Kraft der aktuellen Politik der PKW Elektrifizierung. Doch auch unabhängig von der Antriebstechnologie ist er eine Grundvoraussetzung für die Mobilität der Zukunft.



Abbildung 1.1: Moderne Leichtbauteile: dreidimensional geformtes CFK-Bauteil oben links, Sandwichwaben-Bauteil aus harzgetränktem Papier mittig und Aluminium-Bauteil mit geschäumtem Kern.

1. Einleitung

Die ersten Ansätze des industriellen Leichtbaus waren einfache Werkstoffsubstitutionen von Stahl zu Leichtmetallen wie Titan, Aluminium oder Magnesium, später zu Kunststoffen [5]. Mit zunehmender Komplexität der Bauteile als anforderungsoptimierte Komposite verschiedenster Materialpaarungen und Geometrien, vgl. Abbildung 1.1, stiegen gleichzeitig die Anforderungen an die Qualitätssicherung. Eine rein visuelle Bewertung dieser inhomogenen Bauteile reicht schon lange nicht mehr aus, vor allem dann, wenn es um sehr kleine Schäden sowie Schäden unterhalb der Bauteiloberfläche geht. Stattdessen wurden zerstörungsfreie Prüfverfahren entwickelt, die heutzutage digital und teilweise automatisch eine Fülle an Bauteileigenschaften „abfragen“ können.

1.2. Die Anforderungen der Massenproduktion

Der große Unterschied der Qualitätssicherung im Bereich der Automobilindustrie, verglichen zu anderen Industriezweigen, ist die produzierte Stückzahl. Diese Massenproduktion stellt nie dagewesene Anforderungen an die Prüfverfahren. Neben der notwendigen Prüfgeschwindigkeit entsprechend der Produktionstaktzeit, wird zunehmend eine 100 % Kontrolle¹, s. [6], gefordert. Die Prüfungen müssen unter den rauen Einsatzbedingungen der Produktionshallen wie Vibrationen, Schmutz und Klimaeinflüssen robust laufen, idealerweise vollautomatisiert und *in-line*. Dabei ist die Datenmenge zur Datensicherung so gering wie möglich zu halten, denn Prüfergebnisse sicherheitsrelevanter Bauteile müssen bis zu 10 Jahre aufbewahrt werden [7]. Das Ziel des internationalen Zukunftsprojekts „Industrie 4.0“ ist eine Massenproduktion von kundenpersonalisierten Bauteilen in Losgröße 1. Diese Anforderung kann nur durch flexible und einfach adaptierbare Prüfsysteme erfüllt werden [8], s. auch [9].

1.3. Zerstörungsfreie Prüfung

Die optische Messtechnik erfüllt diese Anforderungen. Experten auf dem Gebiet stellen sogar fest, dass „Industrie 4.0 [...] ohne optische Messtechnik nicht umzusetzen“ ist ([10] Vorwort). Dieses Potential wurde in Deutschland bereits früh erkannt und der Schwerpunkt „Optische Technologie“ in der forschungspolitischen *Hightech-Strategie* der Bundesregierung von 2006 aufgeführt. Nun hat Deutschland in dieser Branche eine wichtige Stellung eingenommen, besonders im Bereich der „Bildverarbeitung und Messtechnik“. Bereits 2015 lag der Weltmarktanteil Deutschlands bei knapp 20 %, s. Abbildung 1.2. Das für 2020 geschätzte Inlandsprodukt liegt bei über 8 Mrd. €, Tendenz steigend ([11] S. 15 und S. 22).

Konkret hat die optische Messtechnik in den letzten Jahren starken Einzug in die Industrielandschaft gefunden. Sie arbeitet zerstörungsfrei, berührungslos, materialunabhängig, flächenhaft, hochgenau und schnell. Die hohe Messgeschwindigkeit begrenzt auch die Einflüsse durch Umgebungsstörungen auf ein Minimum, wodurch eine hohe Messrobustheit gewährleistet wird. Ihre berührungslose Arbeitsweise macht sie sehr flexibel hinsichtlich der zu untersuchenden Bauteilgeometrien. Bereits heute wird ein Großteil der Fertigungserzeugnisse der Automobilindustrie mit optischer Messtechnik in ihrer Form erfasst. Dies geschieht beispielsweise in nur einer Sekunde bei einer absoluten Genauigkeit von bis zu 1 Mikrometer bei Bauteilen von der Größe einer Autotür. Diese Formerfassung ersetzt nahezu vollständig die bisherige visuelle Prüfung. Was die Prüfung der inneren Bauteilstrukturen angeht, ist die Formerfassung jedoch nur begrenzt einsatztauglich.

¹ Auch *Vollprüfung* genannt.

1. Einleitung

Hier kommen die Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) ins Spiel, s. auch [27]. Die im Bereich Leichtbau gängigsten, rechnergestützten Verfahren zeigt Abbildung 1.3. Die Unterscheidung kann sehr gut durch die jeweils zum Einsatz kommenden elektromagnetischen Spektren erfolgen.

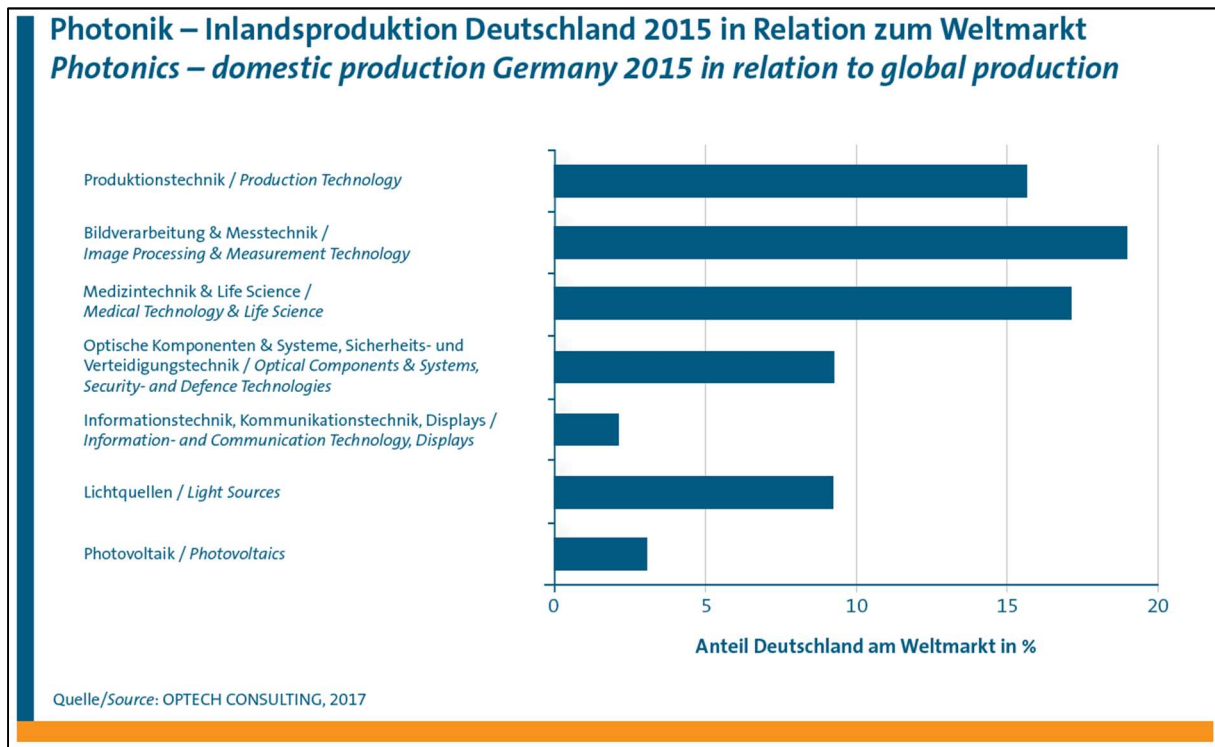


Abbildung 1.2: VDMA Branchenreport 2017 [11]; Photonik Weltmarktanteil Deutschlands.

Die optische Messtechnik arbeitet prinzipiell im Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums (ca. 380 nm bis 780 nm) bzw. leicht darüber hinaus im nahen Ultraviolett- (UV) bzw. nahen Infrarot- (IR) Bereich. Die digitale Shearografie (DS) ist das gängigste ZfP-Verfahren der optischen Messtechnik. Sie wird derzeit jedoch nahezu ausschließlich in der Luft- und Raumfahrt verwendet. Laserbeleuchtete Bauteile werden durch eine Kamera mit zusätzlich vorgeschalteten Optiken erfasst, wodurch bei kleinsten Bauteilanregungen Oberflächenverformungen im sub-Mikrometerbereich sichtbar gemacht werden, die auf Materialfehlstellen wie Risse oder Lunker schließen lassen.

Im IR-Bereich befindet sich das Arbeitsspektrum der Thermografie (TT²). Typische thermografische Prüfungen erfolgen bei einer Wärmeabstrahlung von 3 µm bis ca. 10 µm (Mittelwellen- bis Langwellen-TT) von Objekten bei Raumtemperatur (ca. 293 K). Bei der aktiven Thermografie wird im Bauteil eine geringe Wärmeanregung (z. B. 0,1 K) induziert und mittels einem mikrowellenempfindlichen Kameraschip („Thermografie-Kamera“) die sich zeitlich ändernde Temperaturverteilung auf der Oberfläche erfasst. Materialfehlstellen wie z. B. Beschichtungsablösungen rufen thermische Grenzschichten hervor und werden so z. B. durch sog. „Hotspots“ an der Bauteiloberfläche lokalisiert.

² Abkürzung nach [27].

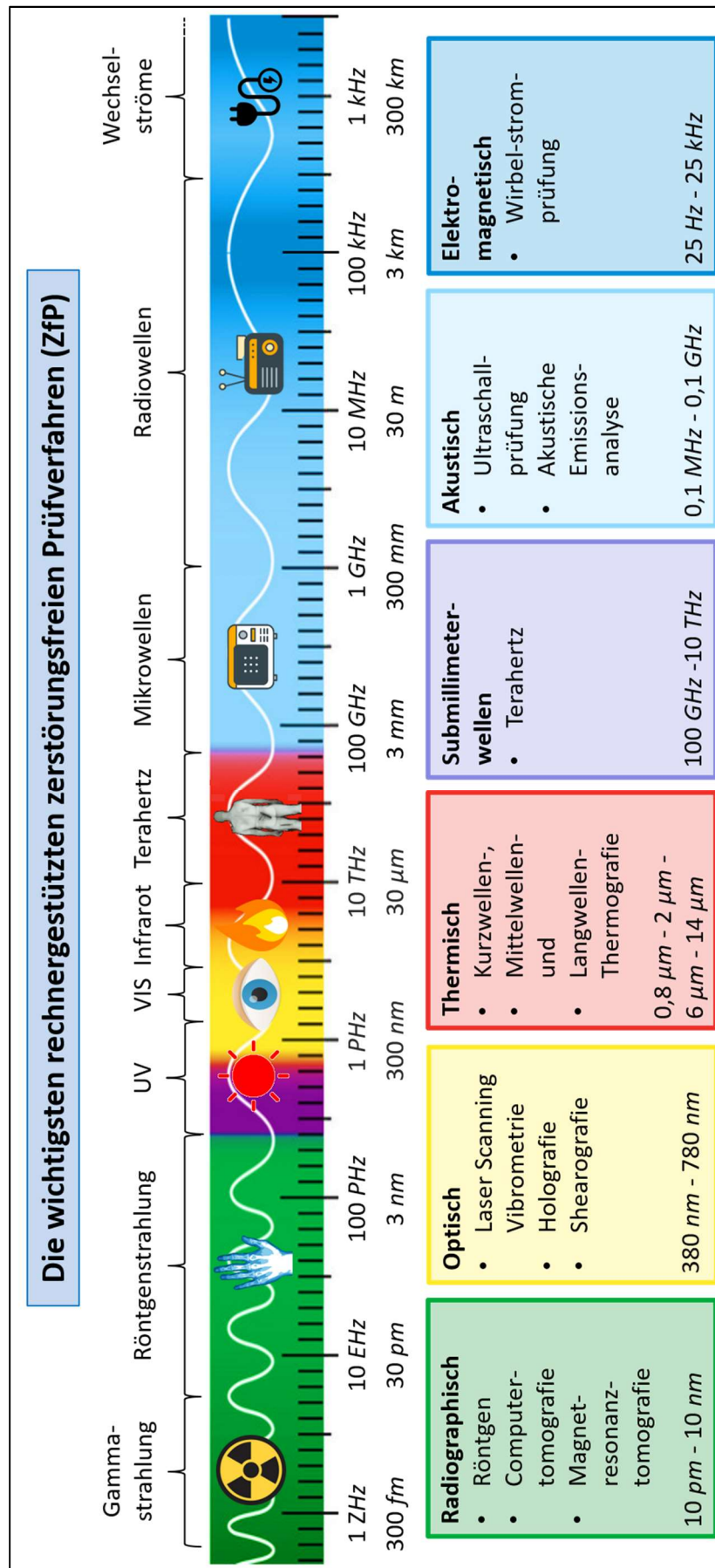


Abbildung 1.3: Die wichtigsten, rechnergestützten zerstörungsfreien Prüfmethoden im Leichtbau mit Signal-Wellenlänge bzw. Signal-Frequenz.

1. Einleitung

Das klassische Verfahren der Ultraschallprüfung (UT²) arbeitet im Bereich der Materiewellen von Festkörpern bei ca. 100 kHz bis 100 MHz. In Bauteile werden verschiedenste Schwingungen durch elektromechanische Piezowandler eingeleitet. Dies erfolgt oftmals berührend mittels Koppelmittel. Anschließend werden die im Bauteilinneren reflektierten Schwingungsanteile wieder im Ultraschallmessgerät erfasst und ausgewertet. Hierdurch können einfache Tiefenmessungen in Echtzeit oder ganze Volumenbestimmungen durch zeitaufwändige Rechnungen erfolgen. Indikatoren für Materialfehlstellen wie Rosteinträge oder Risse ergeben sich aus Schallimpedanz-Übergängen im Bauteil.

Aus der Medizintechnik bekannt ist die Durchstrahlungsprüfung (RT²) mit Röntgenstrahlung, die im industriellen Einsatz eine wichtige Rolle bei der ZfP eingenommen hat. Die sehr kurzwellige, hochenergetische Strahlung mit einer Wellenlänge von nur 10 pm bis 10 nm durchläuft selbst sehr dichte und teilweise dicke Materialien. Begrenzt ist dies durch die auftretende Absorption der Strahlung bedingt durch die Dicke, die Atom-Dichte und die atomare Ordnungs- und Massenzahl des Materials. Auf einem photoelektrischen Chip hinter dem Prüfbauteil wird die transmittierte Restintensität erfasst. Auf diese Weise können Dichteverteilungen im Bauteilinneren zweidimensional dargestellt und beispielsweise auch Gaseinschlüsse und Porosität gefunden werden. Darüber hinaus werden bei der Computertomografie (CT) viele Röntgenbilder, die aus verschiedenen Durchstrahlungsrichtungen erfasst wurden, zu einem dreidimensionalen Datensatz verrechnet. Dieser lässt weiterführende ZfP-Analysen zu.

Ein relativ junges, aber bereits bedeutendes Verfahren der ZfP ist die Terahertz-Prüfung (TM²). Moderne Femtosekundenlaser erzeugen Strahlungsfrequenzen von 100 GHz (3 mm Wellenlänge) bis 10 THz, welche für nicht-leitende Werkstoffe teilweise transmittierend sind. Ähnlich zur Vorgehensweise mit Röntgenstrahlung können auf diese Weise Analysen für die Fülle an industriellen Bauteilen aus Kunststoff erfolgen. Ein Vorteil der Terahertzstrahlung ist ihre gefahrlose Anwendung bei lebenden Organismen. Darüber hinaus ermöglicht die zeitaufgelöste TM-Spektroskopie, vergleichbar mit einer berührungslosen Ultraschallprüfung, rasternde Tiefen-Messungen mit sehr hoher Genauigkeit ab ca. 10 µm. Diese wird beispielsweise zur Schichtdickenmessung bei Autolackierungen eingesetzt, bei der viele Schichten gleichzeitig geprüft werden können.

Die Wirbelstromprüfung zur Analyse von vor allem homogenen, leitenden Werkstoffen, aber auch von CFK Bauteilen, wird hier aufgrund der eher geringen Überschneidung mit Leichtbaukomponenten nicht weiter betrachtet.

1.4. Das Potential der Shearografie

Grundsätzlich ist anzumerken, dass jedes ZfP-Verfahren aufgrund der Besonderheiten der einzelnen Prüfaufgaben seine Daseinsberechtigung hat. In vielen Fällen werden sogar mehrere Verfahren angewendet, die beispielsweise in Reihe geschaltet werden, sodass bzgl. der Wertschöpfung fehlerbehaftete Bauteile möglichst früh aussortiert werden können. Analog wird die DS im Folgenden als das Verfahren aufgezeigt, welches mit günstigen Mitteln und ohne großen Aufwand bereits eine Vielzahl entscheidender Prüfkriterien bewerten kann.

Da, wo die „ultimative“ Information im Vordergrund steht, ist die Röntgenprüfung das ideale Prüfverfahren, vor allem bei Anwendung der CT. Zeitverluste durch die Bestückung, eine zweiseitige Zugänglichkeit des Prüfbauteils und hohe Anlagenkosten u. a. aufgrund des notwendigen Strahlenschutzes müssen dabei als unkritisch bewertet werden können. Dementsprechend ist vor allem die Taktzeit der Massenproduktion, zumindest bei einer 100 % Kontrolle, das Kriterium, für welches die Röntgen-Prüfung in der zukünftigen Leichtbau-Automobilindustrie an ihre Grenzen stößt.

1. Einleitung

Gleichfalls ist bei der TM eine zweiseitige Zugänglichkeit des Prüfbauteils nötig, während die noch neuartigen Komponenten des Verfahrens eine Prüfanlage teuer machen. Darüber hinaus wird die Forderung nach schnellen Taktzeiten durch die rasternd ablaufende Prüfung ebenfalls nicht erfüllt.

Die UT ist bereits seit vielen Jahren das Mittel der Wahl in der Automobilindustrie. Die Prüfgeschwindigkeit für typische Anwendungen ist seither ausreichend, um beispielsweise die Intaktheit von Schweißpunkten oder Klebenähten von gefügten Karosserieteilen punktuell oder rasternd zu erfassen. Luftgekoppelte Methoden erlauben dabei erstmals auch eine berührungslose Prüfung, die meist in Transmission erfolgt, wobei abermals eine zweiseitige Zugänglichkeit des Prüfbauteils nötig ist. Die so eingebrachten Energien reichen jedoch nur für die Untersuchung weniger steifer Bauteile wie Platten aus Kunststoff aus. Bezüglich moderner Leichtbaukomponenten, vgl. Abbildung 1.1, sind zum einen dünne Deckplatten problematisch für UT, nicht zuletzt da unmittelbar reflektierte Wellen schwer vom Einkoppelimpuls unterschieden werden können. Zum anderen sind inhomogene Bauteilstrukturen problematisch. Bereits bei einem Faseranteil mit unidirektionaler Orientierung im Werkstoff werden die eingeleiteten Ultraschallwellen stark beeinflusst, was eine komplexe Auswertung notwendig macht und die Prüfqualität herabsetzt. Die Prüfung von Strukturen wie Honigwaben, Schäumen oder generativen 3D-Druck-Bauteilen ist demnach nahezu ausgeschlossen.

Die Thermografie und die Shearografie haben die für die anderen ZfP-Verfahren aufgezeigten Defizite nicht. Beide Messverfahren sind relativ günstig, klein und messen typischerweise in Reflexion, was eine einseitige Bauteiluntersuchung erlaubt. Beide Verfahren messen berührungslos sowie vollflächig und damit schnell, vgl. auch [13]. Sie arbeiten, was die Datenerfassung angeht, werkstoffunabhängig. Werkstoffspezifisch ist lediglich die meist notwendige aktive Bauteilanregung.

Die Thermografie findet seit einigen Jahren durch ihre einfache Handhabung immer stärkeren Einzug in die Industrie, da die speziellen Sensorchips hochauflösender und günstiger werden. Für die ZfP gibt es bereits einige Normen³ zur Qualifikation des Personals sowie zu den Verfahren und Messgeräten. In der Luft- und Raumfahrt wird TT genutzt, um beispielsweise die Außenhaut oder Höhen- und Seitenleitwerke zu prüfen. Die Aussage über mögliche Fehlstellen kann jedoch lediglich über die Wärmestrahlung des Bauteils gewonnen werden, wodurch nur Fehlstellenarten sichtbar werden können, die diese physikalische Eigenschaft beeinflussen. Die Prüfdauer für eine Prüffläche ist teilweise sehr hoch (bis zu 5 Minuten), da die Wärmeleitfähigkeit für Nichtmetalle oftmals sehr gering und somit das bestimmende Maß für die notwendige Prüfdauer ist. Darüber hinaus sind bei der Anregung von Metallen, wenn auch Leichtmetalle, enorme Anregungsenergien notwendig, da das entscheidende Maß hier die hohe Wärmekapazität ist.

Die Mitte der 70er Jahre erstmals vorgestellte Methode der Shearografie ist ein seither fast ausschließlich in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Windkraftanlagentechnik verwendetes Prüfverfahren für spezielle Aufgaben. Die in diesen Industriezweigen produzierten Bauteile sind meist sicherheitsrelevant und extrem teuer, wodurch der Faktor „Zeit“ bei der Prüfung keine Rolle spielt und daher bevorzugt zum Röntgen und Ultraschall gegriffen wird. Dennoch gibt es bereits einige Normungen zur Shearografie und Richtlinien zum speziellen industriellen Einsatz⁴ ([14], [15], [16], [17], [18]). Wie oben aufgezeigt ist die DS der TT auf den ersten Blick äußerst ähnlich. Somit kann gleichfalls eine Wärmeanregung verwendet werden. Dabei misst die DS Verzerrungsanteile der sog. Wärmedehnung des Messobjektes. Hierzu gibt es bereits viele vergleichenden Arbeiten, welche die Vor- und Nachteile beider Methoden für spezielle Anwendungsfälle gegenüberstellen, s. Kapitel 7.1. Der Kernunterschied und gleichzeitig Kernvorteil ist jedoch, dass bei der DS darüber hinaus jegliche Anregungsart eingesetzt und

³ Siehe DIN 54162, DIN 54190, DIN 54192, DIN EN ISO 9712 (nicht weiter referenziert).

⁴ Siehe auch AITM 6-007-11 (Airbus Richtlinie) und GOST R 56795-15 (russische Norm).

1. Einleitung

an die Prüfaufgabe angepasst werden kann. Denn die gesuchte Fehlstellenart im Bauteil muss die entsprechende physikalische Eigenschaft der Anregung beeinflussen (s. Kapitel 6.1). Des Weiteren misst die DS die relative Verzerrung⁵, welche durch den E-Modul direkt an die Steifigkeit des Bauteils gekoppelt ist. Dies ist für kraftleitende Elemente gleichzusetzen mit der Intaktheit des Bauteils. Im Gegensatz zur CT, wo eine Formerfassung des Bauteils erfolgt, ähnelt die DS somit eher der Ultraschallprüfung. Während das Messergebnis der CT nach Materialfehlstellen „abgesucht“ werden muss, zeigt die DS nahezu ausschließlich Fehlstellen in Form von Verzerrungsanomalien an, s. Abbildung 1.4. Die DS liefert somit eine eindeutig zuweisbare Fehlstellenanzeigen, auch wenn die Messergebnisse (die sog. Shearogramme) zunächst kompliziert erscheinen.

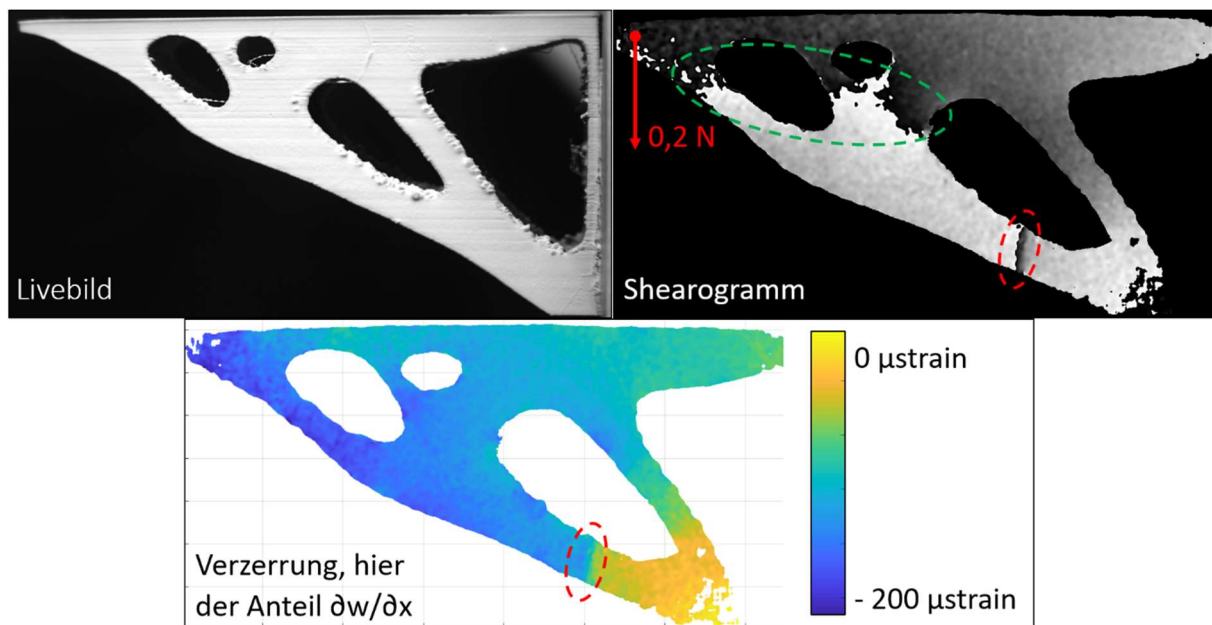


Abbildung 1.4: Bionisch-optimierter Kragbalken mit komplexen geometrischen Aussparungen als 3D Druck-Bauteil (oben links); Shearogramm bei Verformung durch Kraftbeaufschlagung an der Balkenspitze mit einer Masse von 20 Gramm zeigt einen globalen Phasensprung, grün umkreist, und einen lokalen Phasensprung an einer Querstrebe, rot umkreist (oben rechts); Verformungsergebnis zeigt eine Anomalie an, rot umkreist, was ein Indikator für einen Riss oder Bruch ist (unten).

Die Verzerrung, entsprechend des Kraftflusses im Bauteil bei geringfügiger mechanischer Belastung, wird im Shearogramm durch die Graustufen inkl. dem großflächigen Phasensprung knapp unter der Oberkante, von schwarz nach weiß (grün umkreist), angezeigt. Das Demodulationsergebnis zeigt in dem Bereich einen regelmäßigen Verzerrungsverlauf an. Die unterste Querstrebe der Struktur hingegen zeigt einen lokalen Phasensprung (rot umkreist), das Demodulationsergebnis entsprechend einen starken Verformungssprung. Dieser resultiert aus einer nicht vorhandenen Filamentlagen-Haftung bei dem hier angewendeten Schmelzschtichtungsverfahren des PLA-Kunststoffbauteils. Das Haftungsproblem ist rein visuell nicht detektierbar. Die Kraftleitung ist an dieser Stelle des Bauteils unterbrochen, was zur Überbelastung der übrigen Struktur führt. Dies ist gerade bei solchen Gewicht-zu-Steifigkeit optimierten generativen 3D-Druck Bauteilen äußerst problematisch und kann zu Bauteil- und auch Systemversagen führen (s. auch [19]). Entscheidend ist, dass diese Fehlstelle durch kein anderes ZfP-Verfahren so eindeutig und schnell gefunden werden kann. Sofern kein Luftspalt zwischen den beiden Filamentlagen vorhanden ist, wird weder Röntgen-, noch Terahertzstrahlung, noch die Wärmeleitung

⁵ Genauere Zuweisung s. Kapitel 2.4.b.

1. Einleitung

durch die Fehlstelle beeinflusst. Einzig Ultraschall könnte eine unnormale Reflexion zeigen, was bezüglich der komplexen Bauteilgeometrie jedoch extrem schwer zu deuten wäre.

Zu beachten ist, dass die DS sowie auch die TT, im Gegensatz zu den anderen ZfP-Verfahren, auf eine Prüftiefe von ca. 20 mm bis max. 30 mm begrenzt ist, s. auch Kapitel 6.1.c. Bezogen auf die zukünftigen Leichtbaukomponenten im Automobil ist dies in den meisten Fällen jedoch unproblematisch. Es handelt sich hauptsächlich um Bauteile mit geringen Dicken oder Komposite mit dünnen Deckplatten (vgl. Abbildung 1.1). Bei Letzteren treten Fehlstellen typischerweise an der Oberfläche oder an der Grenzschicht zwischen Deckplatte und Kern auf, wodurch die Dicke des Kerns keine Rolle spielt.

Bezüglich näherer Infos zu modernen ZfP-Verfahren sei auf die umfangreiche Quelle [27] verwiesen.

1.5. Grenzen der Shearografie und Ziel dieser Arbeit

Die aktuell am Markt verfügbaren DS Messsysteme sind vor allem für den Einsatz in der Luftfahrt-, Raumfahrt- und Windkraftanlagen-Industrie spezialisiert. Neben den Kosten der Systeme und den zu beachtenden Lasersicherheitsaspekten (s. auch Kapitel 2.2.e) sind für den Einsatz in der Automobilindustrie vor allem die Störempfindlichkeit und der damit verbundene Peripherieaufwand sowie die verfahrensbedingte Ergebniskomplexität besonders nachteilig. Letzteres erfordert speziell qualifiziertes Personal bei der Datenerfassung, der typischerweise nicht-automatischen Ergebnisauswertung und der Auslegung der Messprozedur (näheres s. Kapitel 8). Die Störempfindlichkeit ist vor allem auf den Zeitaufwand bei der Messung zurückzuführen, der durch die verwendete Methode des sog. *zeitlichen Phasenschiebens* vorgegeben ist.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 1.1 eine vom Autor erstellte qualitative Bewertung der modernen ZfP-Verfahren, nach dem aktuellen Stand, bezogen auf die relevanten Kriterien beim Einsatz in der Automobilindustrie für zukünftige Leichtbaukomponenten, vgl. auch ([20], [21], [22]).

Tabelle 1.1: Qualitative Bewertung der modernen ZfP-Verfahren nach dem aktuellen Stand für die zukünftigen Anforderungen der Automobilindustrie im Bereich des Leichtbaus.

	Prüfzeit	Automationsaufwand Datenerfassung*	Automations-sicherheit Datenevaluation	Fehlstellen-anzeige**	Handhabung***	Energieaufwand	Kosten
DS	+	0	-	+	-	+	0
TT	+	+	0	0	+	+	0
TM	-	0	0	0	-	+	-
UT	0	-	0	0	0	+	0
RT	-	-	+	0	-	-	-

DS = Digitale Shearografie, TT = Thermografie, TM = Terahertz-Prüfung, UT = Ultraschall, RT = Durchstrahlungsprüfung

+ gut, 0 neutral, - schlecht

* exkl. Handhabung

** für die aufgezeigten Werkstoffe bzw. Bauteilstrukturen nach Abbildung 1.1 oben

*** ein- oder zweiseitiger Messobjektzugang, Umweltbedingungen, Systembaugröße, Arbeitsschutz

Aus der Tabelle kann geschlossen werden, dass die DS ein hohes Potential besitzt, ein durchaus geeignetes ZfP-Verfahren für die Automobilindustrie zu sein. Im Rahmen dieser Arbeit werden nun Schritte vorgestellt, um die Leistungsfähigkeit der DS in den Bereichen Automation und Handhabung zu steigern. Hauptkriterium hierbei ist die Weiterentwicklung und Anwendungsoptimierung der Methode

1. Einleitung

des sog. *räumlichen Phasenschiebens*. Die seither nur vereinzelt in der Forschung verwendete Methode, mit der die Messzeit auf ein notwendiges Minimum reduziert werden kann, wird durch moderne Kamera- und Lasertechnologie erstmals gewinnbringend einsetzbar. Neben einem einfacheren und günstigeren Geräteaufbau sowie einer stark reduzierten Störempfindlichkeit können mit ihr neue shearografische Auswerteverfahren umgesetzt werden, was die Fehlstellen-Auffindwahrscheinlichkeit (POD⁶) grundsätzlich erhöht. Darüber hinaus werden Ansätze der erstmals in den Fokus rückenden, vollautomatisierten DS-Prüfung vorgestellt.

Abschließend zu diesem Kapitel muss angemerkt werden, dass die DS in dieser Arbeit nahezu ausschließlich als Prüfverfahren⁷ und nicht als Messverfahren⁸ betrachtet wird. Das heißt die Fähigkeit der DS hochgenaue Ergebnisse zu liefern wird zwar ausgenutzt, jedoch lediglich zur Entscheidung mit Vergleichsforderungen herangezogen (z. B. „Ein Wert ist höher als x“). Denn in der Massenproduktion, wo Bauteile mit einem Wert von nur wenigen Cent im Sekundentakt bewertet werden müssen, ist es nicht wirtschaftlich, eine Analyse bzgl. der Art, Anzahl, Größe, Tiefe und Position der Fehlstelle zu betreiben, da eine Reparatur der Bauteile sowieso außer Frage steht. Stattdessen erfolgt die Defektoskopie fast ausschließlich nach „in Ordnung“ (IO) und „nicht in Ordnung“ (NIO). Dennoch ist es natürlich selbstverständlich, dass die vorgestellten Entwicklungen an den notwendigen Stellen mit geeigneten Mitteln und Vergleichen bzgl. ihrer Einsatztauglichkeit hin validiert werden und die Ergebnisse mit den Erwartungen korrelieren.

Dies ist eine notwendige Vorgehensweise zur Erreichung des oben vorgestellten Ziels dieser Arbeit. Denn ebenso wie das sog. *Magische Dreieck* in der Produktion (Kosten – Zeit – Qualität), existieren gleichfalls in der Messtechnik drei stark voneinander abhängige Parameter: Volumen – Zeit – Genauigkeit, vgl. Abbildung 1.5.

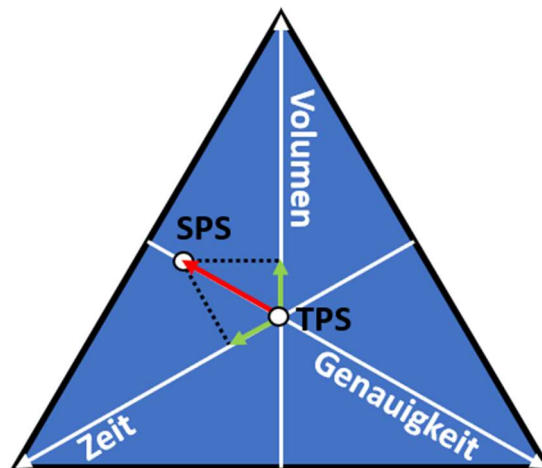


Abbildung 1.5: Das magische Dreieck der optischen Messtechnik, schematisch, mit den drei stark voneinander abhängigen Parametern Volumen, Genauigkeit und Zeit; hier eingetragen die Parameterbeeinflussung, qualitativ, durch räumliches Phasenschieben (SPS) verglichen zum zeitlichen Phasenschieben (TPS) als Ausgangspunkt; die Genauigkeit ist reduziert, das Messvolumen und die Messzeit hingegen werden durch SPS verbessert. Durch letzteres ist die vor allem erforderliche Erhöhung der Messstabilität erreichbar.

⁶ Probability Of Detection.

⁷ ([66] S. 6): „Prüfung – Feststellen, inwieweit ein Prüfobjekt eine Forderung erfüllt.“

⁸ ([66] S. 4): „Messung – Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße [...] mit einer Einheit.“

1. Einleitung

Zur Erfassung eines größeren Messvolumens ist, bei gleichbleibender Messgenauigkeit, eine höhere und damit verschlechterte Messzeit erforderlich. Stattdessen sinkt die Messgenauigkeit, wenn ein größeres Messvolumen bei gleicher Messzeit erfasst wird. Daraus resultiert, dass bei längerer Messzeit eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden kann. Dieses Gleichgewicht wird auf Kosten der Genauigkeit vor allem zugunsten der Messzeit hin verschoben, welche ein Hauptkriterium für die geforderte Messstabilität ist. Zudem wird die Genauigkeit auch zugunsten des Messvolumens hin reduziert. Dabei ist mit „Volumen“ zum einen die Größe der Prüfoberfläche je Messvorgang gemeint, zum anderen aber auch die Fülle an abgefragten Messwerten je Messvorgang zur Erhöhung der POD. Die Effizienz dieser Vorgehensweise wird durch die Messversuche am Ende der Arbeit bestätigt.

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

Abbildung 2.1 zeigt schematisch den allgemeinen Aufbau einer optisch-interferometrischen Messeinrichtung.

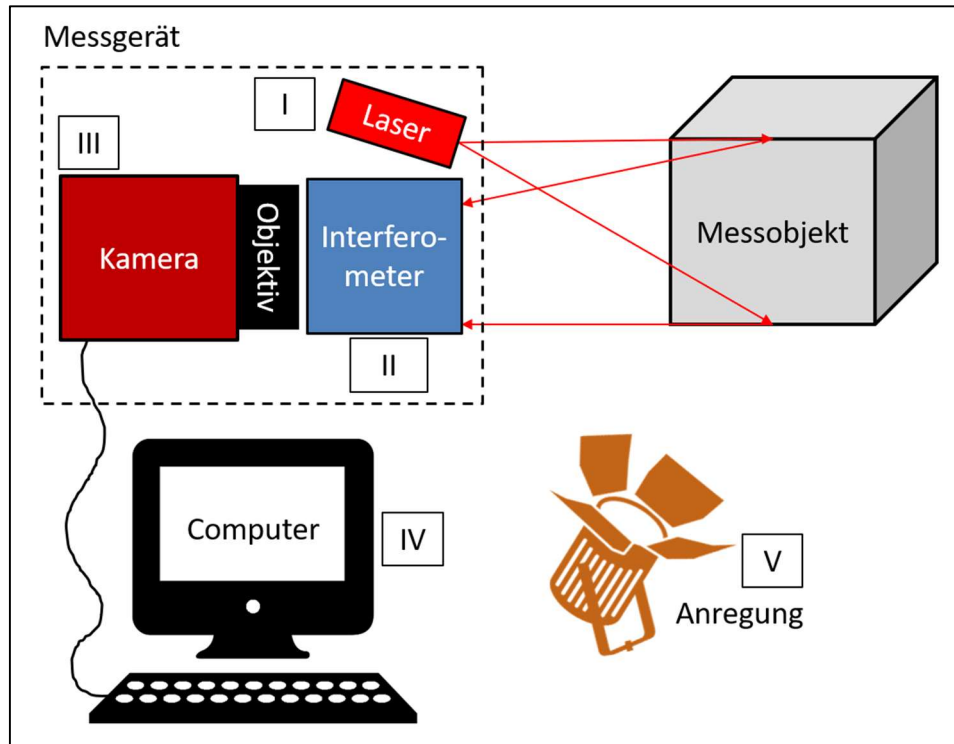


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer optisch-interferometrischen Messeinrichtung mit aktiver Messobjektanregung für die ZfP; die Kombination aus Laser (I), Interferometer (II) und Kamera mit Objektiv (III) ergibt das Messgerät, welches mittels Computer (IV) zum Messsystem wird. Zur Prüfung wird oftmals noch eine aktive Anregung (V) benötigt.

Zur Messobjektbeleuchtung wird eine aufgeweitete, kohärente Lichtquelle (I) verwendet. Der Laser erfüllt die notwendigen, teils speziellen Anforderungen, s. dazu Kapitel 2.2. Nach der Reflexion (oder auch der Transmission) des Lichts am Messobjekt ist die so entstandene Lichtwellenfront Träger der Information über die Messobjektoberfläche. Sie trägt sozusagen den „Fingerabdruck“ der Oberfläche als verschlüsselten Code mit sich. Die Wellenfront wird vom Interferometer (II) erfasst und die Information physikalisch umgewandelt und aufbereitet. Je nachdem, welche Information über die Oberfläche von Interesse ist, kommen verschiedene Interferometer zum Einsatz, s. dazu Kapitel 2.4. Die aufbereitete Information wird durch ein Objektiv flächig auf einem Kamerachip (III) abgebildet und steht folglich digital zur Verfügung, s. dazu Kapitel 2.3. (In einigen Fällen kann das Objektiv auch vor dem Interferometer angeordnet sein.) Die Kombination von Interferometer (II), Kamera und Objektiv (III) wird oftmals auch als (Interferometrie-) Sensor bezeichnet. Die Kombination von Laser (I) und Sensor (II+III) bildet nach DIN 1319-1 das *Messgerät*⁹. Die äußere Erscheinung des Messgerätes ist in der Abbildung oben angedeutet. Das Digitalbild der Kamera wird mittels Computer (IV) abgerufen und die darin enthaltene codierte Information über die Messobjektoberfläche durch ein Programm entschlüsselt. Hier kommt die Mathematik zum Einsatz, die vor allem vom physikalischen Interferometer-Aufbau abhängt. Das so entstehende Messergebnis wird typischerweise weiterverarbeitet, wodurch seine

⁹ ([66] S. 18): „Messgerät: Gerät, das allein oder in Verbindung mit anderen Einrichtungen für die Messung [...] einer Messgröße [...] vorgesehen ist.“

Aussagekraft für die Zielanwendung gesteigert werden kann, s. dazu Kapitel 2.5. Die Kombination von Messgerät (I+II+III) und Computer (IV) kann bereits als (passive) optisch-interferometrische *Messeinrichtung*¹⁰ oder als Messsystem bezeichnet werden. Im Falle der shearografischen Prüfung wird üblicherweise eine Anregungseinheit zur aktiven Messobjektanregung (V) hinzugezählt, s. dazu Kapitel 6. Im einfachsten Falle existiert eine Datenverbindung lediglich zwischen Kamera (III) und Computer (IV). Darüber hinaus sind viele weitere elektronische und optische Verbindungen in der Messeinrichtung denkbar, hier übersichtshalber jedoch nicht dargestellt. Abschließend zu diesem Kapitel werden erreichbare Spezifikationen sowie Störeinflüsse für diese Art der Messeinrichtung diskutiert, s. dazu Kapitel 2.6.

2.1. Begriffsklärung zur Speckle-Interferometrie

Das Messobjekt ist ausschlaggebend dafür, ob die interferometrische Messung mit oder ohne Speckles abläuft, s. dazu Kapitel 2.2.c. Kern dieser Arbeit sind Messungen **mit** Speckles. Je nachdem kommen spezielle Messaufbauten und spezielle Methoden zum Einsatz. Kapitel 2.4 ist diesbezüglich allgemeingültig geschrieben, denn die dargestellten Aufbauten können grundsätzlich für Messungen mit und für Messungen ohne Speckles eingesetzt werden. Zusammengefasst ist bei Messungen ohne Speckles die sog. *Interferenzphase* Φ von Interesse (s. Kapitel 2.5.a), während bei Messungen mit Speckles zwei Interferenzphasen miteinander verglichen werden müssen (Bildung der sog. *Differenzphase* Δ , s. Kapitel 2.5.b). Nach der folgenden kurzen Literaturrecherche wird eine Begriffsfestlegung empfohlen, die in dieser Arbeit beibehalten wird.

Seit den ersten Veröffentlichungen zur Speckle-Interferometrie im Jahre 1969 gab es entsprechend der eingesetzten, weiterentwickelten Kamera- und Computertechnik diverse, teils nicht konsistente Bezeichnungen für diese Messtechnik ([23] Teil 1 Kapitel 1). Im allgemeinen Sprachgebrauch ist der ältere Begriff *ESPI*¹¹ geläufig für die moderne Speckle-Holografie bzw. *ESPSI*¹² für die moderne Speckle-Shearografie ([24], [10], [25], [26], [27], [28]). Im Englischsprachigen wird zudem noch von der *DESPI*¹³ oder *DSI*¹⁴ gesprochen ([23] Teil 1 Kapitel 1). Darüber hinaus gibt es z. T. weitere Bezeichnungen für Speckle-Holografie, Speckle-Shearografie, Nicht-Speckle-Holografie und Nicht-Speckle-Shearografie, sowie holografische Verfahren ohne Interferometrie.

Im Rahmen dieser Arbeit wird, wie von Yang et al. 2016 eingeführt [79], der übergreifende Begriff der *digitalen Shearografie* (DS) als allgemeingültig für die moderne Shearografie verwendet. Analog wird der Begriff *digitale Holografie* (DH) als allgemeingültig für die moderne Holografie¹⁵ verwendet (s. auch [26]). Für die Speckle-Shearografie bzw. Speckle-Holografie wird an den Begriffen *ESPI* bzw. *ESPSI* festgehalten, da sie klar differenzieren und weltweit anerkannt sind. Obwohl die Speckle-Interferometrie der Kern dieser Arbeit ist, können einige der vorgestellten Aufbauten und Methoden auch für Nicht-Speckle Anwendungen eingesetzt werden. Dies soll durch Verwendung der Begriffe DS oder *ESPSI* bzw. DH oder *ESPI* gezielt zum Ausdruck gebracht werden.

¹⁰ ([66] S. 18): „Messeinrichtung: Gesamtheit aller Messgeräte [...] und zusätzlicher Einrichtungen zur Erzielung eines Messergebnisses [...].“

¹¹ Electronic Speckle Pattern Interferometry, dt.: elektronische Speckle-Muster Interferometrie.

¹² Electronic Speckle Pattern Shearing Interferometry, dt.: elektronische Speckle-Muster Shear-Interferometrie.

¹³ Digital Electronic Speckle Pattern Interferometry, dt.: digital-elektronische Speckle-Muster Interferometrie.

¹⁴ Digital Speckle Interferometry, dt.: digitale Speckle Interferometrie.

¹⁵ Das Wort „Interferometrie“ wird hier ausgelassen, da es im Rahmen dieser Arbeit als selbstverständlich angesehen wird.

2.2. Beleuchtung

Dieses Unterkapitel beschreibt die Besonderheiten der Beleuchtung für die optische Interferometrie. Hierbei wird der Laser mit seinen Kohärenz- und damit Interferenzeigenschaften sowie die dadurch entstehende Speckleerscheinung an rauen Oberflächen erläutert. Abschließend gilt ein besonderes Augenmerk der Nutzung von Laserdioden bei der optisch-interferometrischen Messtechnik sowie dem Laserschutz bei der Anwendung.

2.2.a. Laser

Vorangetrieben durch die hohen Erwartungen des Militärs im Zeitalter des kalten Krieges hat sich der Laser heutzutage zum weit verbreiteten Werkzeug in der Medizin-, Informations-, Mess-, Unterhaltungs- und Fertigungstechnik entwickelt ([30], [31], [32], [33] S. 15). Beim Laser handelt es sich um ein Gerät bzw. Verfahren zur Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung (engl.: light amplification by stimulated emission of radiation). Die Vorteile hierbei sind die hohe optische Leistung (bis zu 80 kW), die hochgenaue Impulstaktung (bis zur Femtosekunde) sowie die präzise Strahlbündelung (bis auf wenige Quadratmikrometer). Letzteres wird erreichbar durch die nahezu monochromatische Strahlungsemission des Lasers. Es gibt eine Fülle von Lasertypen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Für die optische Messtechnik sind vor allem die Laser im erweiterten Bereich des sichtbaren Spektrums mit einer Wellenlänge vom nahen Ultraviolett (UV) bei ca. 380 nm bis zum nahen Infrarot (IR) bis ca. 1 μm von Bedeutung (s. auch Kapitel 2.2.e und Kapitel 2.3). Die besondere Eigenschaft, die für die optische Interferometrie grundlegend ist, ist die hohe Kohärenz des Lasers, s. dazu Kapitel 2.2.b. Der Laser emittiert aufbaubedingt oftmals linear polarisiertes Licht, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch nahezu irrelevant ist, da es bei den Specklemesstechniken (s. Kapitel 2.2.c unten) nach der Reflexion an rauen Oberflächen nahezu unpolarisiert vorliegt. Bezüglich weiterer Eigenschaften und Funktionsweisen von Lasern wird auf die einschlägige Literatur verwiesen ([34], [30], [31], [32]). Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3 zeigen zwei Lasersysteme, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden.

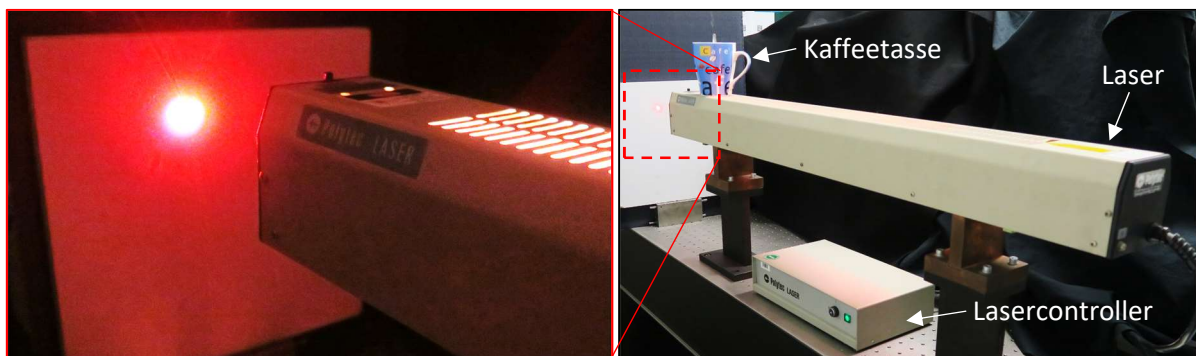


Abbildung 2.2: Helium-Neon Gaslaser (HeNe), 50 mW optische Leistung, ca. 632,8 nm Wellenlänge, Länge ca. 1 Meter, Laser und Controller im Größenvergleich zu einer Kaffeetasse.

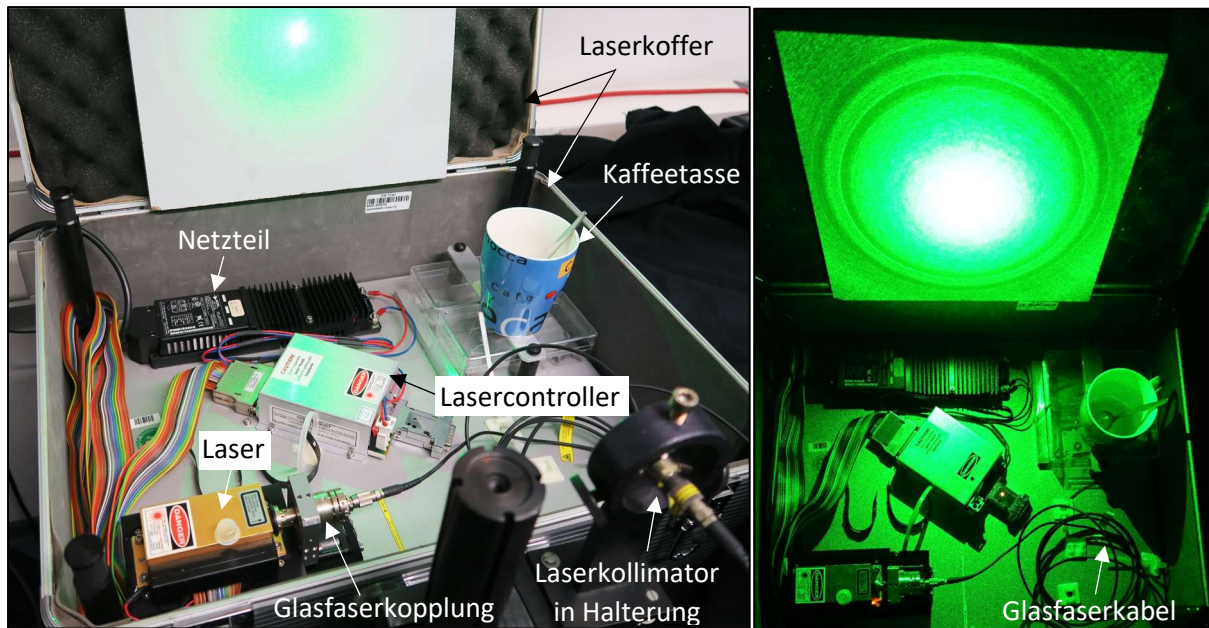


Abbildung 2.3: Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat (Nd:YAG) Festkörperlaser, 300 mW optische Leistung, Glasfaserkopplung für den flexiblen Einsatz, dadurch optische Austrittsleistung nur noch 23 mW, Wellenlänge 532 nm, Volumen des Laserkoffers ca. $0,5 \times 0,4 \times 0,2 \text{ m}^3$.

2.2.b. Kohärenz und Interferenz

Kohärenz bezeichnet die Eigenschaft eines Wellenfeldes, welche vorliegt, wenn für zwei beliebige Wellenzüge a_{We1} und a_{We2} eine feste Phasenbeziehung besteht. Damit ist die Phasenverschiebung $\Phi = \varphi_2 - \varphi_1$ der beiden Wellenzüge an zwei verschiedenen Orten P_1 und P_2 für alle Zeit konstant. Die Wegdifferenz in Ausbreitungsrichtung $r_2 - r_1$, welche die beiden Züge zueinander haben dürfen, um noch kohärent zueinander zu sein, ist jedoch begrenzt. Dies ist bedingt durch die Güte der Emissionsquelle, welche beispielsweise ein endliches, quasi-monofrequentes Wellenpaket für $1 \mu\text{s}$ aussendet¹⁶ und anschließend ein zweites Paket mit veränderter Phasenlage, vgl. Abbildung 2.4. Das heißt die Phasenbeziehung an einem Ort ist fest verglichen zu einem zweiten Ort, den die Welle in Ausbreitungsrichtung innerhalb dieser Mikrosekunde erreichen kann. Das Maß dieser Güte wird als Kohärenzzeit t_k beschrieben, hier also in etwa¹⁷ $1 \mu\text{s}$. Für Licht ist dies über die Lichtgeschwindigkeit c mit ca. $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ geknüpft an den praktischeren Wert der Kohärenzlänge l_k , hier somit 300 m, was knapp dem Wert für einen gängigen Helium-Neon Gaslaser entspricht ([33] S. 512). Dies ist eine sehr einfache Betrachtung, in der Realität ist von einer höheren Komplexität auszugehen. Denn eigentlich addieren sich für annähernd gleiche Orte eine Fülle sich ähnlicher Wellenpakete zu einer kontinuierlich veränderlichen Schwingungsfunktion, die dann von einer zweiten überlagert wird. Hierzu sei auf ([33] S. 902 f.) verwiesen.

¹⁶ 400-mal kürzer als die Hauptentladung eines Blitzes bei Gewitter.

¹⁷ Siehe weitere Betrachtung unten.

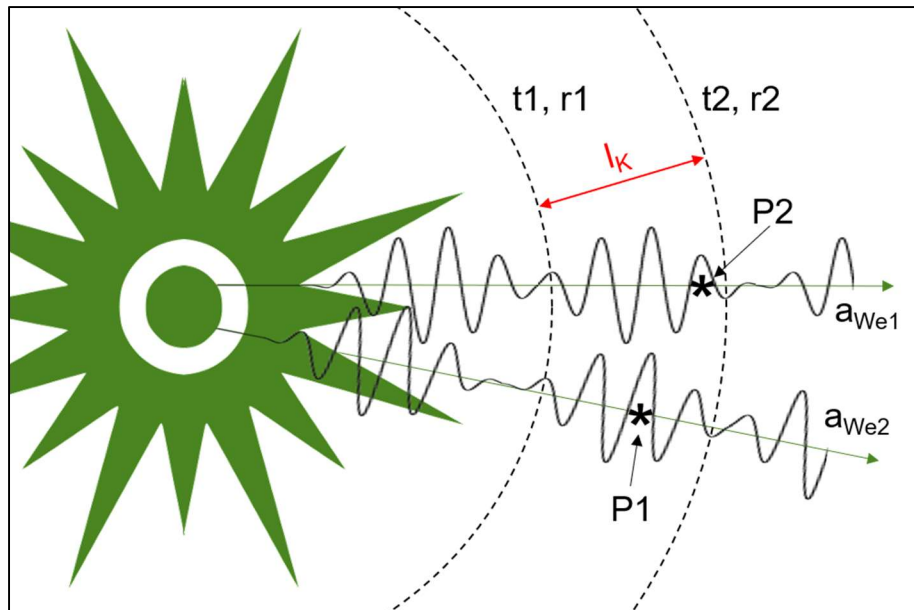


Abbildung 2.4: Kohärenz schematisch für zwei Wellenzüge a_{We1} und a_{We2} ; über die Kohärenzzeit von $t_k \approx t_2 - t_1$, bzw. die Länge des quasi-monochromatischen Wellenpakets $l_k \approx r_2 - r_1$, ist die Phasenlage am Ort P2 gleich der am Ort P1. Die Phasenverschiebung $\Phi = \varphi_2 - \varphi_1$ ist also konstant, hier gleich 0° , da $\varphi_2 = \varphi_1$ ist.

Neben der zeitlichen Kohärenz gibt es ein weiteres Gütekriterium für ausgedehnte Lichtquellen, die sog. räumliche Kohärenz ([32] S. 19). Sie spielt in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle, da die verwendeten Lichtquellen in den vorliegenden Fernfeldbetrachtungen als punktförmig angenommen werden können (s. Kapitel 2.2.c).

Durch Überlagerung zweier kohärenter Wellenzüge ist Interferenz möglich. Je nach Phasenverschiebung kommt es dabei u. a. zur konstruktiven (verstärkenden) oder destruktiven (auslöschenden) Interferenz, s. Abbildung 2.5.

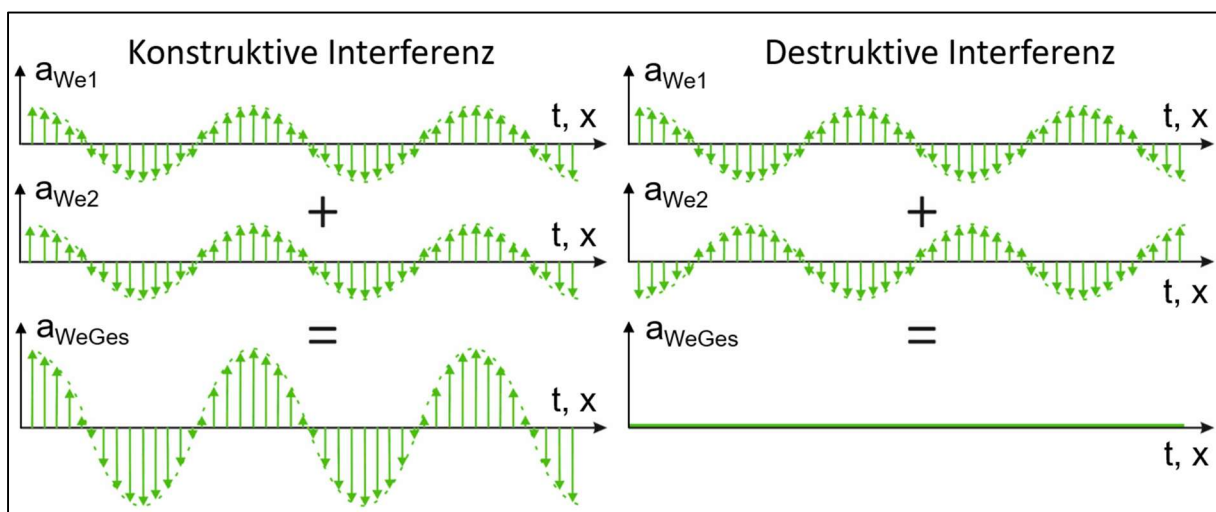


Abbildung 2.5: Konstruktive (links) und destruktive (rechts) Interferenz schematisch, abgeleitet aus ([35] S. 31).

Gleichung 2.1 beschreibt die Verhältnisse für zwei kohärente Teilwellen gleicher Amplitude ([36] S. 5).

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

$$a_{We1(t,x)} = A_{We} e^{i(\omega t + \varphi_1)} \quad \text{und} \quad a_{We2(t,x)} = A_{We} e^{i(\omega t + \varphi_2)} \quad (2.1.)$$

mit $\varphi = kx + \varphi_0$

Mit

a_{We} = Auslenkung der Welle

t = Zeitvariable

x = Ortsvariable

A_{We} = Amplitude der Welle

ω = Kreisfrequenz

φ = Phasenwinkel

k = Wellenzahl

φ_0 = Nullphasenwinkel

Die Superposition der beiden Wellen und die Betragsbildung ergeben sich nach Gleichung 2.2 ([36] S. 6).

$$a_{WeGes(x)}^2 = 2A_{We}^2 + 2A_{We}^2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 2A_{We}^2 + 2A_{We}^2 \cos(\Phi) \quad (2.2.)$$

Mit

a_{WeGes} = Gesamtauslenkung der superpositionierten Wellen

Φ = Interferenzphase

Auffallend ist, dass hierbei die Zeitvariable eliminiert wird, was ausschlaggebend für die optische Interferometrie ist. Die Auslenkung der Wellen ändert sich mit Lichtgeschwindigkeit, was selbst nicht messbar ist. Stattdessen ist die Intensität der Interferenz messbar. Sie repräsentiert das zeitliche Mittel einer großen Anzahl an Schwingungen an einem Ort. Die Intensität ergibt sich nach Gleichung 2.3 aus dem Quadrat der Gesamtauslenkung mit ihrer komplex Konjugierten.

$$I = a_{WeGes} a_{WeGes}^* \quad (2.3.)$$

Mit

I = Intensität

a_{WeGes}^* = Komplex konjugierte der Gesamtauslenkung

Durch Umstellung und gegenüber ([35] S. 33 Gleichung 3.5) leicht angepasster Substitution¹⁸ ergibt sich Gleichung 2.4, die allgemeine Interferometrie-Gleichung.

$$I = I_0 (1 + \gamma \cos \Phi) \quad (2.4.)$$

Mit

I_0 = Hintergrundintensität

γ = Interferenzkontrast, auch Lasermodulation genannt

Die Gleichung sagt aus, dass die Intensität an einem Überlagerungspunkt zweier kohärenter Teilwellen gleich der entsprechenden Hintergrundintensität ist, plus einem zusätzlichen Anteil der Hintergrundintensität. Dieser Anteil ist linear abhängig vom Interferenzkontrast und nochmals cosinusförmig abhängig von der Interferenzphase. Der Interferenzkontrast nimmt Werte von 0 (Inkohärenz) und 1 (Kohärenz) an. Der Cosinus-Term nimmt Werte zwischen -1 und 1 an. Sind die Teilwellen inkohärent, ist die Intensität am Superpositionspunkt gleich ihrer Hintergrundintensität. Sind die Wellen kohärent, dann oszilliert die Intensität um die Hintergrundintensität, während sie Werte von 0 bis zu 2-mal der Hintergrundintensität annehmen kann. Diese Betrachtung gilt der Zwei-Strahlen Interferometrie, während in der Anwendung der Holografie und Shearografie immer eine analog beschreibbare Mehr-Strahlen Überlagerung stattfindet.

Gleichung 2.4 ist der Schlüssel zu Wegmessungen auf der Skala der Lichtwellenlänge, also im Bereich von 500 nm und weit darunter (s. Kapitel 2.6.a). Das Schlüsselement darin ist die Interferenzphase, wie es in Kapitel 2.5.a gezeigt wird.

Der Übergang von kohärent zu inkohärent ist fließend und wird durch die Kohärenzlänge l_k begrenzt, wobei sich auf den Interferenzkontrast bezogen wird (vgl. Gleichung 2.4 oben). Sichtbar gemacht und gemessen werden kann dieses Phänomen beispielsweise am Michelson-Interferometer ([37] S. 409 f.), wie Abbildung 2.6 zeigt. Mit fortlaufender Phasenverschiebung durch die Spiegelverschiebung Δs sinkt die Interferenzmodulation und damit der Interferenzkontrast nach Gleichung 2.5 ([33] S. 905). Dies wird in Abbildung 2.6 am Ordinaten-Abstand der Maxima- und Minima-Hüllkurven sichtbar (in lila), s. auch ([33] S. 903).

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.5.)$$

Mit

$I_{\max}$ = Intensität an einem Maximum im Streifenmuster

$I_{\min}$ = Intensität an einem benachbarten Minimum im Streifenmuster

Diejenige Spiegelverschiebung, an welcher der Interferenzkontrast auf $1/e = \text{ca. } 37\%$ ¹⁹ seines Ursprungswerts von 100 % gesunken ist, wird als Grenze zwischen kohärent und inkohärent bezeichnet.

¹⁸ Hier $I_0 = A_{We1}^2 + A_{We2}^2$.

¹⁹ Es werden unterschiedliche Grenzwerte in der Literatur zugrunde gelegt ([30] S. 17).

Die Spiegelverschiebung von der negativen zur positiven Grenze entspricht dabei der Kohärenzlänge l_k , wie in der Abbildung schematisch angedeutet.

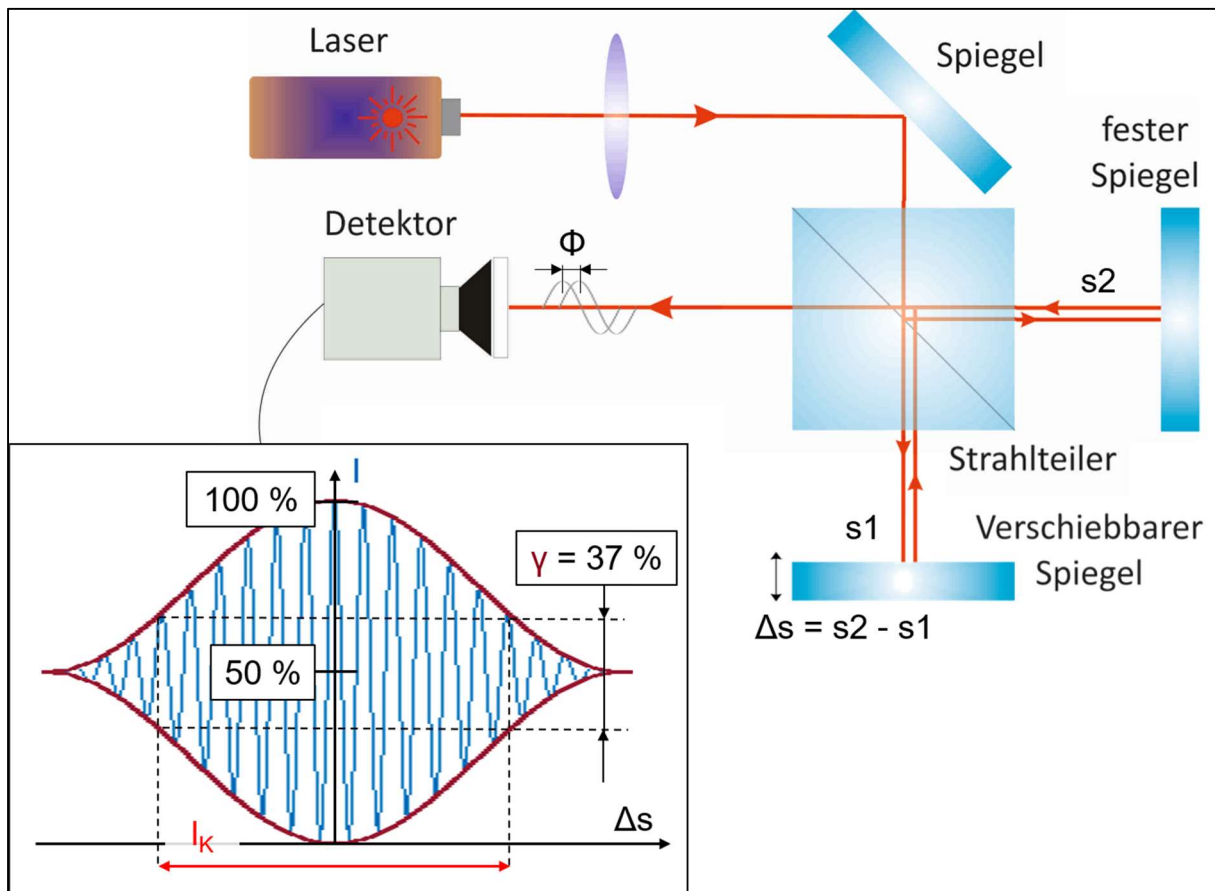


Abbildung 2.6: Ermittlung der Kohärenzlänge l_k eines Lasers durch Spiegelverschiebung Δs am Michelson-Interferometer bei Messung der Interferenzmodulation γ als Hüllkurvenabstand (lila Kurven) der Intensitätsextrema I (blaue Kurve); Grafik abgeleitet aus ([35] S. 35).

Hierbei ist anzumerken, dass ein maximaler Interferenzkontrast nur bei gleichhoher Amplitude (s. auch Gleichung 2.1) der beiden Wellenzüge und gleicher Polarisation erreicht werden kann ([37] S. 408 f.). Somit weisen zwei in die gleiche Richtung linear polarisierte und zwei gleichförmig unpolarisierte Wellenzüge einen hohen Kontrast auf, zwei orthogonal zueinander linear polarisierte Wellenzüge sind jedoch nicht interferenzfähig. Diese Effekte werden in der Arbeit zielführend ausgenutzt (s. Kapitel 4.1.a).

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Kohärenzlänge ist die spektrale Vermessung der Lichtquelle. Aufgrund der Endlichkeit der emittierten Wellenpakete muss jedes Paket aus mehr als nur einer einzigen Wellenlänge bestehen²⁰, was auch mit den mathematischen Betrachtungen zur Fourier-Analyse in Kapitel 3.2 korreliert. Demnach weist das Spektrum eines Lasers eine sehr schmale Linienbreite auf ([30] S. 18), wie in Abbildung 2.7 angedeutet. Je breiter das emittierte Spektrum ist, desto kürzer sind die Wellenpakete bzw. desto kürzer ist die Kohärenzzeit und -länge. Zur Vermessung ist ein Gerät mit hoher spektraler Auflösung notwendig, s. Beispielrechnung unten. Die Kohärenzlänge lässt sich über Gleichung 2.6 ([32] S. 18) ermitteln.

²⁰ Siehe Schwebungsphänomen ([33] S. 475 ff.).

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

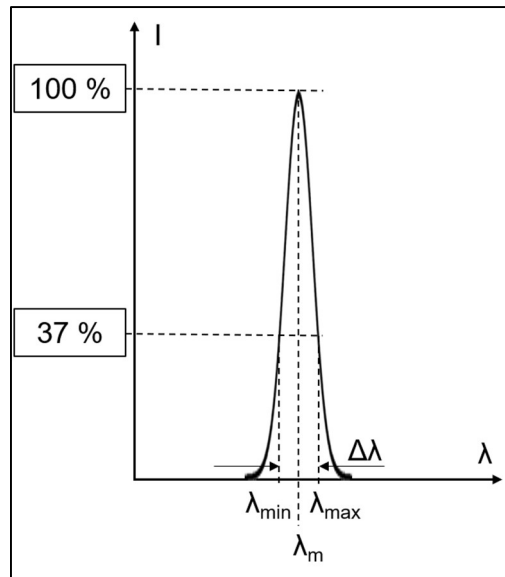


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung des vom Laser emittierten, schmalbandigen Spektrums mit einer Breite von $\Delta\lambda$ und einer maximalen Intensität bei der mittleren Wellenlänge λ_m ; eine entsprechende spektrale Vermessung der Quelle kann zur Berechnung der Kohärenzlänge l_K dienen.

$$l_K = \frac{c}{2\pi\Delta\nu} \quad (2.6.)$$

$$\text{mit } \Delta\nu = |\nu_{\min} - \nu_{\max}| \text{ und } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

Mit

l_K = Kohärenzlänge

c = Lichtgeschwindigkeit

$\Delta\nu$ = Frequenzbandbreite

$\nu_{\min}$ = Minimale spektrale Frequenz

$\nu_{\max}$ = Maximale spektrale Frequenz

λ = Laserwellenlänge

Das Umformulieren von Gleichung 2.6 liefert Gleichung 2.7.

$$l_K = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_{\max}\lambda_{\min}}{\Delta\lambda} \approx \frac{\lambda_m^2}{2\pi\Delta\lambda} \quad (2.7.)$$

$$\text{mit } \lambda_{\max}\lambda_{\min} \approx \lambda_m^2 \text{ und } \Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$$

Mit

$\Delta\lambda$ = Wellenlängenbandbreite

$\lambda_{\min}$ = Minimale spektrale Wellenlänge

$\lambda_{\max}$ = Maximale spektrale Wellenlänge

λ_m = Mittlere spektrale Wellenlänge

Eine einfache, niederkohärente Laserdiode mit einer Kohärenzlänge von nur 10 μm bei einer Wellenlänge von 685 nm weist demnach eine Linienbreite von gerade einmal ca. 7,5 nm auf. Somit weist ein ausgesendetes Wellenpaket nach der Betrachtung in Abbildung 2.4 ca. $10 / 0,685 \approx 15$ Schwingungsperioden auf.

Kohärenz kann auch als Maß für die spektrale Reinheit einer Lichtquelle angesehen werden.

2.2.c. Speckleerscheinung

Mittels flächenhafter, optischer Interferometrie wurden zunächst nur kleine und glatte Oberflächen wie z. B. Spiegel- und Linsenformen bei der Fertigung im Schliff vermessen ([37] Kapitel 14.2, [10] S. 165 ff.). Für größere, optisch raue Oberflächen (Rauheit größer als die Lichtwellenlänge), wie sie im technischen Bereich meist vorliegen, wird jedoch das sog. „körnige“ Speckle-Muster sichtbar. Dieses wurde zunächst als störend empfunden, später entwickelten sich daraus verschiedenste Speckle-Messtechniken ([23] Teil 4) (s. auch Kapitel 2.5.b).

Zum intuitiven Verständnis wird zunächst ein ähnliches Phänomen für inkohärentes Licht nach Abbildung 2.8 betrachtet.



Abbildung 2.8: Lichtreflexion an einer ruhigen Seeoberfläche mit homogener Intensitätsverteilung (links) und an der unruhigen Meeresoberfläche mit stochastischer Verteilung von lokalen Intensitätsmaxima durch gerichtete Reflexion der Sonne (rechts).

Hier gibt die Lichtreflexion an einer glatten Seeoberfläche eine homogene Intensitätsverteilung wieder, die der ursprünglichen Lichtquelle, also dem beleuchteten Wolkenhimmel, gleicht. Stattdessen ergibt die Lichtreflexion der Sonne an der unruhigen Meeresoberfläche ein stochastisch verteiltes Intensitätsprofil mit lokalen Maxima. Diese entstehen durch zufällig vorhandene Bereiche gerichteter Reflexion.

Bei der Speckleerscheinung ist es nicht die gerichtete Reflexion, sondern die sich zufällig ergebende Amplituden- und Phasenbeziehung von sich überlagernden Wellenzügen an einem bestimmten Ort. Die normalerweise diffuse Reflexion der Beleuchtungswellenfront am Messobjekt kann dabei als neue Wellenfront betrachtet werden, welche aus vielen Elementarwellenzügen besteht. Abbildung 2.9 oben zeigt dies schematisch. Aus der konstruktiven und destruktiven Überlagerung der kohärenten Wellenzüge an verschiedenen Orten im Raum resultiert dann ein zufällig verteiltes, zeitlich konstantes Intensitätsprofil, das Speckle-Muster, wie Abbildung 2.9 unten zeigt.

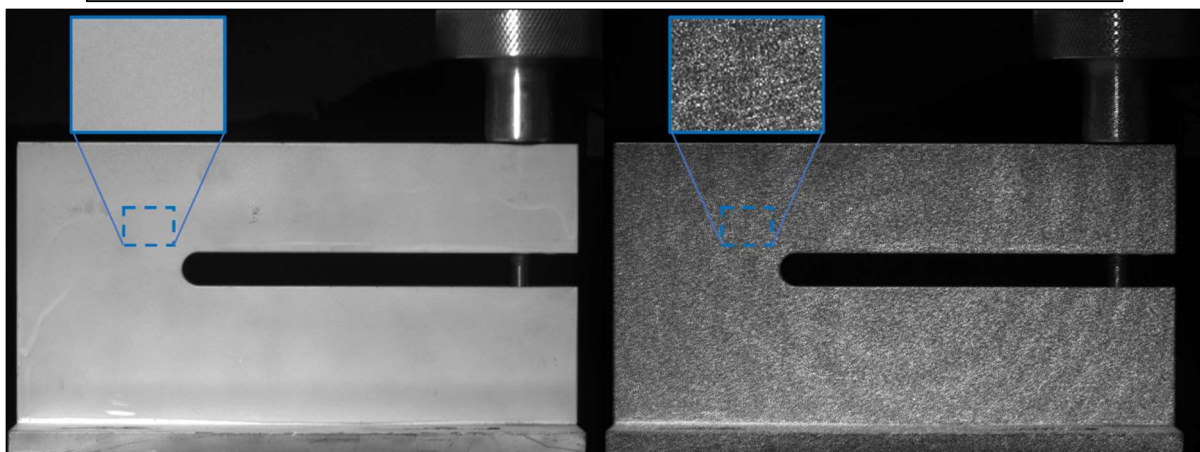
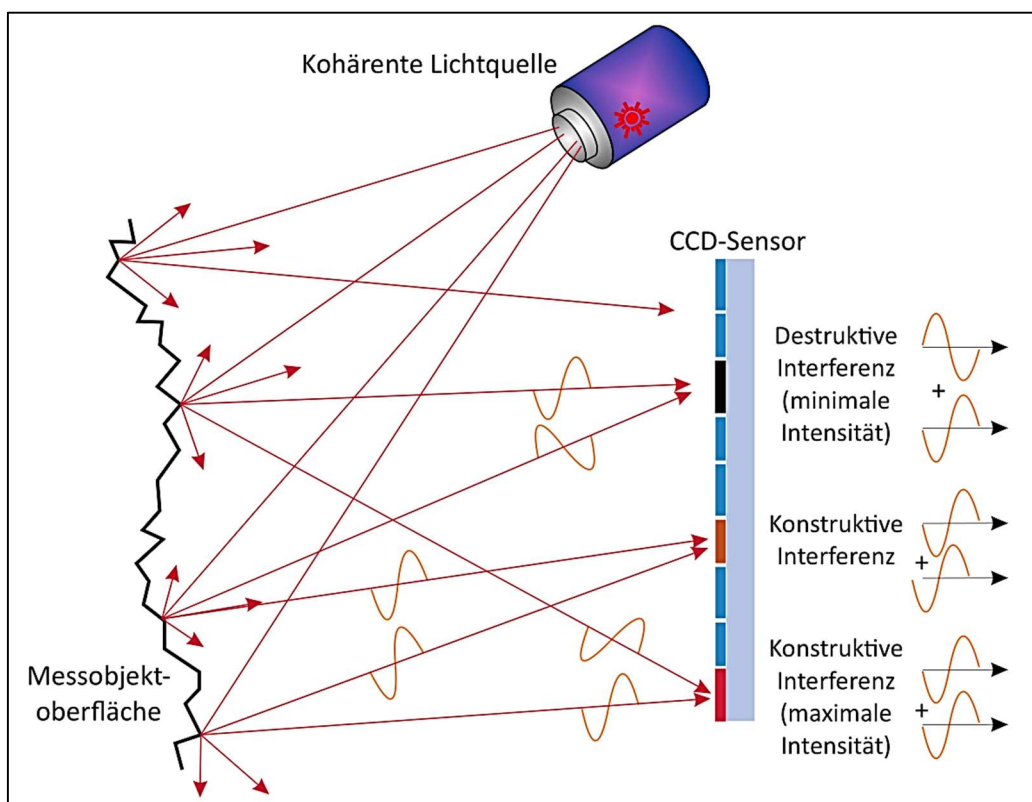


Abbildung 2.9: (Oben) Entstehung des Specklemusters schematisch ([10] S. 553); Messobjekt unter inkohärentem Licht (unten links) und unter kohärentem Licht mit Speckle-Muster (unten rechts).

Abbildung 2.9 oben zeigt zum einfacheren Verständnis die Entstehung von sog. objektiven Speckles. In der technischen optischen Messtechnik wird jedoch meist eine Abbildungsoptik vor dem Bildsensor verwendet (z. B. ein Objektiv), wodurch sog. subjektive Speckles entstehen. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden ausschließlich subjektive Speckles betrachtet. Dies ergibt sich in den folgenden Abschnitten und Gleichungen hauptsächlich durch die Beachtung von Beugungseffekten, welche durch die Apertur²¹ der Abbildungsoptik entstehen, s. auch ([36] S. 7 f.).

Zum Speckle-Muster sei angemerkt, dass, neben der genauen Positionierung von Messgerät und Messobjekt im Raum, alleine durch die Toleranzabweichungen der verwendeten Komponenten (Laser, Interferometer-Optiken, Objektiv, Kamerachip usw.) stets ein anderes Speckle-Muster sichtbar wird. Dies ist auf die hohe Genauigkeit der verwendeten Messtechnik zurückzuführen. Von daher wird beim Speckle-Muster auch vom einzigartigen „Fingerabdruck“ des Messaufbaus gesprochen. Ein spezielles Speckle-Muster kann nur mit demselben Messgerät auf derselben Oberfläche im selben Messabstand erfasst werden. Dies ist reproduzierbar möglich. Hierfür ist vor allem die im Technischen relevante Fraunhofer-Fernfeld-Näherung, auch *Fourier-Optik* genannt, verantwortlich ([33] Kapitel 11.3.3, [38] Kapitel 2.5.2, [39] S. 275 ff.). Sie ist gültig bei großer Beobachtungsentfernung und kleiner Abbildungsapertur. Demnach ergeben sich orthogonal zur Reflexionsebene annähernd kegelförmige Bereiche konstruktiver und destruktiver Interferenz, die bei Abstandsvariationen zwischen Messobjektoberfläche und Messgerät in diese Richtung nahezu dasselbe Speckle-Muster hervorrufen. Abbildung 2.10 zeigt das Phänomen schematisch für den einfachen Fall der Zwei-Quellen-Interferenz in der Ebene, repräsentativ für die Reflexion von zwei Elementarwellen an einer Messobjektoberfläche. Als einfache Betrachtung für die Fourier-Optik kann angenommen werden, dass die Speckles (für kleine Beobachtungswinkeländerungen) „an der Messobjektoberfläche haften“.

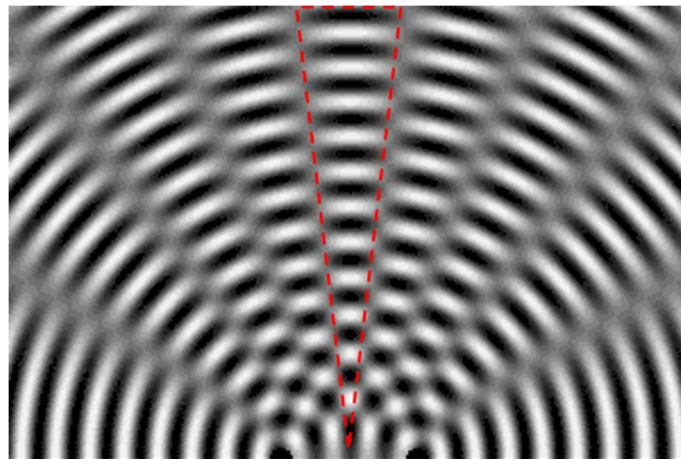


Abbildung 2.10: Zwei-Quellen-Interferenz in der Ebene, zusammengestellt aus [40]; rot markiert ist ein Bereich, innerhalb dessen die beiden halbkreisförmigen Wellenfelder sich konstruktiv überlagern und ihre Amplitude sich aufaddiert.

Bei einem einzelnen Speckle, genauer dem „Speckle 0. Ordnung“, handelt es sich nach der Definition um das zentrale Intensitätsmaximum der sog. Beugungsscheibchen, welche entstehen, wenn monochromatisches Licht durch eine Kreisblende auf einen Abbildungsschirm trifft, s. Abbildung 2.11.

²¹ Die freie Öffnung, durch welche Lichtstrahlen treten können. Nicht zu verwechseln mit dem optischen Element „Blende“, welche selbst eine gewisse Apertur aufweist.

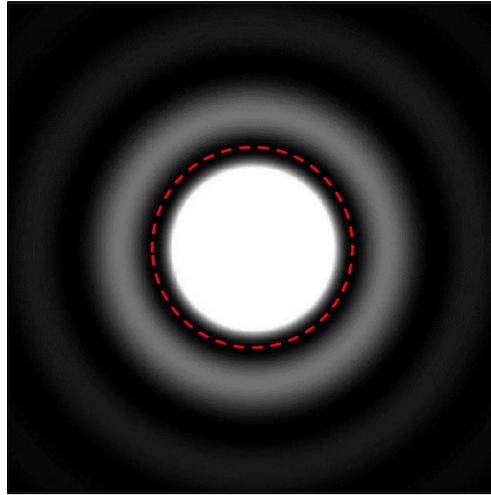


Abbildung 2.11: Auf einem Abbildungsschirm entstehende Beugungsscheibchen bei Transmission von monochromatischem Licht durch eine Kreisapertur (logarithmische Darstellung) [39]. Der zentrale Speckle 0. Ordnung ist rot umkreist.

Der Durchmesser des Speckles entspricht der Kreisbahn entlang der ersten Minimumstelle, wo die Intensität aufgrund destruktiver Interferenz der gebeugten Wellenfront gleich null ist, wie in der Abbildung angedeutet. Nun werden auf dem Kamerachip unzählige Speckles abgebildet, entsprechend dem vom Objektiv erfassten Teil der vom Messobjekt reflektierten Wellenfront. Der statistisch verteilte, mittlere Speckledurchmesser im Fernfeld für eine runde Kreisapertur²² kann mit Gleichung 2.8 als spezielle Lösung der Bessel-Funktion beschrieben werden ([36] S. 7).

$$\bar{D}_{\text{Sp}} \approx 2,44 \frac{\lambda f}{D} \quad (2.8.)$$

Mit

$\bar{D}_{\text{Sp}}$ = mittlerer Speckledurchmesser

λ = Laserwellenlänge

f = Objektivbrennweite

D = Durchmesser der Kreisapertur

Um optimale Messergebnisse zu erhalten, wird der mittlere Speckledurchmesser über die Objektivblende an die verwendete Kamerapixelgröße angepasst. Speckles kleineren Durchmessers als die Kamerapixel verursachen laterale Unterabtastung und damit Kontrastverlust. Speckles größeren Durchmessers reduzieren die laterale Messauflösung ([41] S. 151). Es sei noch angemerkt, dass es Störeinflüsse der ringförmigen²³ Beugungsscheibchen bzw. Speckles höherer Ordnung gibt, s. ([42] Kapitel 2.2 und 2.3). Im Rahmen dieser Arbeit können sie jedoch als vernachlässigbar klein bewertet werden (unter 1,75 % für 1. Ordnung vgl. zu 0. Ordnung).

Eine wichtige Größe im Rahmen dieser Arbeit ist auch die mittlere Specklebreite bei Beugung an Spaltaperturen (s. Kapitel 4.1.c), die sich nach Gleichung 2.9 ergibt. Speckles nach Beugung an einer

²² Für Objektive geläufig.

²³ Hier für das Beispiel „Beugung an einer Kreisapertur“.

Kreisapertur mit einem Durchmesser D sind breiter als Speckles nach Beugung an einer Spaltapertur mit einer Aperturbreite von $b = D$.

$$\bar{b}_{\text{Sp}} \approx 2 \frac{\lambda f}{b} \quad (2.9.)$$

Mit

$\bar{b}_{\text{Sp}}$ = mittlere Specklebreite

b = Breite der Spaltapertur

2.2.d. Verwendung von Laserdioden

Dank der stetigen Weiterentwicklungen der Materialwissenschaft zur Verbesserung von Computer-Prozessoren haben Halbleiter ein für die Laser-Messtechnik gewinnbringendes Niveau erreicht. So wurden Halbleiterelemente für die optische Emission von Strahlung verbessert, wodurch nun Lichtquellen mit nie dagewesenem Wirkungsgrad²⁴ zur Verfügung stehen ([38] S. 337, [30] u. a. S. 59 f.). Dabei hat der Konsumgütermarkt für optische Laufwerke wie CD-Brenner und Blu-ray Player den Preis für qualitative Laserdioden verschiedenster Wellenlängen extrem reduziert (z. B. ab 1 €). Die Vorteile der Laserdiode (LD) für die optische Messtechnik bzw. den Messgerätebau, besonders für mobile Geräte, sind ihre kleine Baugröße, ihr geringer Energieverbrauch und die geringen Kosten, s. Abbildung 2.12. Bezüglich der optischen Interferometrie ist zudem von Vorteil, dass die Laserdioden bauartbedingt aufgeweitete Licht aussenden.

Einzig problematisch ist die Kohärenz, die bei den günstigen strom-, leistungs- und temperaturungeregelten Laserdioden herstellerseitig unbestimmt ist. Da die Shearografie jedoch keine hohen Anforderungen²⁵ an die Kohärenz stellt, ist die Verwendung günstiger Laserdioden grundsätzlich möglich. Hierbei muss den Laserdioden eine gewisse Einschwingzeit zum Erreichen eines thermischen Gleichgewichts mit der Umgebung gewährt werden (z. B. 2 Minuten), damit keine Wellenlängensprünge während einer Messung auftreten ([34] S. 172 f.). Prinzipbedingt weisen Laserdioden mit höherer Wellenlänge bei gleicher spektraler Linienbreite eine höhere Kohärenzlänge auf (vgl. Gleichung 2.7). Viele Versuche des Autors haben gezeigt, dass die „ältesten“, roten Laserdioden (zwischen 650 nm und 700 nm) oftmals eine sehr gute Kohärenz für Shearografie, alle anderen (auch verhältnismäßig langwellige IR Laserdioden) mit wenigen Ausnahmen eine sehr schlechte Kohärenz aufweisen.

Ein nicht ganz konsistenter, praktisch beobachteter Einfluss bzgl. der Kohärenz ist die elektrische Leistung P_{el} der Dioden, s. auch ([43] S. 91 f.). Je höher diese Leistung ist, umso mehr Verlust-Wärmeleistung P_{w} (entsprechend dem Wirkungsgrad) muss über das Material abgeführt werden, was besagte Wellenlängensprünge verursacht und ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung erschwert. Dementsprechend sind Laserdioden mit geringerer optischer Leistung, beispielsweise 50 mW, zunächst für Laboranwendungen mit Probenoberflächenvorbereitung (weiß einsprühen für höheren Reflexionsgrad) zu bevorzugen. Für den industriellen Einsatz ist diese Probenvorbereitung jedoch oftmals unzulässig, wodurch die notwendige höhere optische Leistung durch eine Beleuchtung mit mehreren Dioden erreicht werden kann.

²⁴ Gängige LEDs beispielsweise bis über 95 %, rote Laserdioden über 70 %; siehe Hersteller-Datenblätter.

²⁵ Typischerweise sind wenige Millimeter Kohärenzlänge ausreichend, wie in Kapitel 2.4.b gezeigt wird.

Hierbei sei nur kurz ein störendes Phänomen²⁶ angesprochen, welches bei der Differenzphasenberechnung im Überlagerungsbereich von nicht miteinander interferenzfähigen Speckle-Mustern entsteht (als Verständnis-Grundlage sind die Informationen aus dem gesamten Kapitel 2 notwendig). Im Messergebnis wird ein rauschbehafteter, streifenförmiger Bereich sichtbar, der vermutlich aus entgegengesetzten, betragsgleichen Intensitätsänderungen der beiden unabhängigen Speckle-Mustern resultiert. Dies verursacht einen lokalen Interferenzkontrast von null, wodurch die Interferenzphase als konstant erfasst wird. Ein ähnliches Phänomen ist in einigen Fällen auch bei der Verwendung einer einzigen Laserdiode feststellbar. Wird die out-of-plane Verzerrung eines zylindrischen Messobjektes bei einer Shearrichtung orthogonal zur Zylinderachse erfasst, werden im Messergebnis rauschbehaftete, streifenförmige Bereiche entlang der Zylinderachse sichtbar. Dabei nimmt die Streifenanzahl mit dem Shearbetrag zu. Als Ursache wird die Selbstinterferenz der prinzipbedingt aufgeweiteten Laserdiodenbeleuchtung mit sich selbst vermutet, wobei die sich ändernde optische Pfadlänge zum Messgerät über die Zylinderoberfläche eine entscheidende Rolle spielt. Es werden keine weiteren Darstellungen aufgezeigt, da beide Phänomene zunächst näher untersucht werden sollten.

Abschließend sei angemerkt, dass der LD nachgeschaltete Abbildungsoptiken wie Blenden, Diffusorgläser oder Linsen zur Strahlformung zur Verminderung der Kohärenz führen können. Bezüglich weiterer Eigenschaften und Funktionsweisen von Laserdioden wird auf die einschlägige Literatur verwiesen ([38] Kapitel 9, [34], [32] Kapitel 14).

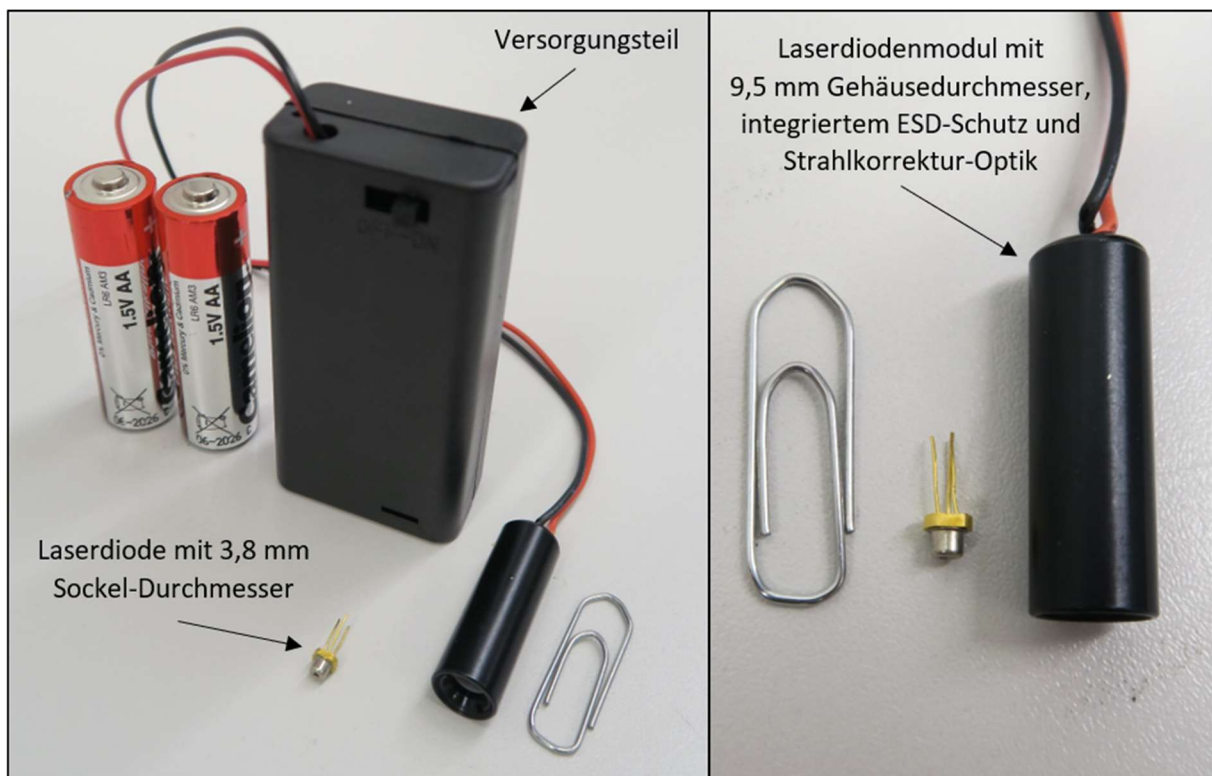


Abbildung 2.12: Laserdiodenmodul mit Versorgung im Größenvergleich zu Laserdiode mit 3,8 mm Sockel und Büroklammer.

²⁶ Von einem industriellen Shearografie-Messgerätehersteller als *cross-talk* bezeichnet; in der Literatur konnten für die optisch-interferometrische Messtechnik keine relevanten Quellen gefunden werden.

2.2.e. Lasersicherheit

Ein besonderes Anliegen, dem im Rahmen dieser Arbeit stets Beachtung geschenkt wird, ist der Laserschutz. Durch die Reduktion der benötigten optischen Laserleistung für ein qualitativ hochwertiges Messergebnis kann die potentielle Gefährdung, die vom Messgerät ausgeht, gezielt herabgesetzt werden. Nach DIN EN 60825-1 werden Lasergeräte in mit der Gefährdung steigende Klassen eingestuft. Eine besonders interessante Klasse ist die Laserklasse 2 (bzw. 2M). Beim Betrieb eines Gerätes dieser Laserklasse ist es noch nicht notwendig, einen Laserschutzbeauftragten zu bestellen. Zudem sind keine besonderen Schutzmaßnahmen für den Anwender bzw. dessen Umgebung erforderlich. Wirtschaftlich und praktisch betrachtet ist die Einhaltung dieser Laserklasse, soweit für die Messaufgabe tauglich, am sinnvollsten. Aus dem Grund werden in dieser Arbeit Entwicklungen fokussiert, die der anwendungsbezogenen Nutzung der Laser-Messtechnik dienen sollen. Das in der Arbeit weiterentwickelte räumliche Phasenschieben (SPS²⁷) macht eine nie dagewesene Flexibilität und Mobilität der Messtechnik möglich, die durch erforderliche Schutzmaßnahmen nicht gehemmt werden soll. Innerhalb der Arbeit gibt es demnach Abgrenzungen zu einigen Laboraufbauten aus der Literatur, bei denen Anwenderschutz und Gerätekosten nicht beachtet werden. Als weiterführende Quelle sei auf ([10] Teil XI) verwiesen.

Eine kurze Betrachtung nach DIN EN 60825-1 [44] soll den Einfluss verständlich machen: Die maximale, zugängliche optische Laserleistung im sichtbaren Spektrum (hier ab 500 nm bis 700 nm) für ein Gerät mit Laserklasse 1 im Dauerstrichbetrieb (cw²⁸) beträgt 0,39 mW bezogen auf ein das menschliche Auge repräsentierendes Messmittel. Für Klasse 2 ist maximal 1 mW erlaubt. Klasse 3R mit den ersten besonderen Schutzmaßnahmen beschreibt Geräte bis maximal 5 mW optischer Leistung und bis maximal 500 mW gilt Klasse 3B. Durch die Entwicklung für SPS, aufgezeigt im Kapitel 4.2 (Gitterblenden), wird das erfassbare Messlicht um einen Faktor von 10 gesteigert (ohne Zusatzkosten) und durch die Entwicklung in Kapitel 4.1.a (Polarisationsoptiken) nochmals um den Faktor 2 (bei gleich hohem Kostenfaktor). Bei gleicher Laserleistung kann somit 20-fach mehr Licht erfasst werden. Die Messaufgabe, die ein Gerät der Klasse 3B mit 8 mW optischer Leistung erfordert hätte, kann so mit einem Gerät der Laserklasse 1 bewältigt werden. Das bedeutet, dass hier unter jeden Umständen Augensicherheit gewährleistet wird. Im Allgemeinen wird durch stärkeres Messlicht (bzw. eine stärkere Beleuchtung) ein besseres Messergebnis erreicht, s. Kapitel 2.6.a und 2.6.e.

Ein Vorteil von örtlich getrennten, schwachen Laserquellen ist, verglichen zu einer einzigen starken Laserquelle, dass bei sinnvoller Anordnung derer eine höhere Augensicherheit gewährleistet werden kann. Demnach werden Überlagerungszonen der Beleuchtung mehrerer Quellen klein gehalten, bzw. sie existieren erst ab höheren Abständen zu den Quellen. Auf diese Weise ist der kritischste, für das Auge zugängliche Bereich jeweils vor einer der einzelnen Laserquellen.

Über den Laser hinaus gibt es im Betrieb dieser Messtechnik andere potentielle Gefährdungen für das menschliche Auge, die zwar nicht weiter analysiert, jedoch so gering wie möglich gehalten werden sollten. Bei der ZfP mit optischer Anregung kommen beispielsweise Halogenstrahler oder auch Blitzlampen zum Einsatz, um das Messobjekt zu erwärmen. Viele shearografische Messungen in dieser Arbeit werden mit eigenen thermografischen Messungen verglichen, wobei die optische Anregungsstärke (unabhängig von deren Dauer) gleich hoch gewählt wird. In vielen Fällen können beide Verfah-

²⁷ Spatial Phase Shift.

²⁸ Continous Wave.

ren zur Lösung einer Messaufgabe genutzt werden. Jedoch ist die Shearografie oftmals empfindlicher²⁹, was weniger optische Anregungsleistung und dadurch einen höheren Augenschutz sowie einen geringeren Energieeinsatz zur Folge hat (s. auch Kapitel 6).

2.3.ameratechnik

Der Kamerachip, das Kernelement der optischen Messtechnik, hat wie die Laserdiode in jüngster Zeit enorme Verbesserungen dank der Computer-Prozessoren Materialentwicklungen erfahren. Gleichzeitig hat der Smartphone Konsumgütermarkt die Baugrößen und Preise auf ein Minimum gesenkt, s. Abbildung 2.13.



Abbildung 2.13: Industrielles Kamerasystem und seine Komponenten im Größenvergleich zu Kaffeetasse, Kaffeelöffel und Büroklammer.

²⁹ ([66] S. 24): „Empfindlichkeit: Änderung des Wertes der Ausgangsgröße [...] eines Messgerätes, bezogen auf die sie verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße [...].“

Vor ca. 25 Jahren wurden shearografische Aufnahmen noch mittels chemiekalischer Fotoentwicklung erfasst, stattdessen gilt die optische Messtechnik heute mit als Voraussetzung für die digitale Vernetzung der Industrie 4.0 ([10] Vorwort). In nahezu jeder großen Produktionslinie sind Kameras zu finden, die mit integrierten Bildverarbeitungsprozessoren beispielsweise Teile-Zählungen und zweidimensionale, geometrische Qualitätsprüfungen in wenigen Millisekunden durchführen.

Ein Kamerachip (auch *Bildsensor* genannt) besteht aus einer Matrix photosensibler Pixelelemente, deren Halbleiterwerkstoff bei Beleuchtung eine Spannung erzeugt. Diese wird für jeden Pixel ausgelesen, im integrierten „frame grabber“ zum Digitalbild zusammengesetzt und meist mittels Kabel an den Rechner geleitet. Typische Kamerawerte bei der vollflächigen optischen Messtechnik sind beispielsweise eine Kamerataktzeit von 40 Hz (Bildwiederholrate), eine Tiefenauflösung von 8 Bit (Unterscheidung von 256 Grauwerten) und eine laterale Auflösung von 1 bis 5 Megapixel bei Chipgrößen weniger als 1/3 der Größe einer Briefmarke. Die Pixel weisen eine quadratische Größe b_{px} von ca. 3 μm bis 6 μm auf. Der Kamerachip befindet sich oftmals in einem Kameragehäuse, dem ein Objektiv vorgeschaltet wird. Neben der Objektivblende zur Einstellung der einfallenden Lichtmenge und dem Fokus zur Scharfstellung des Objektes ist die Objektivbrennweite f ein wichtiger Parameter innerhalb dieser Arbeit. Die Brennweite nimmt für typische industrielle Messaufgaben, abhängig von vielen weiteren Parametern, Werte von 10 mm (Weitwinkelobjektiv) bis 75 mm (Teleobjektiv) an.

Auf besondere elektronische Architekturen von Kamerachips wie CCD-Sensoren³⁰ oder CMOS-Sensoren³⁰ wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Zum heutigen Zeitpunkt haben sie vergleichbare Eigenschaften und erfahrungsgemäß einen untergeordneten Einfluss auf die gängige optisch-interferometrische Messtechnik. Es sei auf die einschlägige Literatur verwiesen, s. ([37] Kapitel 10.4 und 12).

Schwarz-weiß, Farb- und Polarisationskamera

Für die optische Messtechnik werden typischerweise schwarz-weiß (bw³¹) Kameras verwendet. Dabei erfassen die Pixel die Energie von Photonen verschiedener Wellenlänge entsprechend der material-spezifischen Quanteneffizienz (QE), s. Abbildung 2.14 links. Sofern es die Messaufgabe erfordert, kommen Farbkameras zum Einsatz. Klassischerweise werden dabei z. B. sog. Bayer-Filtermasken verwendet. Einem Paket von 2x2 Pixeln wird dabei unmittelbar vor dem Kamerachip jeweils ein roter, zwei grüne und ein blauer Farbfilter vorgeschaltet (RGB bzw. RGGB Kamera). Die Rohbilder je Farbkanal werden über die jeweilige QE normiert und zum Farbbild zusammengesetzt, s. Abbildung 2.14 rechts. Somit kann für ein 2x2 Pixelpaket eine wellenlängenspezifische Information über die Farbe des Objektes erfasst werden. Die laterale Auflösung viertelt sich jedoch durch die Paketbildung. Zudem sinkt die absolute Quanteneffizienz aufgrund der vorgeschalteten Absorptionsfilter. Es gibt weitere, für diese Arbeit nicht relevante Methoden der Farbinformationsgenerierung bis hin zu sog. hyperspektralen Flächenkameras mit mehr als 16 Farbpixelpaketen, welche derzeit Bestandteil der Forschung u. a. in der Medizin- und Lebensmitteltechnik sind.

³⁰ CCD = Charge Coupled Device; CMOS = Complementary Metal Oxid Semiconductor.

³¹ Black-White.

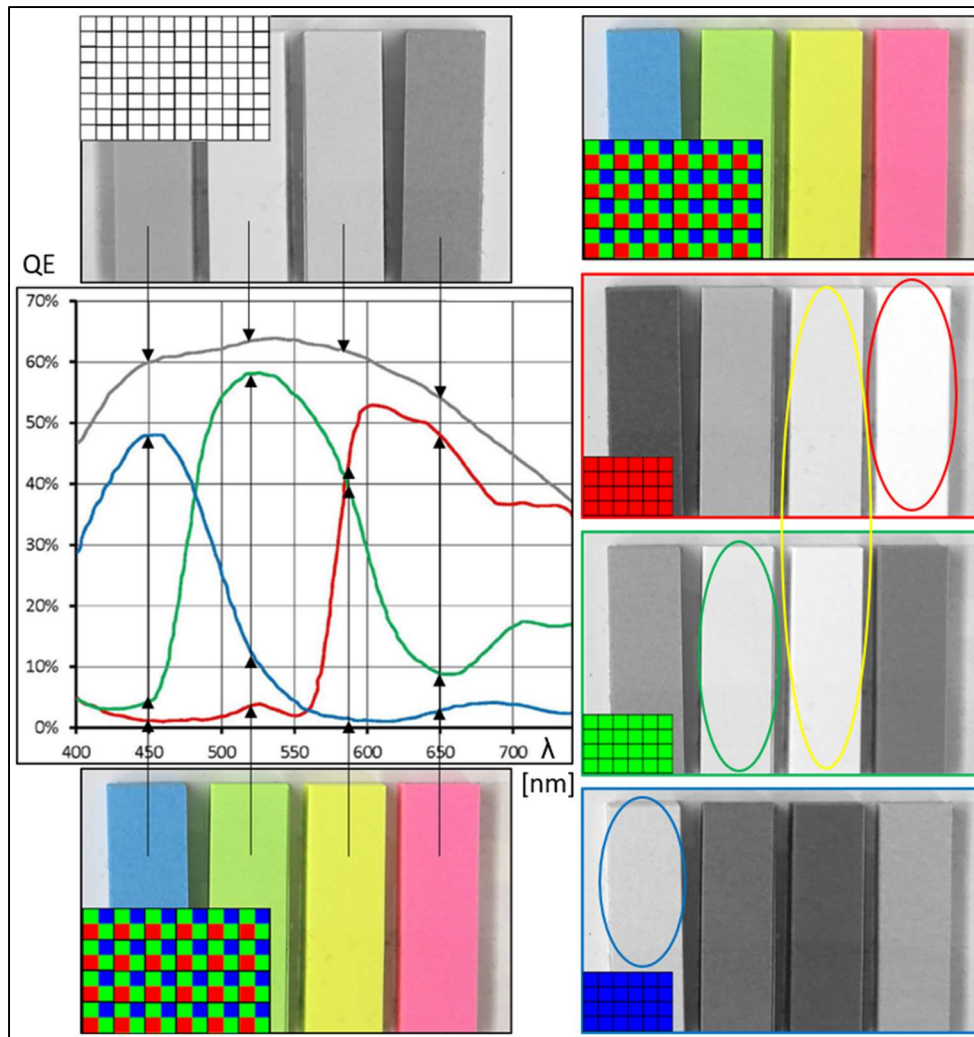


Abbildung 2.14: (Links) wellenlängenspezifische Quanteneffizienz (QE) [45] für ein Bild mit bunten Objekten, erfasst durch eine schwarz-weiß Kamera oben und durch eine RGB Kamera unten; (rechts) Rohbilder der Farbkanaäle für eine RGB Bildzusammensetzung; die Farbe Gelb setzt sich aus einem nahezu gleich hohen roten und grünen Anteil zusammen.

Eine neue Art von Kamerachip mit Filter stellt die sog. Polarisationskamera dar. Ähnlich der Bayer-Filtermaske wird einem Paket aus vier Pixeln absorbierende Linearpolarisatoren vorgeschaltet. Für das Bildpaket kann so eine polarisationsspezifische Information über das Objekt erfasst werden, s. Abbildung 2.15. Dies ist derzeit Bestandteil der Forschung u. a. in der Medizin- (spannungsoptische Untersuchung von Glasgefäßen) und Fertigungstechnik (Untersuchung der Faserorientierung von CFK-Gelegen) [46]. Abbildung 2.15 zeigt kurz die Funktionalität, die mit dem neuen Chip bei der Bildanalyse realisiert werden kann. Hierbei verursacht die Webrichtung der CFK Fasern eine starke Polarisation des reflektierten Lichts. Während dies durch eine bw Kamera nicht sichtbar wird, kann mittels Polarisationskamera die Webrichtung durch vier Rohbilder, je nach Polarisationsrichtung, genau erfasst werden. So kann die örtliche Polarisation durch 2x2 Pixelpakete farbcodiert dargestellt werden.

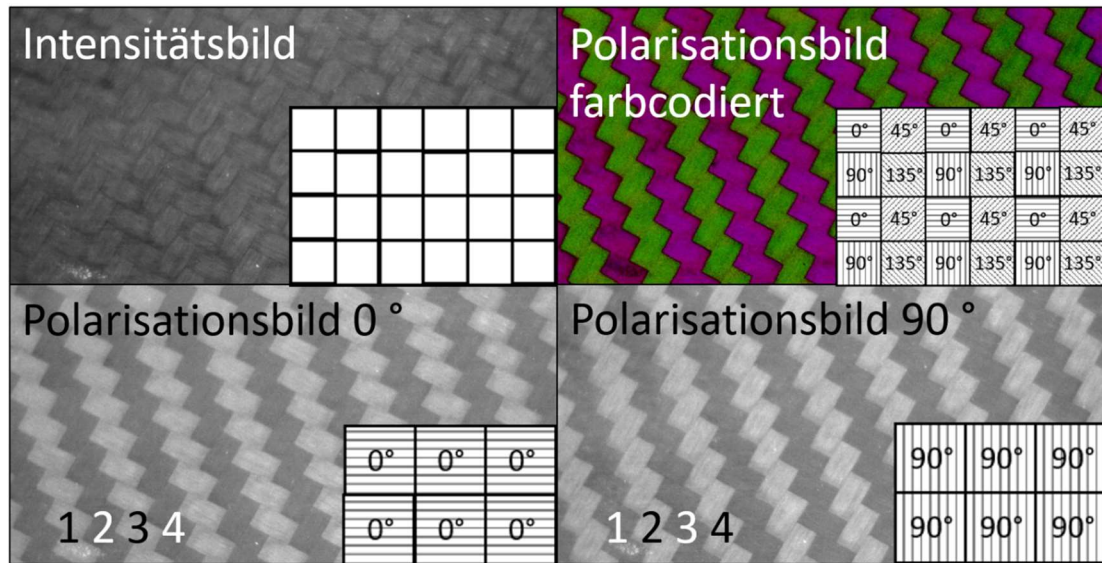


Abbildung 2.15: Bild einer CFK Gewebestruktur, erfasst durch eine schwarz-weiß Kamera (oben links) und durch eine Polarisationskamera mit vier Polarisationskanälen; beispielhaft dargestellt der 0° Kanal (unten links) und der 90° Kanal (unten rechts); hierbei ist erkennbar, dass die Lichtreflexion an der Struktur stark von der Webrichtung abhängt und polarisiert ist. Die Rohdaten können für 2x2 Pixelpakete zum farbcodierten Bild der Polarisation zusammengesetzt werden (oben rechts).

Abbildung 2.16 zeigt eine einfache Polarisationsbildanalyse für einen Motorradhelm aus CFK. Bei der Analyse wird ein Bereich erkennbar, wo die Polarisations-eigenschaft des Gewebes eine Anomalie aufweist, welche im einfachen Intensitätsbild unsichtbar bleibt. Das Phänomen wird nicht weiter untersucht. Der neue polarisationsunterscheidende Kamerachip wird im Rahmen dieser Arbeit erstmals für Shearografie eingesetzt, s. Kapitel 4.3.c.

Bezüglich weiterer Eigenschaften und Funktionsweisen von Kameras und Objektiven wird weiterführend auf ([37] Kapitel 10.4 und 12) verwiesen.



Abbildung 2.16: Motorradhelm aus CFK zeigt seitlich (Bereich blau umrandet) eine Polarisationsanomalie (rot umkreist), welche im reinen Intensitätsbild unsichtbar ist.

2.4. Interferometer-Aufbau und Mechanik

Mit optischer Interferometrie werden heutzutage verschiedenste Messaufgaben gelöst. Entsprechend umfangreich und teilweise spezialisiert sind die Messaufbauten und Interferometer, die dabei zum Einsatz kommen. Im Folgenden wird lediglich auf den nach dem Stand der Technik gängigsten Aufbau für Holografie und Shearografie eingegangen. Die Shearografie gilt als „kleine Schwester“ der Holografie, von daher wird der holografische Messaufbau zu Beginn kurz erläutert. Darüber hinaus erleichtert der Vergleich zum shearografischen Aufbau das Verständnis beim Einstieg in diese Thematik.

2.4.a. Holografie

Bezüglich der umfangreichen Historie zur holografischen Interferometrie sei auf die einschlägige Literatur verwiesen ([27] Kapitel 12, [23] Teil 1 Kapitel 1). Auf die Entdeckung des Ingenieurs Dennis Gabor 1947, der als „Erfinder“ der Holografie gilt, wird hier kurz eingegangen. Mit der Aufzeichnung einer

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

dreidimensionalen Bildinformation auf einer zweidimensionalen Platte, damals noch bei Beleuchtung mit einer niederkohärenten Quecksilberdampflampe, legte er den Grundstein für das nun weitreichende Feld der modernen Holografie. 1971 erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik.

Out-of-plane Aufbau

Abbildung 2.17 zeigt schematisch den typischen Aufbau für Holografie nach dem aktuellen Stand der Technik [10] mit zeitlichem Phasenschieben (TPS³²).

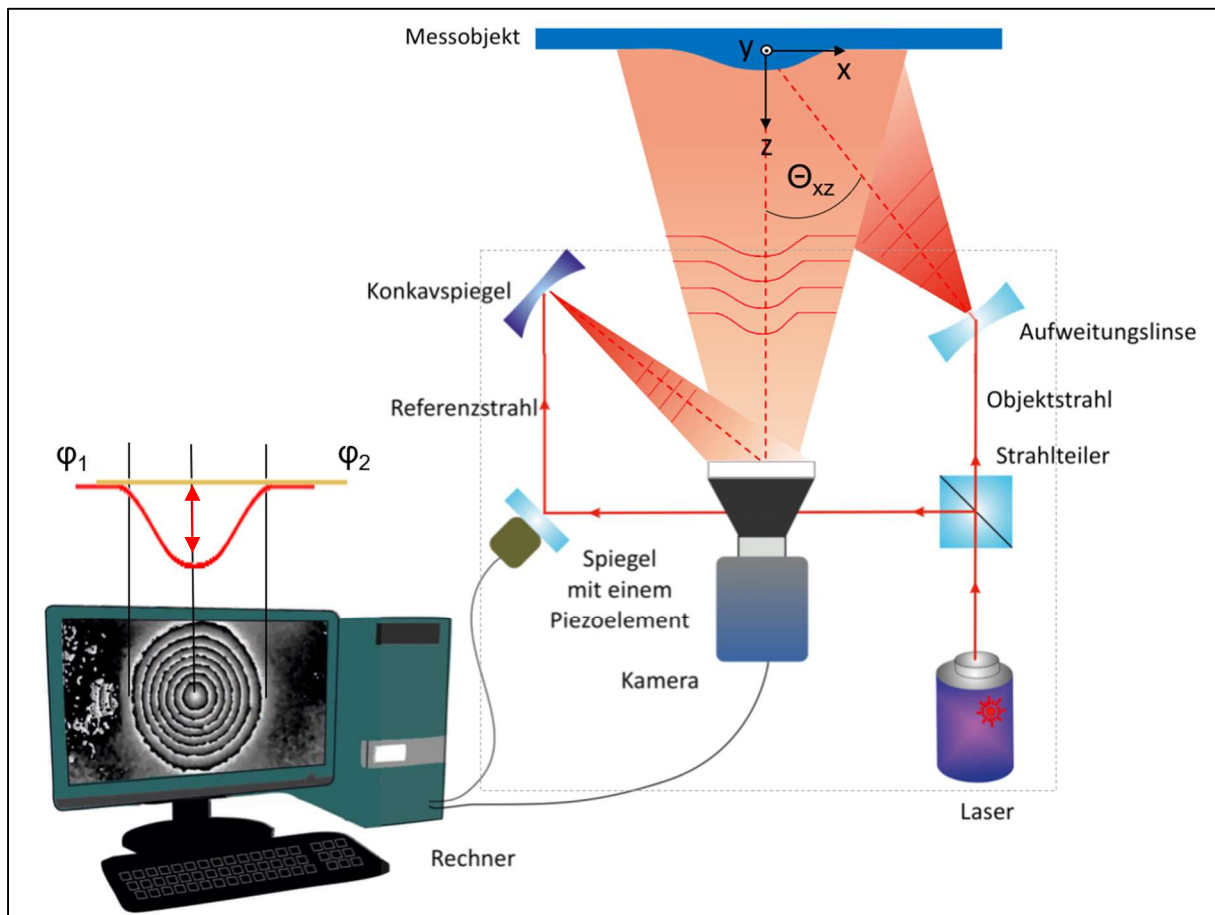


Abbildung 2.17: Typischer Messaufbau der out-of-plane Holografie, zusammengestellt aus ([35] S. 40) und ([10] S. 453).

Laserlicht wird an einem Strahlteiler in zwei Teilwellen zerlegt, wobei ein Teil durch das Umlenken über einen Spiegel mit einem Piezoelement auf die Kamera geleitet wird. Diese Teilwelle dient als unveränderliche Referenzwellenfront. Der Piezospiegel wird für das Phasenschieben benötigt (s. Kapitel 2.5.a). Die andere Teilwelle, die Objektwellenfront, wird auf das Messobjekt geleitet, an der Oberfläche reflektiert und tritt dann in die Kamera ein. Auf dem Kamerachip kommt es zur interferometrischen Überlagerung der beiden Wellenfronten, was am Rechner dargestellt wird. Für eine ebene³³ Referenz-

³² Temporal Phase Shift.

³³ Bei vielen holografisch arbeitenden Interferometern wird die Referenzfront koaxial zur Beobachtungsachse eingekoppelt, s. ([37] Kapitel 21.3.), was hier strenggenommen auch notwendig ist. Aus Anschaulichkeitsgründen und da es für die ESPI irrelevant ist, ist dies hier nicht dargestellt.

wellenfront und ein ebenes Messobjekt mit lokaler, runder Auslenkung zeigt die Holografie als typisches Interferenzmuster konzentrische Kreise an, auch *bullseye*³⁴ genannt. Das Muster entsteht aufgrund der Differenz der Phasenwinkel der Referenzwellenfront φ_1 und der Objektwellenfront φ_2 , wie in der Abbildung schematisch dargestellt. Sie können als Höhenlinienkarte gelesen werden entsprechend der Messobjektform (s. auch Kapitel 2.5.d), d. h. Hoch- und Tiefpunkte der Objektform zeigen sich durch hohe Streifenordnungen. Bezogen auf die in dieser Arbeit fokussierten Speckle-Messtechniken wird für raue Messobjekte mit der ESPI die Verformung als Messgröße³⁵ erfasst (s. auch Kapitel 2.5.b).

Aus praktischen Gründen verläuft die Referenzwellenfront intern, also innerhalb des Messgerätes. Ein Gehäuse ist als gestricheltes Rechteck in der Abbildung angedeutet. Ab der Stelle am Strahlteiler, an dem die zwei Wellenfronten gebildet werden, verlaufen diese auf unterschiedlichen Wegen bis zur Wiedervereinigung auf dem Kamerachip. Jegliche Störung, die eine der beiden auf diesen getrennten Wegen erfährt, führt unmittelbar zu einer Störung im Messergebnis (vgl. Kapitel 2.6.e). Darüber hinaus ist die optische Pfadlänge der Objektwellenfront in der Regel viel größer als die der Referenzwellenfront, entsprechend ca. 2-mal dem Messabstand. Die Pfaddifferenz, die aufgrund dessen vorhanden ist, darf maximal so groß sein wie die Kohärenzlänge des Lasers. Ansonsten ist keine Interferometrie möglich (s. Kapitel 2.2.b).

Abbildung 2.17 stellt den out-of-plane (oop) Aufbau der Holografie dar, d. h. es können Formen in z-Richtung erfasst werden. Die Beobachtung durch die Kamera erfolgt dabei typischerweise orthogonal zur Messobjektoberfläche, um optische Bildverzerrungen zu vermeiden. Die Beleuchtung erfolgt möglichst orthogonal zur Oberfläche, angenommen mit $\Theta_{xz} \approx 0$, was unter typischen Messbedingungen mit ausreichend hohem Messabstand zu vernachlässigbaren Messabweichungen führt (s. Kapitel 2.6.c). Auf diese Weise wird physikalisch eine sog. Sensitivität nahezu orthogonal zur Messobjektoberfläche abgebildet, da sich der optische Pfad der Objektwellenfront durch die Form des Messobjektes verlängert oder verkürzt. Alle weiteren Betrachtungen zur Mechanik können sowohl mathematisch als auch vektoriell mit dem sog. Sensitivitätsvektor geführt werden, wobei es jeweils Vorzüge gibt. Bei den Entwicklungen innerhalb dieser Arbeit wird oftmals mathematisch vorgegangen, von daher sei bzgl. der Sensitivität auf ([35] S. 36 f.) und ([36] Kapitel 4.7) verwiesen.

Mechanik

Jeder Punkt an der Oberfläche eines Messobjektes kann im euklidischen Vektorraum nach Gleichung 2.10 beschrieben werden.

$$\vec{x} = x \vec{e}_x + y \vec{e}_y + z \vec{e}_z \quad (2.10.)$$

Mit

$\vec{x}$ = Positionsvektor eines Punktes im Raum

x, y, z = Ortsvariablen

$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ = Einheitsvektoren im euklidischen Raum

³⁴ Siehe Darts Sport.

³⁵ ([66] S. 2): „Messgröße: Physikalische Größe, der die Messung [...] gilt.“

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

Bei den optisch-interferometrischen Messtechniken werden relative Ergebnisse erfasst. Im vorliegenden Fall ergibt sich dies durch den Vergleich der Objektwellenfront mit der Referenzwellenfront. Somit wird die Objektoberfläche relativ zu einer Ausgangs“oberfläche“, dargestellt durch die Referenzwellenfront, erfasst (s. auch Abbildung 2.20, analog für Shearografie). Jeder Punkt der Ausgangsoberfläche kann beschrieben werden nach Gleichung 2.11.

$$\vec{x}_0 = x_0 \vec{e}_x + y_0 \vec{e}_y + z_0 \vec{e}_z \quad (2.11.)$$

Mit

$\vec{x}_0$ = Ausgangspositionsvektor eines Punktes im Raum

x_0, y_0, z_0 = Ausgangspositionswerte

Damit ergibt sich die relative Formabweichung, die durch die Holografie erfasst wird, nach Gleichung 2.12.

$$\vec{D} = \vec{x} - \vec{x}_0 \quad (2.12.)$$

$$\vec{D} = D_x \vec{e}_x + D_y \vec{e}_y + D_z \vec{e}_z$$

Mit

$\vec{D}$ = Formabweichungsvektor im Raum

D_u, D_v, D_w = Formabweichung in x-, y- und z-Richtung

Diese Formabweichung ist gleichbedeutend mit einer Verformung, wie sie bei der Speckle-Holografie, der ESPI, gemessen wird (s. Kapitel 2.5.b). Die Verformung ist im Allgemeinen definiert nach Gleichung 2.13 für kleine Verschiebungen ([36] S. 15 f., [47] Kapitel 3).

$$\vec{D} = \vec{u} + \epsilon \vec{dx} \quad (2.13.)$$

$$\text{mit } \vec{u} = u \vec{e}_x + v \vec{e}_y + w \vec{e}_z \quad \text{und} \quad \vec{dx} = dx \vec{e}_x + dy \vec{e}_y + dz \vec{e}_z$$

Mit

$\vec{u}$ = Verschiebungsvektor

u, v, w = Verschiebung in x-, y- und z-Richtung

ϵ = Linearisierter Verzerrungstensor³⁶

$\vec{dx}$ = Kantenlängenvektor eines infinitesimal kleinen Quaders

dx, dy, dz = Kantenlänge in x-, y- und z-Richtung

³⁶ Gültig für kleine Verzerrungen; auch *Ingenieursdehnung* genannt.

Mittels der geometrischen Betrachtungen, aufgeführt in ([35] Kapitel 3.2.3 und 3.2.4), ergibt sich daraus die Grundgleichung für das holografische Messergebnis³⁷ nach Gleichung 2.14.

$$N = \frac{1}{\lambda} [D_u \sin(\Theta_{xz}) + D_w (1 + \cos(\Theta_{xz}))] \quad (2.14.)$$

Mit

N = Streifenordnung

λ = Laserwellenlänge

Θ_{xz} = Beleuchtungswinkel in der xz-Ebene

Das Messergebnis zeigt Phasenstreifen an, vgl. Abbildung 2.17. Die Streifenordnung N wird mittels Phasenschieben und Demodulation (s. Kapitel 2.5.a und 2.5.d) bestimmt. Die Streifen ergeben sich aus den Verformungsanteilen über die Messfläche, normiert auf die eingesetzte Laserwellenlänge. Sobald die Gesamtverformung an einem Messpunkt die Laserwellenlänge überschreitet, ergibt sich ein Sprung zu einer höheren Streifenordnung.

Aus Gleichung 2.14 ist ersichtlich, dass der oop Verformungsanteil D_w für eine oberflächennormale Beleuchtung mit $\Theta_{xz} = 0^\circ$ doppelt so stark ins Messergebnis eingeht, verglichen zum in-plane (ip) Verformungsanteil D_x auf der xy-Messebene. Die vereinfachte Gleichung 2.15 beschreibt das Messergebnis für einen oop Aufbau mit $\Theta_{xz} = 0^\circ$.

$$N = \frac{2}{\lambda} D_w \quad (2.15.)$$

Der holografische ip Messaufbau nach dem aktuellen Stand der Technik mit TPS wird nicht aufgezeigt³⁸, da er nicht dem Kern dieser Arbeit entspricht. Es sei für die gängige *dual-beam-illumination* Methode auf ([35] Kapitel 3.2.5) und auf [48] verwiesen. Darüber hinaus ist ip Holografie auch analog nach der Methode der ip Shearografie möglich, s. nächstes Kapitel. An späterer Stelle wird ein holografischer ip Aufbau für räumliches Phasenschieben (SPS) nach dem aktuellen Stand der Forschung lediglich kurz vorgestellt, s. Kapitel 3.3.b. Vielmehr wird gleich auf die eigenen Weiterentwicklungen verwiesen, s. Kapitel 4.1.e und 4.3.a. Dabei wird ein neuartiger ip Aufbau vorgestellt, der erstmals praxisgerecht arbeitet und in einem weiterentwickelten Messgerät zum Einsatz kommt, s. Kapitel 5.3. An dieser Stelle wird lediglich angemerkt, dass mit ip Holografie jeweils die anderen beiden Verformungsanteile D_u und D_v gemessen werden können, s. Gleichung 2.12.

2.4.b. Shearografie

Bezüglich der umfangreichen Historie zur Shearografie sei auf die einschlägige Literatur in ([27] Kapitel 13) und ([36] S. 2 f.) verwiesen. Als besonderer Meilenstein sei der vermutlich erste shearografische

³⁷ Entsprechend dem Aufbau auf der xz-Ebene nach Abbildung 2.17.

³⁸ Siehe z. B. ([28] S. 77).

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

Versuchsaufbau von Hung und Taylor im Jahre 1973 und 1974 erwähnt [49], der mit optischem Keilprisma am Kameraobjektiv erfolgte. Kurz darauf entwickelten Hung [50] sowie nahezu zeitgleich Leendertz und Butters [51] das modifizierte Michelson-Interferometer für die Speckle-Shearografie. Mit diesem Aufbau ist der Shearvektor nicht mehr fest vorgegeben, sondern frei einstellbar. Dies ist ein Kernvorteil der Shearografie gegenüber der Holografie und damit (für räumliches Phasenschieben) auch Hauptthematik der Entwicklungen innerhalb dieser Arbeit (s. auch Kapitel 2.4.c). Der Aufbau entspricht noch heute dem weltweit etablierten Stand der Technik für shearografische ZfP, da er einfach, klein, günstig, flexibel und robust ist.

Out-of-plane Aufbau

Abbildung 2.18 zeigt schematisch den typischen Aufbau für oop Shearografie nach dem aktuellen Stand der Technik [10] mit TPS.

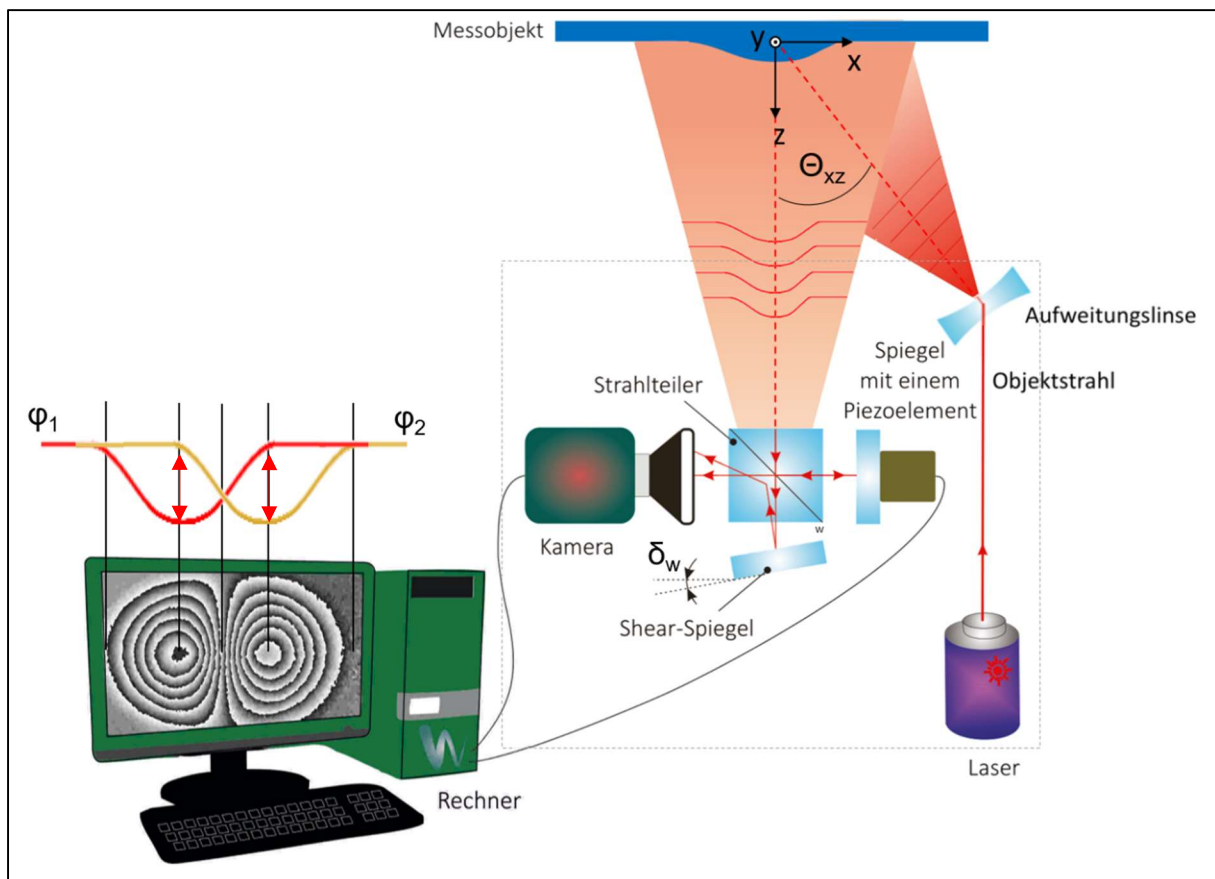


Abbildung 2.18: Typischer Messaufbau der out-of-plane Shearografie, zusammengestellt aus ([35] S. 44) und ([10] S. 463).

Laserlicht wird auf das Messobjekt geleitet, an der Oberfläche reflektiert und tritt dann in einen Strahlteiler ein. Dort wird es in zwei Teilwellen zerlegt und anschließend jeweils auf einen Spiegel geleitet. Ein Spiegel ist als Piezospiegel für das Phasenschieben ausgeführt (s. Kapitel 2.5.a). Der andere kann um einen sog. Shearwinkel verstellt werden. Die beiden Teilwellen werden nach der Reflexion an dem jeweiligen Spiegel wieder im Strahlteiler zusammengeführt und in Richtung Kamera geleitet. Auf dem Kamerachip kommt es zur interferometrischen Überlagerung der beiden Wellenfronten, wie es am

Rechner dargestellt wird. Für ein ebenes Messobjekt mit lokaler, runder Auslenkung zeigt die Shearografie als typisches Interferenzmuster zwei angrenzende Bereiche mit mehr oder weniger konzentrischen Kreisen an, was auch als *Schmetterlingsmuster* bezeichnet wird. Dieses Interferenzmuster ergibt sich aus der Differenz der Phasenwinkel der unvershearten Wellenfront φ_1 und der vershearten Wellenfront φ_2 , wie in der Abbildung schematisch dargestellt. Es kann als Höhenlinienkarte gelesen werden entsprechend dem Gradienten der Messobjektform (s. auch Kapitel 2.5.d), d. h. die Wendepunkte der Objektform zeigen sich im vershearten Bild durch hohe Streifenordnungen. Bezogen auf die in dieser Arbeit fokussierten Speckle-Messtechniken wird für raue Messobjekte mit der ESPSI die Verzerrung als Messgröße erfasst (s. auch Kapitel 2.5.b).

Der optische Aufbau ist verglichen zur Holografie sehr kompakt, wodurch das Sensorgehäuse, als gestricheltes Rechteck in der Abbildung angedeutet, klein gestaltet werden kann. Eine innere Strahlführung, bzw. eine Einhausung des Lasers, ist nicht zwingend erforderlich. Die Pfaddifferenz der beiden Teilwellen in den beiden sog. Interferometerarmen (unterhalb und rechts vom Strahlteiler) ist sehr klein, wodurch bereits eine sehr geringe Kohärenzlänge des Lasers für die Interferometrie ausreicht. Zudem liegen die beiden Pfade nahe beieinander, was ungleichmäßige Störungen (vgl. Kapitel 2.6.e) auf nur einem der Pfade sehr unwahrscheinlich macht. Die Messung ist daher sehr viel robuster als die bei der Holografie.

Abbildung 2.18 stellt den out-of-plane (oop) Aufbau der Shearografie dar, d. h. es können Formgradienten in z-Richtung erfasst werden. Die weiteren Aufbaubedingungen sind analog zur Holografie, s. Kapitel 2.4.a.

Shearvektor

Durch die Verkipfung des Shear-Spiegels um den Shearwinkel entsteht ein Doppelbild auf der Kamera. Dieses besteht aus zwei Teilbildern entsprechend der vershearten und unvershearten Wellenfront, die lateral gegeneinander verschoben sind, s. Abbildung 2.19.

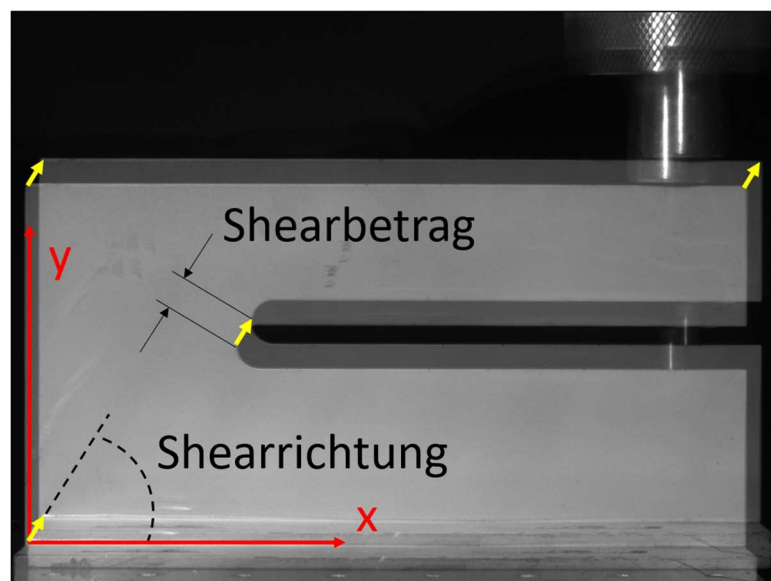


Abbildung 2.19: Versheartes Doppelbild eines Messobjektes (unversheart vgl. Abbildung 2.9 auf S. 21); Shearvektor in Gelb an diversen, eindeutigen Positionen aufgetragen; Shearrichtung mathematisch positiv als Winkel von der x-Achse ausgehend; der Shearbetrag ist die betragsmäßige Länge des Shearvektors.

Die Verschiebung jedes Bildpunktes wird beschrieben durch den sog. Shearvektor nach DIN 54180-1:2015 [14]. Dieser setzt sich zusammen aus dem Shearbetrag und der Shearrichtung. Der Shearbetrag ergibt sich durch einfache geometrische Bedingungen aus dem Abstand vom Shearspiegel zum Messobjekt und aus dem Shearwinkel. Die Shearrichtung wird nach DIN über den mathematisch positiven Winkel von der x-Achse ausgehend angegeben. In der Praxis sind die beiden Shearrichtungen 0° (x-Richtung) und 90° (y-Richtung) hinreichend für die meisten Anwendungsfälle. Dies wird in Kapitel 4.3.b umfangreich diskutiert. Dementsprechend wird im Rahmen dieser Arbeit, zugunsten des intuitiven Verständnisses, lediglich von der „Shearrichtung in x“ und der „Shearrichtung in y“ gesprochen. Hierbei wird das Symbol für den Shearbetrag einfach mit einem Index für die Shearrichtung versehen, δ_x bzw. δ_y . Der Einfluss und die Wichtigkeit des variablen Shearvektors im Rahmen der ZfP wird in Kapitel 4.1.a genauer erläutert.

Mechanik

Bei den optisch-interferometrischen Messtechniken werden relative Ergebnisse erfasst. Im vorliegenden Fall ergibt sich dies durch den Vergleich der *vershearten* Teilwellenfront mit der *unvershearten* Teilwellenfront. Im einfachsten Fall existiert über das gesamte Messobjekt eine lineare Abweichung der Form zwischen der vershearten und der unvershearten Stelle. Dies kann als relativer Ausgangsformgradient betrachtet werden. Eine Zu- oder Abnahme des lokalen Gradienten, verglichen zu diesem Ausgangsformgradienten, führt zum Ausschlag im shearografischen Messergebnis, wie in Abbildung 2.20 angedeutet.

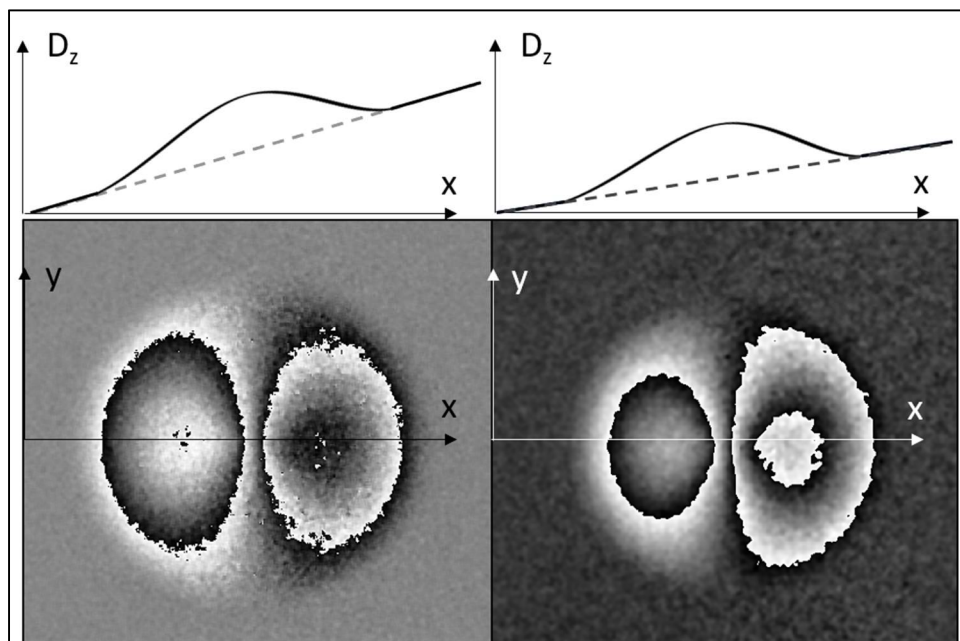


Abbildung 2.20: Abweichender globaler Ausgangsformgradient bei der oop Shearografie (untere Zeile) für dieselbe Messobjektform bei höherer (oben links) und geringerer (oben rechts) Neigung.

Diese Messgröße ist gleichbedeutend mit der Verzerrung, also der ersten Ableitung der Verformung, wie sie bei der Speckle-Shearografie, der ESPSI, gemessen wird (s. Kapitel 2.5.b). Die Verzerrung bzw.

der Verzerrungstensor ist bereits in Gleichung 2.13 enthalten. Genauer definiert ist er nach Gleichung 2.16 für kleine Verzerrungen³⁹ ([36] S. 15 f., [47] Kapitel 3).

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial \vec{x}} \approx \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.16.)$$

mit $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$, $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx}$ und $\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy}$

Mit

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ = Dehnungsanteile der Verzerrung

$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$ = Gleitungsanteile der Verzerrung (auch Schubverzerrungen genannt)

Mittels der geometrischen Betrachtungen, aufgeführt in ([35] Kapitel 3.2.3), ergibt sich daraus die allgemeine Grundgleichung für das shearografische Messergebnis⁴⁰ nach Gleichung 2.17.

$$N = \frac{\bar{\delta}_x}{\lambda} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \sin(\Theta_{xz}) + \frac{\partial w}{\partial x} (1 + \cos(\Theta_{xz})) \right] \quad (2.17.)$$

Mit

$\bar{\delta}_x$ = Shearbetrag in Richtung der x-Achse

Es ist leicht erkennbar, dass die Gleichung der holografischen Grundgleichung 2.14 sehr ähnlich ist. Die in der Gleichung enthaltenen Verzerrungsanteile ergeben sich aus der Geometrie des Aufbaus. Durch die Beleuchtungsebene, hier die xz-Ebene, ergeben sich die relevanten Parameter auf dem Bruchstrich der Verzerrungsanteile, hier u und w. Durch die Shearrichtung, hier in Richtung der x-Achse, ergibt sich der relevante Parameter unter dem Bruchstrich der Verzerrungsanteile, hier also x. Auf diese Weise können durch Variation des Aufbaus verschiedene mechanische Messgrößen erfasst werden (s. auch in-plane Aufbau). Ein Überblick findet sich am Ende dieses Kapitels 2.4.b.

Die Besonderheit der Shearografie gegenüber der Holografie ergibt sich zudem durch den Shearbetrag in der Gleichung oben. Die Betrachtung wird für den oop Aufbau mit $\Theta_{xz} = 0^\circ$ nach der einfacheren Gleichung 2.18 diskutiert.

$$N = \frac{2\bar{\delta}_x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.18.)$$

Das Messergebnis zeigt Phasenstreifen an, vgl. Abbildung 2.18. Die Streifenordnung N wird mittels Phasenschieben und Demodulation (s. Kapitel 2.5.a und 2.5.d) bestimmt. Die Streifen ergeben sich aus

³⁹ Auch *Ingenieursdehnung* genannt.

⁴⁰ Entsprechend dem Aufbau auf der xz-Ebene nach Abbildung 2.17.

dem Verzerrungsanteil über die Messfläche. Die Streifenbildung, bzw. der gewünschte Messausschlag, kann durch drei Faktoren verstärkt werden. Zum einen kann die Laserwellenlänge verkürzt werden, was praktisch nur begrenzt möglich ist (s. Kapitel 2.2.a). Zum anderen kann die Verformung der Oberfläche erhöht werden, was im Rahmen der ZfP ebenfalls nur in Grenzen sinnvoll ist (s. Kapitel 6). Schlussendlich dient die Erhöhung bzw. die Einstellung des Shearbetrags als ultimativer Sensitivitätsparameter bei der Shearografie. Der einzige Nachteil dabei ist der Messflächen-Verlust an den Messobjekträndern, wo es mit steigendem Shearbetrag keine Bildüberlappung von unvershearter und vershearter Wellenfront gibt (s. Kapitel 6.1.c). Zudem ist die Empfindlichkeitseinstellung der Messung mit dem Shearbetrag begrenzt, s. dazu Kapitel 2.6 und Kapitel 4.1.a.

In-plane Aufbau und Mechanik

An dieser Stelle wird der typische Aufbau für ip Shearografie nach dem aktuellen Stand der Technik [10] mit TPS vorgestellt. Bei dem Aufbau und der zugehörigen Messmethode zur Ermittlung der ip Verzerrungsanteile handelt es sich um eine entscheidende Weiterentwicklung der Shearografie durch Schuth im Jahre 1996 ([36] Kapitel 4.7.4). Damals zunächst für quantitative Messungen eingesetzt, gilt die Methode im Rahmen der ZfP als besonders geeignet zur hochgenauen Detektion von Rissen. Indikatoren für Risse finden sich vor allem durch anormale Muster in der ip Verzerrung eines Bauteils ([53] Kapitel 4.7.2). Hierzu ist sonst nur die digitale Bildkorrelation (DIC⁴¹) geeignet ([27] S. 1572 ff.), die jedoch aufgrund der notwendigen Probenvorbereitung sowie dem erhöhten Rechenaufwand nur bedingt einsatztauglich für eine Serienproduktion ist. Seither gibt es jedoch nur sehr wenige Veröffentlichungen zur shearografischen ip Messungen für die Rissdetektion ([54], [55], [56]). Teilweise werden *quasi*-in-plane Messungen durchgeführt. Das heißt mit dem oop Aufbau (s. oben) wird unter einem sehr großen Beleuchtungswinkel gemessen, teilweise auch unter nicht-oberflächennormaler Beobachtung. Dadurch erfasst die Messung sowohl oop als auch ip Verzerrungsanteile (vgl. Gleichung 2.17). Als ausschlaggebender Grund für diesen Missstand wird die eher schwierige Handhabung des Verfahrens und der höhere Zeit- und Gerätekostenaufwand vermutet, wie die folgenden Textabschnitte verdeutlichen. Der shearografische ip Messaufbau wird im Rahmen dieser Arbeit mittels SPS weiterentwickelt und der Verfahrensablauf stark vereinfacht, s. Kapitel 4.3.a. Die dadurch erzielbaren Ergebnisse im Rahmen der shearografischen Rissdetektion werden in Kapitel 7 vorgestellt.

Abbildung 2.21 zeigt schematisch den typischen Aufbau für ip Shearografie. Er unterscheidet sich lediglich durch die Strahlaufteilung des Lasers an einem zusätzlichen Strahlteiler und durch die beiden Lichtschranken vom oop Aufbau, vgl. zu Abbildung 2.18. Es werden zwei separate Messungen nacheinander aufgenommen unter dem gleichen, jedoch negierten Beleuchtungswinkel. Dazu wird jeweils die Lichtschranke 1 bzw. 2 geschlossen. Grundsätzlich ist auch eine Beleuchtung durch zwei separate Laserquellen möglich, die für die beiden Messungen jeweils abgeschattet werden müssen. Die beiden Messergebnisse ergeben sich nach der Grundgleichung 2.17 oben zu Gleichung 2.19.

⁴¹ Digital Image Correlation.

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

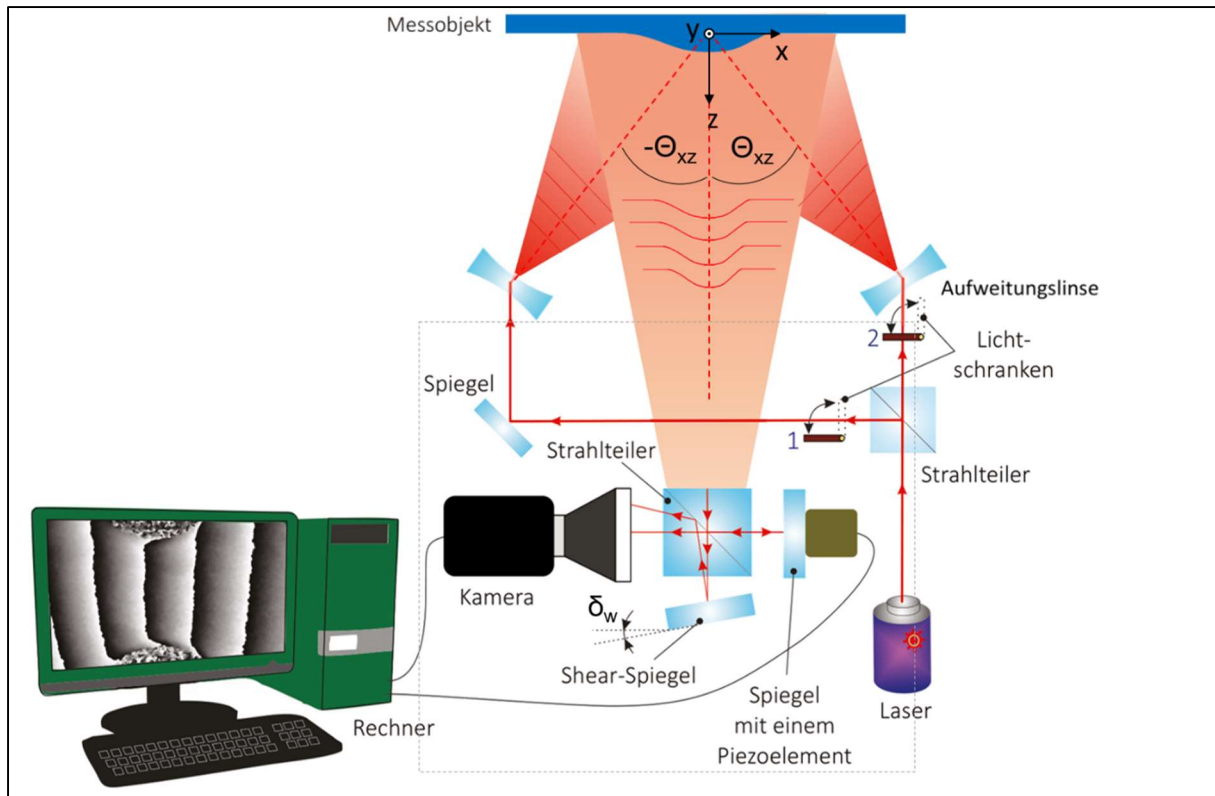


Abbildung 2.21: Typischer Messaufbau der in-plane Shearografie, zusammengestellt aus ([10] S. 464).

$$N_{+\Theta_{xz}} = \frac{\delta_x}{\lambda} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \sin(+\Theta_{xz}) + \frac{\partial w}{\partial x} (1 + \cos(+\Theta_{xz})) \right] \quad (2.19.)$$

$$N_{-\Theta_{xz}} = \frac{\delta_x}{\lambda} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \sin(-\Theta_{xz}) + \frac{\partial w}{\partial x} (1 + \cos(-\Theta_{xz})) \right]$$

Mit

$N_{+\Theta_{xz}}$ = Streifenordnung unter positivem Beleuchtungswinkel

$N_{-\Theta_{xz}}$ = Streifenordnung unter negativem Beleuchtungswinkel

Da die Cosinus-Funktion achsensymmetrisch und die Sinus-Funktion punktsymmetrisch ist, ist in beiden Messungen derselbe oop Anteil enthalten. Der ip Anteil ist jedoch unter negativer Beleuchtung negiert. Die beiden Messungen können am Rechner voneinander subtrahiert werden, wodurch der oop Anteil nach Gleichung 2.20 eliminiert wird. Der reine ip Anteil bleibt enthalten. Darüber hinaus eliminiert eine Addition der beiden Messung den ip Anteil.

$$N_{+\Theta_{xz}} - N_{-\Theta_{xz}} = N_{ip} = \frac{\delta_x}{\lambda} 2 \left[\frac{\partial u}{\partial x} \sin(\Theta_{xz}) \right] \quad (2.20.)$$

$$N_{+\Theta_{xz}} + N_{-\Theta_{xz}} = N_{oop} = \frac{\delta_x}{\lambda} 2 \left[\frac{\partial w}{\partial x} (1 + \cos(\Theta_{xz})) \right]$$

Mit

N_{ip} = Streifenordnung für den reinen ip Verzerrungsanteil

N_{oop} = Streifenordnung für den reinen oop Verzerrungsanteil

Auf diese Weise kann der reine ip Verzerrungsanteil sowie der reine oop Verzerrungsanteil mit der Shearografie erfasst werden. Der Nachteil zur einfachen oop Messung ist dabei vor allem der zusätzliche Zeitaufwand, der neben zeitabhängigen Störeinflüssen (s. Kapitel 2.6.e) gerade im Rahmen der ZfP mit aktiver Anregung Defizite mit sich bringt (s. Kapitel 6.2.c). Darüber hinaus ist eine Laserabschattungssteuerung nötig, die den Messaufbau und das Rechenprogramm aufwändiger macht.

Überblick erfassbarer mechanischer Messgrößen

Wie in den Kapiteln oben beschrieben, können verschiedene mechanische Messgrößen mit der Shearografie erfasst werden. Der Beleuchtungsvektor ist ausschlaggebend dafür, in welche Richtung sich eine Verkürzung des optischen Pfades in der Messung bemerkbar macht. Eine Beleuchtung auf der xz-Ebene ist sensitiv für u- und w-Verzerrungsanteile, eine Beleuchtung auf der yz-Ebene für v- und w-Verzerrungsanteile. Andere Beleuchtungsszenarien sind für die Auswertung in Reflexion nicht möglich. Die Shearrichtung ist ausschlaggebend dafür, in welche Richtung der Gradient betrachtet wird. Mittels x-Shear werden Verzerrungsanteile in x- und mittels y-Shear Verzerrungsanteile in y-Richtung erfasst. Ein z-Shear ist nicht möglich, da dazu Laserreflexionen vor bzw. hinter der Oberfläche beobachtet werden müssten, was optisch nicht realisierbar ist.

Mittels oop Aufbau können oop Verzerrungsanteile ausreichend genau erfasst werden (s. auch Kapitel 2.6.c), ip Verzerrungsanteile hingegen müssen mittels ip Aufbau erfasst werden. Alle mit der Shearografie vollständig messbaren Verzerrungsanteile sind im folgenden Verzerrungstensor **fettgedruckt** hervorgehoben.

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix}$$

2.4.c. Vergleich von Holografie und Shearografie für die ZfP

Wie bereits in den Kapiteln oben beschrieben, weist die Shearografie gegenüber der Holografie Vorteile auf. Die Sensitivität kann anhand des Shearbetrags angepasst werden, eine sehr kleine Laser-Kohärenzlänge zur Messung ist ausreichend und der Messaufbau ist robuster gegen Störeinflüsse, s. auch [57]. Hingegen sind die Nachteile der Shearografie gegenüber der Holografie überschaubar. Der Randbereich von Messobjekten kann nicht ohne weiteres ausgewertet werden, die Messempfindlichkeit ist geringer und das Messergebnis weniger intuitiv deutbar.

Darüber hinaus soll an der folgenden, einfachen Vergleichsmessung dargestellt werden, dass die Messgröße der Shearografie, die Verzerrung, für die ZfP allgemein besser geeignet ist als die Messgröße der Holografie, die Verformung. Abbildung 2.22 zeigt das Hologramm links bzw. das Shearogramm rechts

für ein zylindrisches, aufrechtstehendes Rohr mit zwei bekannten, innenliegenden Fehlstellen unter gleichhoher Innendruckbelastung.

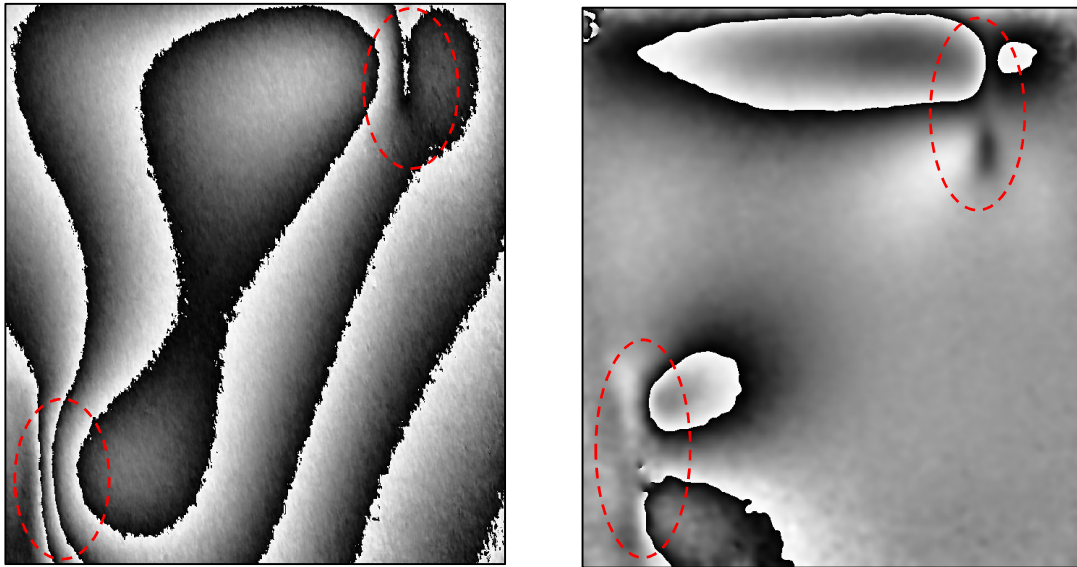


Abbildung 2.22: Optisch-interferometrische Messergebnisse für die Prüfung eines aufrechtstehenden Rohres mit zwei bekannten inneren Fehlstellen bei gleichhoher Innendruckbelastung; (links) Hologramm mit vielen irrelevanten Phasenstreifen; (rechts) Shearogramm bei y -Shearrichtung mit eindeutiger Fehlstellenanzeige; die Fehlstellen-Indikatoren sind rot umkreist. Die Bildergröße wurde aufeinander angepasst. Der Shearvektor verursacht typischerweise eine entsprechende Vergrößerung der Fehlstellen-Indikator Markierung, hier in y -Richtung.

Durch die Druckbelastung wächst das Rohr vor allem in seinem Umfang. Diese oop Verformung zeigt die Holografie durch viele mehr oder weniger vertikal verlaufende Phasenstreifen über das gesamte Bild an. Der shearografisch erfasste oop Verzerrungsanteil mit Gradient in y -Richtung, also in Richtung der Rohrachse, bleibt hierbei nahezu konstant. Im Bereich der innenliegenden Fehlstellen wächst das Rohr lokal etwas stärker in seinem Umfang, was zu zusätzlichen Phasenstreifen im Hologramm führt. Diese lokalen Abweichungen der Verformung führt erstmals zu Ausschlägen im Shearogramm. Es wird deutlich, dass das Shearogramm ausschließlich die Verzerrungsanomalien, verursacht durch die Fehlstellen, anzeigt, während das Hologramm bzgl. der ZfP zusätzlich unbedeutende Verformungsanteile beinhaltet. Diese nahezu ausschließliche „Fehlstellenanzeige“ der Shearografie, bedingt durch ihre Messgröße, ergibt sich für die meisten Einsatzfälle in der ZfP-Praxis und hat sich dadurch bewährt, s. auch ([24] Kapitel 5 Verfahrensvergleich).

Eines der eher wenigen Einsatzgebiete der Holografie für die ZfP sind beispielsweise Schwingungsformanalysen, bei der die hohe Messempfindlichkeit von Vorteil für extrem kleine Verformungen höherer Schwingungsmoden ist ([10] S. 311 ff.). Eine weitere Anwendung findet sich in ([28] S. 85 f.).

2.5. Signalverarbeitung

Seit schätzungsweise dem Jahr 1990 läuft die Datenerfassung bei der Holografie und Shearografie nicht mehr mittels photochemischer Prozedur, sondern durch Digitaltechnik am Rechner ab. Auf diese Weise wird eine moderne Signalverarbeitung möglich, die heutzutage nicht mehr ersetzbar ist. Die typischen Schritte mit Fokus auf die ZfP werden im Folgenden kurz dargestellt. Alle Schritte haben zum Ziel, die Evaluation der Daten durch einen Prüfer der ZfP einfacher und eindeutiger zu gestalten.

2.5.a. Phasenschieben zur Berechnung der Interferenzphase

Während ursprünglich die photochemischen Intensitätsstreifenbilder⁴² selbst zur Ergebnisanalyse herangezogen wurden, kommen heutzutage Phasenschiebeverfahren zum Einsatz. Diese liefern das Schlüsselement der optisch-interferometrischen Messung, die Interferenzphase. Sie ist unabhängig von sonstigen Einflüssen auf die Bildaufnahme. Alle bisher in dieser Arbeit gezeigten Messergebnisse sind (Interferenz-)Phasenbilder, da die visuelle Aussagekraft höher ist.

Zugrunde gelegt wird die in Kapitel 2.2.b aufgestellte allgemeine Interferometrie-Gleichung, hier nochmals beschrieben durch Gleichung 2.21.

$$I = I_0 (1 + \gamma \cos \Phi) \quad (2.21.)$$

Mit

- I = Intensität der Bildaufnahme (je Speckle)
- I_0 = Hintergrundintensität
- γ = Interferenzkontrast, auch Lasermodulation genannt
- Φ = Interferenzphase

Durch die Interferenzphasenberechnung wird die einfache Bildaufnahme umgewandelt in ein Phasenbild. Dieses ist frei vom Hintergrundlicht und der Lasermodulation, welche sonst örtlich variieren und zu Kontrastverlusten führen, vgl. Abbildung 2.23. Zusätzlich enthält die Interferenzphase die Richtungsinformation zu den Interferenzstreifen. Dies ist Voraussetzung für die spätere softwaregestützte Demodulation (s. Kapitel 2.5.d). Es muss jedoch beachtet werden, dass verglichen zur oben genannten Echtzeitanalyse ein gewisser Rechenaufwand notwendig ist, der neben einer höheren Rechenzeit zu erhöhten Störeinflüssen führen kann.

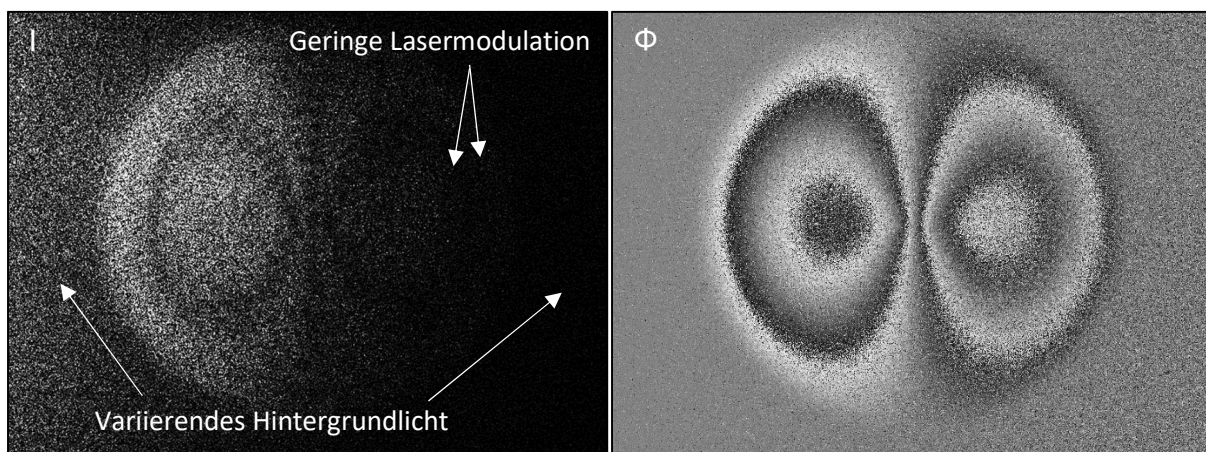


Abbildung 2.23: (Links) Interferenzbild, dessen Werte zur Kontraststeigerung bereits quadriert und die Bildhelligkeit zur besseren visuellen Darstellung erhöht wurde; (rechts) das mit Phasenschieben daraus gewonnene Interferenzphasenbild.

⁴² Siehe Additions- und Subtraktionsverfahren, auch Live- oder TV-Holografie bzw. TV-Shearografie genannt ([35] Kapitel 3.2).

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

Im Laufe der Zeit wurden diverse Phasenschiebeverfahren und -algorithmen entwickelt. Hierbei ist das sog. zeitliche Phasenschieben (TPS⁴³) die gängige Praxis ([10] S. 315). Konkret müssen über ein Gleichungssystem die drei Unbekannten aus der allgemeinen Interferometrie-Gleichung berechnet bzw. eliminiert werden, wozu mindestens drei zeitlich aufeinanderfolgende Bildaufnahmen nötig sind. Die sog. 4-bucket Methode für TPS findet weitläufig Anwendung, da sie durch Überbestimmung mittels zusätzlicher vierter Bildaufnahme die Berechnung bei moderatem Zusatzaufwand stabilisiert und eine gute Ergebnisqualität liefert ([41] S. 41). Beim TPS wird je Bildaufnahme eine der beiden Teilwellen im Interferometer typischerweise mit einer 90° Zusatzphase beaufschlagt. Dies geschieht durch eine sub-mikrometergenaue Spiegelverschiebung mittels elektro-mechanischem Piezoelement, wobei die optische Pfadlänge der Wellenfront verkürzt wird, vgl. Abbildung 2.21 S. 41. Die Berechnung⁴⁴ der Interferenzphase ergibt sich nach Gleichung 2.22, verbildlicht durch Abbildung 2.24.

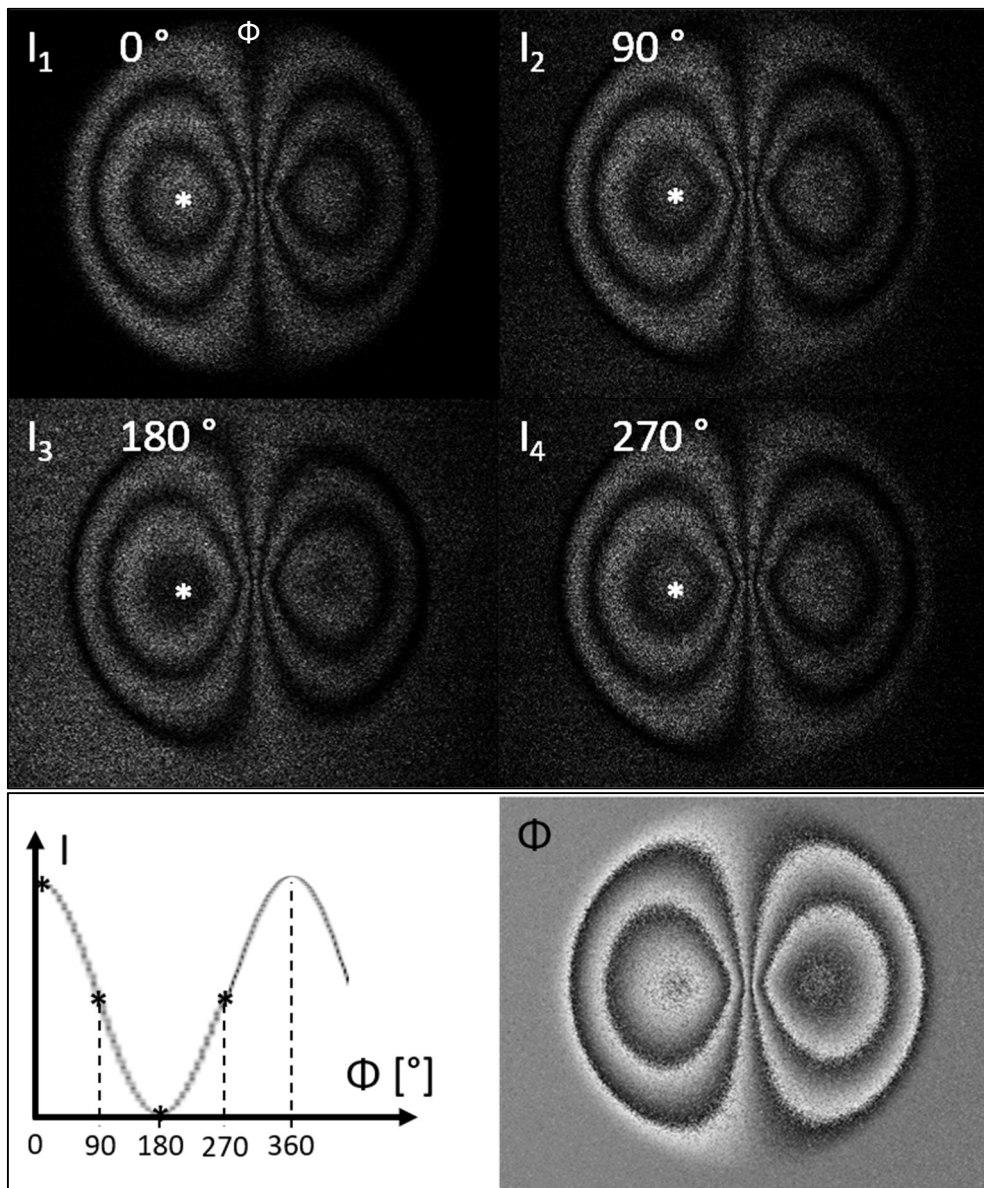


Abbildung 2.24: (Erste und zweite Zeile) vier Interferenzbildaufnahmen mit je um 90° verschobener Phase, verdeutlicht an der Intensität an einem Punkt über die Phasenschiebung (unten links); resultierendes Interferenzphasenbild (unten rechts).

⁴³ Temporal Phase Shift.

⁴⁴ Vollständige Ausformulierung in ([36] S. 155 f.).

$$\Phi = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (2.22.)$$

$$\text{mit } I_n = I_0(1 + \gamma \cos(\Phi + (1-n) \cdot 90^\circ)) \quad \text{für } n = 1, 2, 3, 4$$

Mit

I_1, I_2, I_3, I_4 = Intensität der Bildaufnahmen mit verschobener Interferenzphase (je Speckle)

n = Zählwert

Das Interferenzphasenbild wird bei der Holografie auch als *Hologramm*, bei der Shearografie auch als *Shearogramm* bezeichnet. Als Überbegriff wird auch vom sog. *Interferogramm* gesprochen.

Eine gängige Praxis bei der fortlaufenden Berechnung und Anzeige der Interferenzphase während der Messprozedur mit TPS ist es, die Interferenzphase je neuer Bilderfassung aus den letzten vier Bildaufnahmen zu berechnen, wie Gleichung 2.23 darstellt.

$$\Phi_1(I_1, I_2, I_3, I_4), \Phi_2(I_2, I_3, I_4, I_5), \Phi_3(I_3, I_4, I_5, I_6), \text{ usw.} \quad (2.23.)$$

Der Berechnungsalgorithmus zur Beaufschlagung der Zusatzphase ist dabei angepasst. Auf diese Weise wird die Anzeigegeschwindigkeit und damit die entsprechende Rückmeldung für den Prüfer verbessert, die im Folgenden genannte Störempfindlichkeit sinkt jedoch nicht.

Neben dem TPS existieren einige Verfahren und Algorithmen für das sog. räumliche Phasenschieben (SPS⁴⁵), bei dem die Interferenzphaseninformation aus lediglich einer einzigen Bildaufnahme gewonnen wird. Der Rechenaufwand ist dabei minimal, wodurch die Vorteile der Echtzeitanalyse mit der extrahierten Betrachtung der Interferenzphase einhergehen. Dies ist jedoch nur zu Lasten der Ergebnisqualität möglich. Zudem ergeben sich weitere bedeutende Nachteile für die Praxis. Von daher gilt SPS seither lediglich als Bestandteil der Forschung. Die Weiterentwicklung des SPS mit entsprechendem Messaufbau für die praktische Anwendung ist Kernthema dieser Arbeit (ab Kapitel 3).

Das Phasenschieben kann als Schlüsselement der optisch-interferometrischen Messtechnik für eine effiziente, quantitative Datenevaluation betrachtet werden. Die extrem hohe Sensitivität ist der entscheidende Vorteil dieser Messtechnik, der aber direkt gekoppelt ist an die entsprechend hohe Störempfindlichkeit, wodurch die praktische Einsatztauglichkeit begrenzt bleibt. Hauptgrund dieser Empfindlichkeit ist die Zeitdauer für die Erfassung der Bildaufnahmen beim TPS. Innerhalb dieser Zeit darf sich keiner der Messparameter ändern, damit der Phasenschiebealgorithmus nicht scheitert, was in der Praxis nur mit hohem Aufwand oder reduzierter Messdynamik realisierbar ist (s. auch Kapitel 2.6.e und 6.2.c). Bei einer Kamerataktzeit von 40 Hz beträgt die Zeitdauer somit ca. (4 Bilder / 40 Bilder pro Sekunde =) 0,1 s. Verglichen dazu läuft SPS innerhalb einer Bildaufnahme ab. Dabei ist die entscheidende Zeitdauer reduziert auf die Belichtungszeit der Aufnahme, welche z. T. nur 1 ms beträgt (somit 100-mal schneller). Weitere Erkenntnisse des Autors et al. zu diesem Thema finden sich in [58]. Ein Vergleich von TPS mit SPS findet sich in Kapitel 3.3.a.

⁴⁵ Spatial Phase Shift.

2.5.b. Berechnung der Differenzphase bei Speckle-Bildern

Eine Besonderheit für die Auswertung von Specklebildern ist, dass die Interferenzphase einer rauen Oberfläche allein keine bedeutende Aussage über den Messobjektzustand enthält, da sie die stochastische Verteilung der Speckle-Phasenlage wiedergibt. Stattdessen wird bei der optisch-interferometrischen ZfP typischerweise eine geringfügige, zielgerichtete Anregung des Messobjektes verursacht (s. Kapitel 6). Auf diese Weise ändert sich die Interferenzphase auf eine definierte Art und Weise entsprechend der Oberflächenverformung um eine Zusatzphase, wie durch Gleichung 2.24 dargestellt. Die Interferenzphasen im Grundzustand und im angeregten Zustand werden jeweils mittels Phasenschieben erfasst. Somit kann die Zusatzphase einfach nach Gleichung 2.25 berechnet werden. Abbildung 2.25 zeigt den Vorgang schematisch.

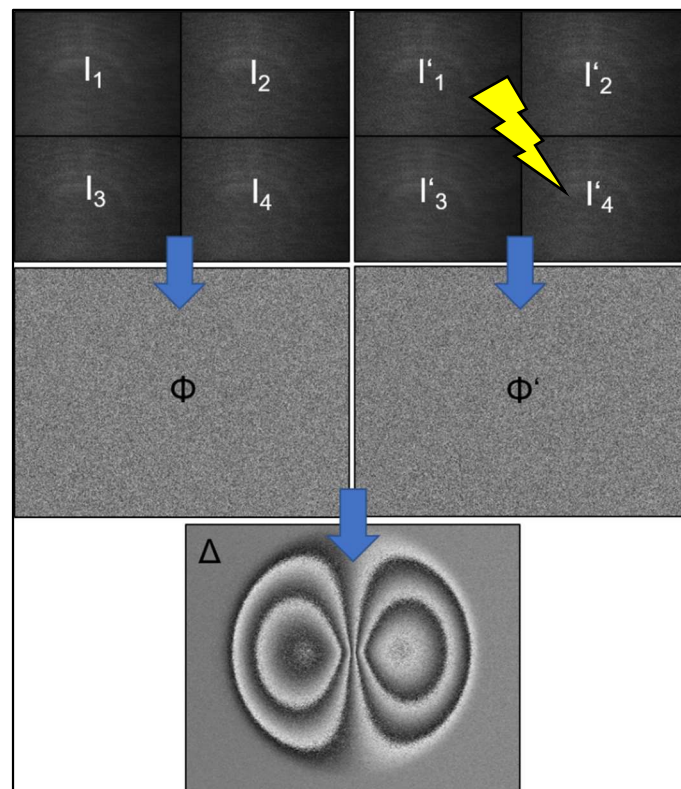


Abbildung 2.25: Ermittlung der Differenzphase Δ (unten) durch die beiden Speckle-Interferenzphasenbilder des Messobjektes im Grundzustand Φ und im angeregten Zustand Φ' (mittig), die jeweils durch 4 Intensitätsbildaufnahmen mit TPS berechnet wurden (oben); das Speckle-Interferenzphasenbild für eine raue Messobjekt-Oberfläche liefert selbst keine nützliche Information.

Diese Zusatzphase wird auch als Differenzphase, bei der Speckle-Holografie als Hologramm, bei der Speckle-Shearografie als Shearogramm, bezeichnet und zeigt die Verformung der Oberfläche durch die Anregung. Bei der ZfP wird das Ziel verfolgt, Fehlstellen durch lokale Verformungsanomalien zu identifizieren. Dazu sind demnach mit TPS typischerweise 8 Bildaufnahmen notwendig.

$$I' = I_0 (1 + \gamma \cos(\Phi + \Delta)) \quad (2.24.)$$

$$\text{mit } \Phi + \Delta = \Phi'$$

$$\Delta = \Phi' - \Phi$$

(2.25.)

Mit

I' = Bildaufnahme bei Messobjekt in angeregtem Zustand

Φ' = Interferenzphase bei Messobjekt in angeregtem Zustand

Δ = Zusatzphase durch die Messobjekt-Anregung, typischerweise *Differenzphase* genannt

2.5.c. Maskierung und Filterung

Die Shearogramm-Maskierung ist die Vorbereitung für eine zielführende, darauffolgende Filterung der Messdaten. Hierbei werden irrelevante Hintergrundbildbereiche, Bereiche mit starkem Rauschen, beispielsweise aufgrund von Belichtungsproblemen, und dekorrelierte Bereiche ausgeschnitten. Zu beachten ist, dass die Bildbereiche nicht einfach auf den Wert 0 gesetzt werden, da dieser Wert weiterhin einem Ergebnis im Interferogramm entspricht. Stattdessen müssen die Bereiche als NaN⁴⁶ deklariert werden, um von weiteren Berechnungen ausgeschlossen zu werden. Die Verarbeitung von Matrizen mit enthaltenen NaN-Werten erfordert meist erweiterte Berechnungscodes und einen höheren Rechenaufwand. Die Maskenbildung erfolgt meist von Hand in einer Software mit Rechteck-, Ellipsen- oder Polygonzug-Markierungen, wie Abbildung 2.26 zeigt. Darüber hinaus ist auch der Einsatz von Algorithmen zur Objekt-Kantenerkennung möglich.

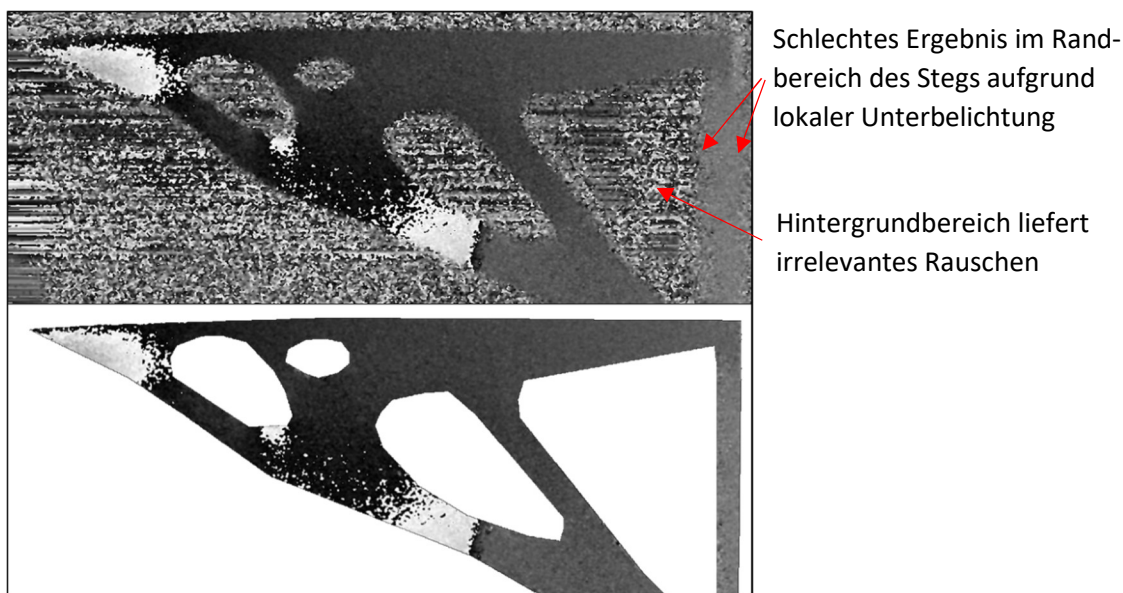


Abbildung 2.26: Interferogramm bei komplexer Messobjektgeometrie (oben) und zur Demodulation notwendige Maskierung, hier mittels Polygonzügen (unten); die maskierten Werte werden als NaN⁴⁶ behandelt und fließen damit nicht in weitere Berechnungen ein.

War die Maskierung erfolgreich, kann die Filterung der Messdaten erfolgen, ohne dass die Daten irrelevanter oder fehlerhafter Bereiche mit ins Ergebnis hineingefiltert werden. Ab diesem Datenverarbei-

⁴⁶ „Not A Number“, dt.: „keine Zahl“.

tungsschritt ist zu beachten, dass die ursprünglichen Messdaten nun verändert werden. Dieser Vorgang muss wohl überlegt erfolgen mit dem Ziel, das Optimum zwischen Veränderung und effizienter Weiterverarbeitung zu erreichen (s. auch Kapitel 2.6.a). Dabei ist die Filterung die Vorbereitung für eine zielführende, darauffolgende Demodulation der Messdaten. Der Fokus bei der Filterung liegt darauf, das hochfrequente Rauschen im Interferogramm zu eliminieren, wie Abbildung 2.27 zeigt. Zudem müssen die scharfen Kanten der Phasensprünge, auch Sägezähne genannt, sauber herausgearbeitet⁴⁷ werden.

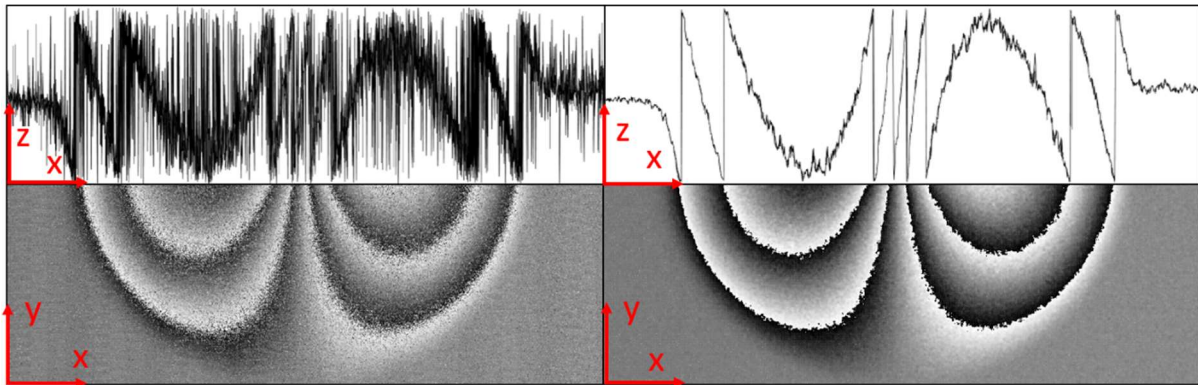


Abbildung 2.27: Das gemessene Interferogramm (unten links) und Querschnittsprofil (oben links) enthält hochfrequentes Rauschen, welches durch einfache Mittelwert-Tiefpassfilterung eliminiert werden kann (oben rechts). Auf diese Weise ergibt sich ein Interferogramm mit „weichen“ Übergängen und scharfen Kanten (unten rechts).

Typische Filterarten sind der Mittelwert-Filter und der nichtlinear arbeitende Median-Filter ([35] S. 86 ff.). Letzterer ist oftmals gewinnbringender, jedoch mit höherem Rechenaufwand verbunden. Typische Filterkerngrößen⁴⁸ sind in der Regel 3x3 Matrizen bis hin zu groben 10x10 Matrizen bei stark verrauschten Ergebnissen. Diese werden oft in bis zu 10 Iterationen von klein nach groß hintereinander angewendet. Eine Besonderheit, die hier kurz erwähnt werden soll, ist die Notwendigkeit von nicht-quadratischen Filterkernen beim räumlichen Phasenschieben mit Trägerfrequenz. ([35] S. 91 ff.) nennt hier die einmalige Anwendung eines 6x3 Filterkerns als erste Filterstufe zur Begradigung horizontal gebeugter Speckles. Dies wird auch in der hier vorliegenden Arbeit angewendet, je nach Auslegung des Trägerfrequenzspektrums im FFT Amplitudenbild auch mit stärkerer Asymmetrie, s. Kapitel 4.1.c und 4.3.c. Bezüglich weiterer Möglichkeiten der Interferogramm-Filterung, z. B. mittels Kantenerkennung, sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [59].

2.5.d. Demodulation

Das Interferogramm weist prinzipbedingt Phasensprünge beim Phasenübergang von 359° (weiß) zu 0° (schwarz) Phasenlage und umgekehrt auf. Mittels Demodulationsalgorithmus, auch *unwrapping* (dt.: entfalten) genannt, können diese Sprünge eliminiert und ein stetiger Datensatz berechnet werden.

⁴⁷ Zerlegung des Interferogramms in einen Sinus- und Cosinus-Anteil, welche keine Kanten enthalten, dann Filterung und erneute Zusammensetzung mittels Tangens-Funktion; Details s. ([41] Kapitel 4.1).

⁴⁸ Bezeichnung für die Größe der Matrix, die für die Berechnung herangezogen wird; Angabe in der Dimension [Pixel]; der Filterkern wird pixelhaft nach und nach über das gesamte Bild verschoben.

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

Hierzu werden die Phasensprünge unter Beachtung ihrer Richtung „durchgezählt“ und so die Streifenordnung ermittelt. Den einfachen Zusammenhang zwischen Interferogramm mit Sprüngen und demoduliertem Interferogramm liefert Gleichung 2.26⁴⁹ ([35] S. 94).

$$\Delta'_{(x,y)} = \Delta_{(x,y)} + 2\pi N_{(x,y)} \quad (2.26.)$$

Mit

$\Delta'_{(x,y)}$ = Phasenwert an einem Bildpunkt (x,y) im demodulierten Interferogramm

$\Delta_{(x,y)}$ = Phasenwert an einem Bildpunkt (x,y) im Interferogramm mit Phasensprüngen

N = Streifenordnung an einem Bildpunkt (x,y) im Interferogramm mit Phasensprüngen

Das demodulierte Interferogramm kann nun in die holografische oop Grundgleichung 2.27, die shearografische oop Grundgleichung 2.28 und die shearografische ip Grundgleichung 2.29 eingearbeitet werden (vgl. Kapitel 2.4).

$$\frac{\Delta'}{2\pi} = N = \frac{2}{\lambda} D_w \quad (2.27.)$$

$$\frac{\Delta'}{2\pi} = N = \frac{2\delta_x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.28.)$$

$$\frac{\Delta'}{2\pi} = N_{ip} = \frac{2\delta_x}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial x} \sin(\Theta_{xz}) \quad (2.29.)$$

Durch Umstellen ergibt sich die Verknüpfung aus aufbereitetem Messergebnis und den physikalischen Verformungswerten für die oop Holografie, Gleichung 2.30, die oop Shearografie, Gleichung 2.31, und die ip Shearografie, Gleichung 2.32. Abbildung 2.28 stellt den Vorgang der Demodulation und die Zählung der Phasensprünge schematisch dar. Es sei angemerkt, dass der Ausdruck „Verformung“ im Folgenden als Überbegriff für die unterschiedlich erfassbaren, spezifischen Verformungsanteile bzw. Verzerrungsanteile verwendet wird. Der Ausdruck wird einfachheitshalber dann verwendet, wenn die erläuterte Methodik für alle Anteile gleichwertig gilt.

$$\boxed{D_w = \frac{\Delta' \lambda}{4\pi}} \quad (2.30.)$$

$$\boxed{\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta' \lambda}{4\pi \delta_x}} \quad (2.31.)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\Delta' \lambda}{4\pi \delta_x \sin(\Theta_{xz})} \quad (2.32.)$$

⁴⁹ Hier für Speckle-Differenzphasenbilder; analog für Interferenzphasenbilder.

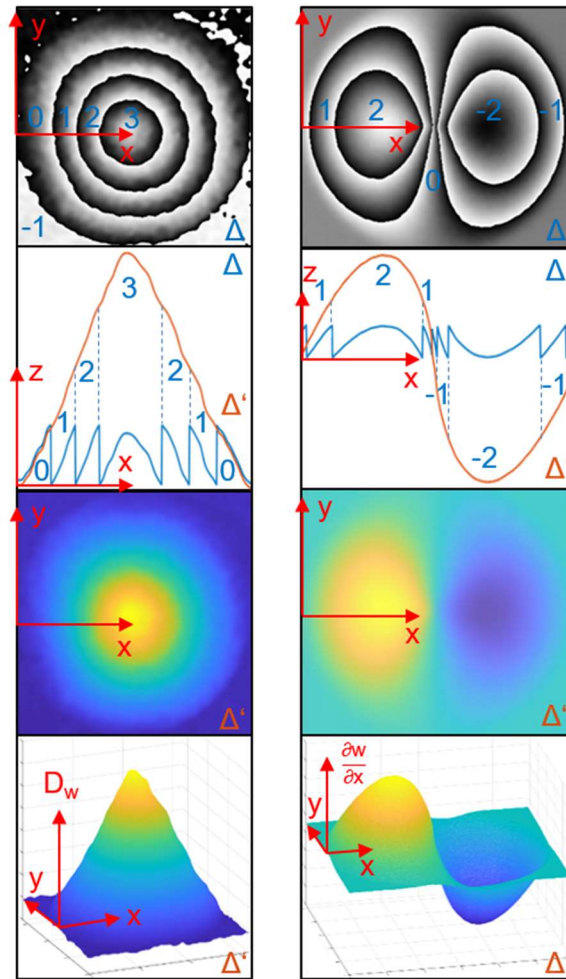


Abbildung 2.28: Zusammensetzung der Phasensprünge entsprechend der Streifenordnung bei der Demodulation schematisch, linke Spalte für ein Hologramm, rechte Spalte für ein Shearogramm, wie in der oberen Zeile dargestellt (die blauen Zahlen zeigen die Streifenordnung an der entsprechenden Stelle an); die zweite Zeile zeigt das Querschnittsprofil für das Interferogramm mit Phasensprüngen (blauer Sägezahnverlauf) und für das demodulierte Interferogramm (braune Kurve). Die dritte Zeile zeigt die Verformung farbcodiert; die letzte Zeile zeigt die Verformung als rotierte 3D Grafik.

Zur Demodulation wurden seither verschiedenste Methoden und Algorithmen entwickelt, nähere Informationen finden sich in der einschlägigen Literatur ([60], [23] S. 483 ff.). An dieser Stelle sei die Demodulation lediglich als angewandtes Instrument zum Gebrauch innerhalb dieser Arbeit beschrieben. Übergreifend steigt die Effizienz der Berechnung mit dem entsprechend betriebenen Aufwand. Während örtlich-eindimensionale (1D) Berechnungen innerhalb von Millisekunden zeilen- oder spaltenhaft ablaufen und äußerst fehleranfällig bei verrauschten Datensätzen sind, existieren auch robuste, zeitlich-arbeitende 3D Berechnungen. Diese bewerten die Phasensprünge über einen Bilderstapel pixelweise, was z. T. mehrere Minuten Rechenzeit einnimmt. Ein Bilderstapel besteht dabei aus mehreren, zeitlich hintereinander aufgenommen Interferogrammen. Als Optimum zwischen Robustheit und Rechenzeit wird im Folgenden die örtlich-arbeitende 2D Demodulationsmethode von Ghiglia und Romero [61] verwendet, die mittels lateraler Residuenbetrachtung im Interferogramm innerhalb von ca. 1 Sekunde⁵⁰ ausreichend gute Ergebnisse liefert, vgl. auch ([35] S. 95 ff., [37] S. 407 f.). Hierbei wird der Algorithmus von Muhammad F. Kasim⁵¹ [62] und der langsamere von Herraiez et al. [63] für Interferogramme mit NaN-Werten verwendet.

⁵⁰ Für typische, innerhalb der Arbeit vorhandener Parameter.

⁵¹ University of Oxford, 2016.

Bei der Methode ist zu beachten, dass für die Demodulation scharfkantige Phasensprünge und ggf. geschlossene Phasenringe vorliegen. Andernfalls kommt es ab gewissen Grenzen zu Demodulationsfehlern. Abbildung 2.29 zeigt das Phänomen, welches hier zumindest visuell leicht auffindbar ist. Hingegen gibt es auch kritischere Demodulationsfehler, die lediglich mittels Kalibrierversuch aufgefunden werden können.

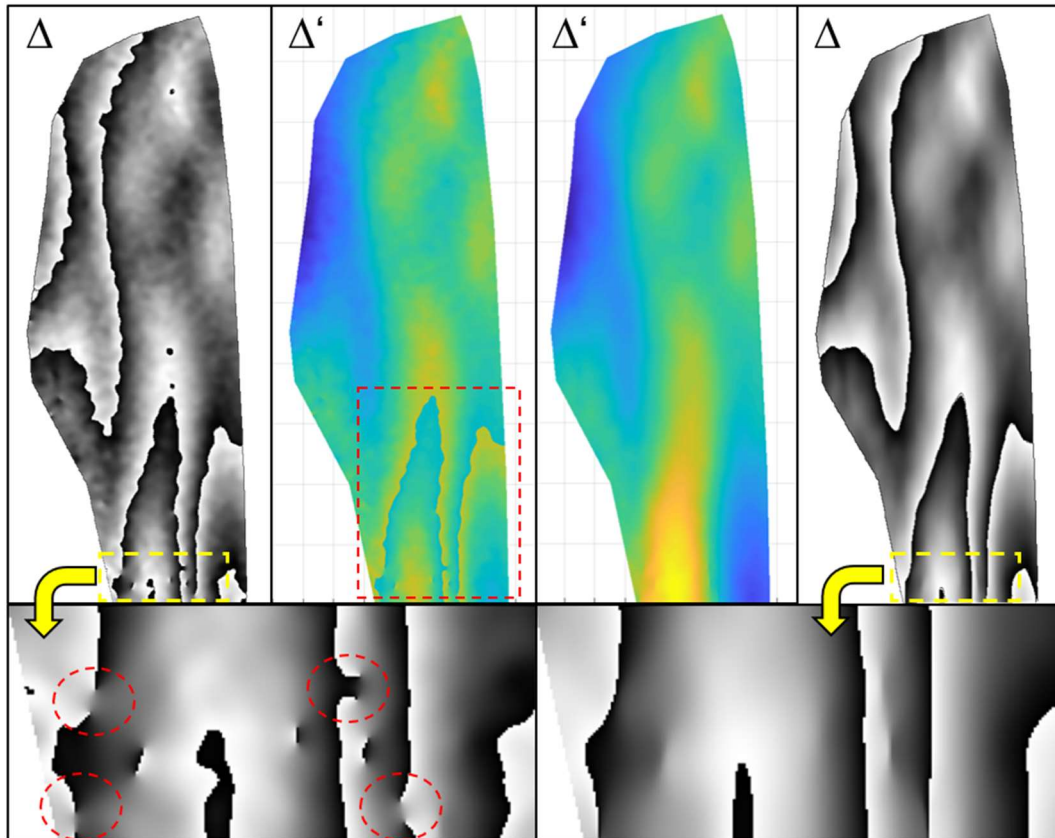


Abbildung 2.29: Interferogramm oben links weist im unteren Bereich (gelbes Rechteck) lokal geöffnete Phasensprünge auf (rot umkreist), wodurch die Demodulation mittig links für die untere Bildhälfte (rotes Rechteck) fehlerhaft ist (erkennbar an den unstetigen Werten, wo der Algorithmus die Streifenordnung fälschlicherweise nicht ändert); für das stärker gefilterte Interferogramm oben rechts tritt der Fehler nicht auf (die Farbcodierung für die Werte beider Verformungsbilder ist gleich).

Darstellung und Interpretation

Da die Evaluation der shearografischen Messwerte seither nur in den seltensten Fällen automatisiert abläuft, ist ein intuitiver Umgang mit den Ergebnissen weiterhin entscheidend für die Bewertung durch einen Prüfer. Während die Demodulation die physikalischen Werte liefert und damit beispielsweise automatische Grenzwertanalysen möglich macht, erleichtert sie gleichzeitig das intuitive Verständnis zu den erfassten Daten. Oftmals sind geschulte Prüfer bereits anhand des Shearogramms in der Lage, Fehlstellenindikatoren aufzuspüren und zu analysieren. Das bei kreisförmigen Fehlstellen typischerweise auftretende sog. Schmetterlingsmuster (s. auch Abbildung 2.28) kann jedoch nur sicher gefunden werden, wenn die globale Phasenstreifenstruktur nicht zu komplex ist. In dem Falle ist das demodulierte Verformungsbild das bessere Mittel zur Entscheidung, wie Abbildung 2.30 zeigt. Eine Frage der Darstellung ist die Wahl des Farbmaßstabes der Verformungsbilder. Die Anzeige in Farben nutzt das Farbumscheidungsvermögen des Menschen, wodurch die Tiefenauflösung besser erkannt werden kann. Intuitiver kann jedoch auch die Darstellung des Demodulationsbildes als Grauwertbild sein.

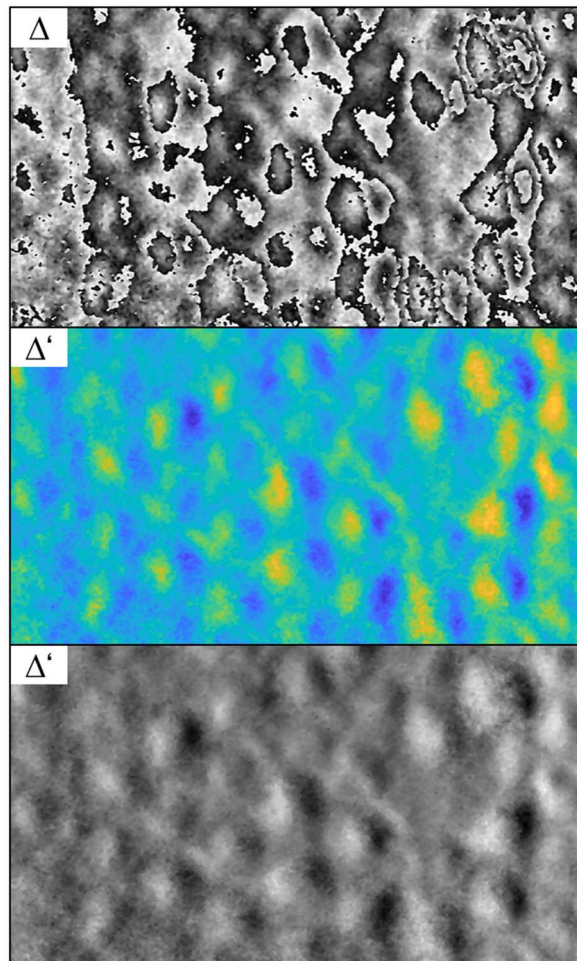


Abbildung 2.30: Demodulation eines Shearogramms oben mit komplexer globaler Streifenverteilung führt zu einem einfacher interpretierbaren Verformungsergebnis, mittig farbcodiert für ein intuitives Verständnis für lokale Extremwerte, unten als Grauwertbild für ein intuitives Verständnis der globalen Verformungen; das Messobjekt ist ein Wabenbauteil.

Verglichen zur Holografie, welche die Verformung des Messobjektes direkt anzeigt, ist das Verständnis für die erste Ableitung der Verformung bei der Shearografie mit ihrem Hoch- und Tiefpunkt schwieriger. Hier bietet die Grauwertansicht einen einfachen Zugang, welcher im Rahmen dieser Arbeit kurz aufgezeigt wird. Wird die Prüfplatte nach Abbildung 2.31 oben links vorderseitig mittels Wärmefront belastet, treten aufgrund der eingeschränkten Wärmeleitung im Bereich der rückseitigen Nuten Wärmespitzen auf. Diese führen zu einer lokal höheren Wärmedehnung und damit lokal höheren Verformung, die an der Vorderseite sichtbar wird. Diese Verformung ist als überdimensionierte Form in Abbildung 2.31 oben rechts dargestellt. Die Verformung kann auch mittels Shearografie gemessen werden. Das entsprechende demodulierte Shearogramm beim Erfassen der Verformung mit Shear in x-Richtung zeigt Abbildung 2.31 unten links. Das gleiche Bild entsteht, wenn die Form selbst mit parallelem Licht aus der (negativen) x-Richtung beleuchtet, s. Abbildung 2.31 unten rechts. Das shearografische Verformungsbild kann daher auch als Lichtreflexion an der sich einstellenden Verformung bei Beleuchtung aus der (negativen) Shearrichtung gedeutet werden. Dabei entsprechen die weißen Hochpunkte den Bereichen vor einem Verformungsberg, die schwarzen Tiefpunkte den Schattenbereichen hinter dem Berg. Zudem wird hier bereits deutlich, dass die „künstliche Fehlstelle“ mit Shear in x-Richtung schlecht erfasst werden kann. Diese Problematik wird im Kapitel 4.3.b weiter behandelt.

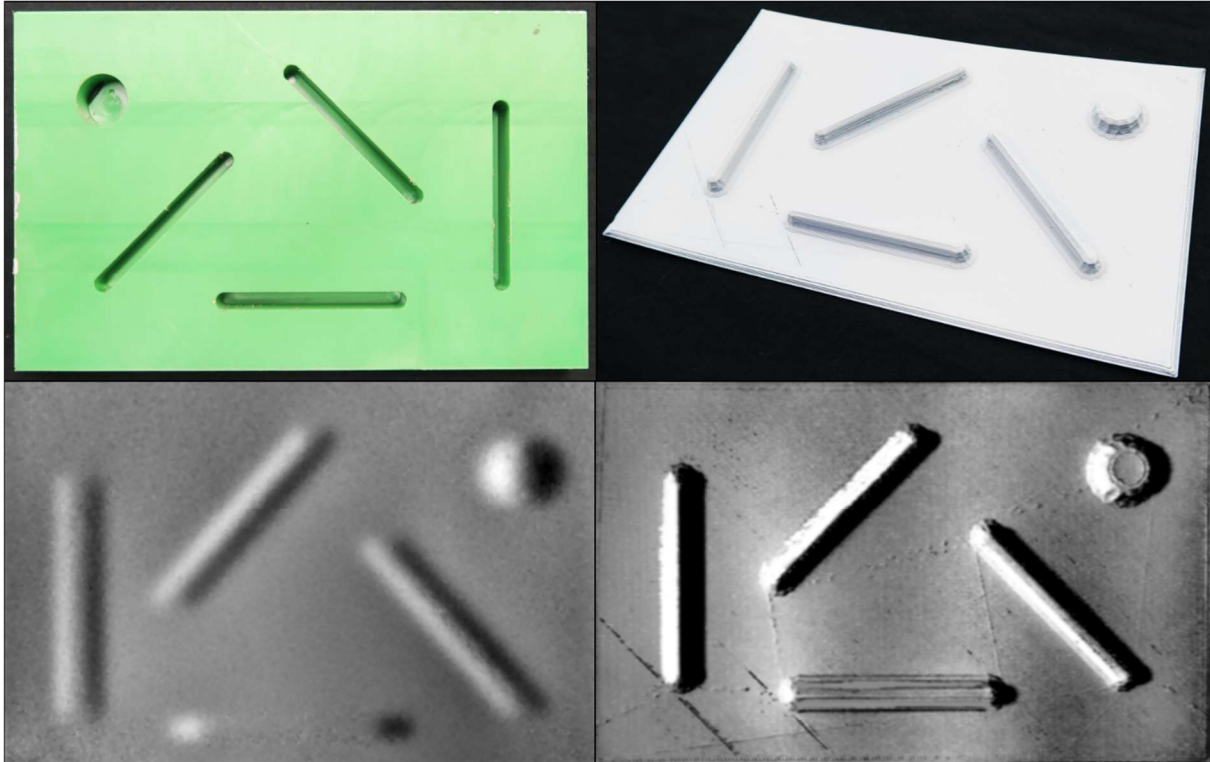


Abbildung 2.31: Rückseite einer Prüfplatte mit diversen Nuten als „künstliche Fehlstellen“, oben links; bei vorderseitiger Erwärmung beschränken diese Nuten den Wärmeabfluss ins Bauteilinnere, woraufhin sich lokal Wärmespitzen bilden und zur erhöhten Wärmedehnung führen. Die dabei auftretende Verformung ist als überdimensioniertes Formteil dargestellt, oben rechts. Die demodulierte Verformung bei der shearografischen Messung der Vorderseite der Prüfplatte beim Erwärmen (Shear in x-Richtung), unten links; diese entspricht in etwa dem Intensitätsbild bei einer annähernd horizontalen Beleuchtung der Form in der Shearrichtung, unten rechts.

Wie erwähnt soll dieser Vergleich lediglich dem intuitiven Verständnis zur Shearografie dienen. Innerhalb der Arbeit wird, je nach passenderer Darstellung, sowohl der Farb- als auch der Grauwertmaßstab bei den Demodulationsergebnissen verwendet.

Abschließen sei erwähnt, dass die Demodulationsergebnisse der Shearografie und Holografie mittels Integration bzw. Derivation ineinander umgerechnet werden können. Bezüglich der Anwendung in der ZfP liefert dies jedoch keinen entscheidenden Informationsgewinn.

2.5.e. Trendbereinigung

Bei der shearografischen Prüfung soll die Objektanregung normalerweise lokale Verformungsanomalien hervorrufen, welche Indikatoren für Fehlstellen sind. Hierbei wird typischerweise jedoch oft auch eine globale Verformung in Shearrichtung hervorgerufen, beispielsweise durch einseitige, nicht-oberflächennormale Wärmeanregung. Die globale Verformung ist für die Prüfung irrelevant und setzt die Fehlstellensichtbarkeit im Shearogramm herab. In diesen Fällen wird nach der Demodulation eine Trendbereinigung vorgenommen, wie Abbildung 2.32 zeigt. Dazu reicht die globale Subtraktion einer linearen, oder auch parabelförmigen Steigung oftmals aus.

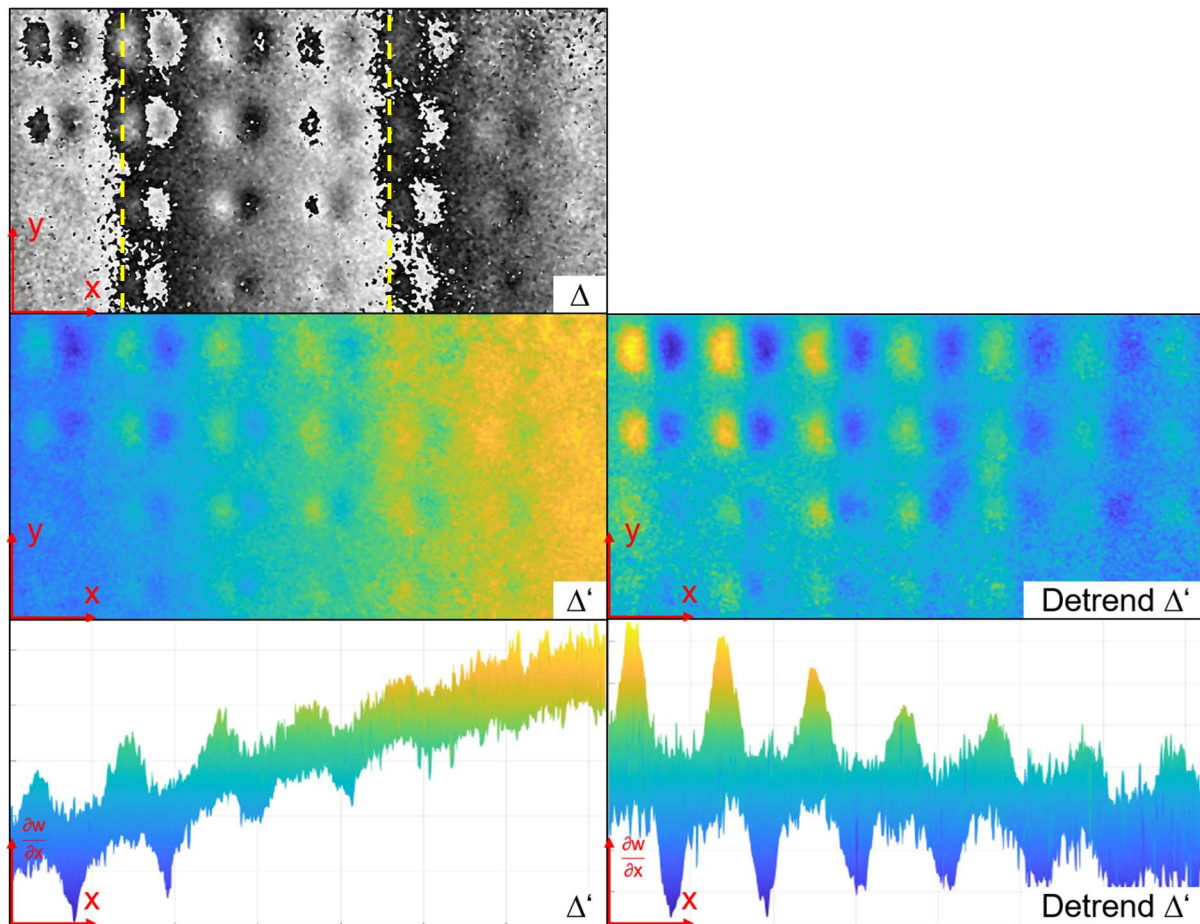


Abbildung 2.32: Shearogramm (Shear in x-Richtung) mit lokalen Phasenstreifen-Anomalien und zwei globalen, vertikal verlaufenden Streifen (gelb gestrichelt angedeutet) oben links; demoduliertes Verformungsbild mittig links und unten links zeigt vor allem den globalen Trend der Verformung an; trendbereinigtes demoduliertes Verformungsbild mittig rechts und unten rechts zeigt vor allem die lokalen Extrema der Verformung an.

Im Endeffekt kann jegliches Trendprofil vom Demodulationsbild abgezogen werden. Gerade im Fall von 3D geformten Messobjekten in der Serienüberwachung bietet sich der Abzug des komplexer ausfallenden Verformungsprofils eines intakten Messobjektes an (s. Kapitel 8.2.c). Dies kann auch bereits im Shearogramm durch Abzug eines „Intakt-Shearogramms“ erfolgen. Etwas zeitaufwändiger ist eine lokale Bereinigung durch Anwendung von Fensterfunktionen über viele Bildausschnitte, was hier jedoch nicht weiter behandelt wird.

Abschließend sei angemerkt, dass globale Verformungstrends bei der Anregung auch durch geschickte Verfahren bereits bei der Messung umgangen werden können, was die Qualität des Messergebnisses⁵² von vorne herein steigert, s. dazu Kapitel 6.2.c *dual-burst*.

2.5.f. Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)

Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR⁵³) bei der optisch-interferometrischen ZfP ist ein Qualitätskriterium für die Güte eines Ergebnisses. Es ist ein Maß für die Glaubwürdigkeit eines Indikators im Messergebnis

⁵² Siehe auch nächstes Kapitel.

⁵³ Signal-to-Noise Ratio.

hinsichtlich des tatsächlichen Vorhandenseins einer Fehlstelle im Messobjekt. Das SNR kann im Interferogramm aufgrund der Phasensprünge nur bedingt definiert werden. Bei der praktischen Evaluation durch einen Prüfer wird sich z. T. alternativ auch auf die maximale Streifenordnung bezogen ([64], [65]), vgl. auch Abbildung 2.28 oben. Jedoch ist dies für komplexere Ergebnisse und vor allem bei automatisierter Auswertung nur mit hohem Aufwand und reduzierter Sicherheit möglich (s. auch Kapitel 8.1.b). Stattdessen kann das SNR eindeutig anhand des Demodulationsergebnisses bestimmt werden, wie in Abbildung 2.33 dargestellt. Menner ([24] S. 107 f.) definiert das SNR für die Shearografie nach Gleichung 2.33.

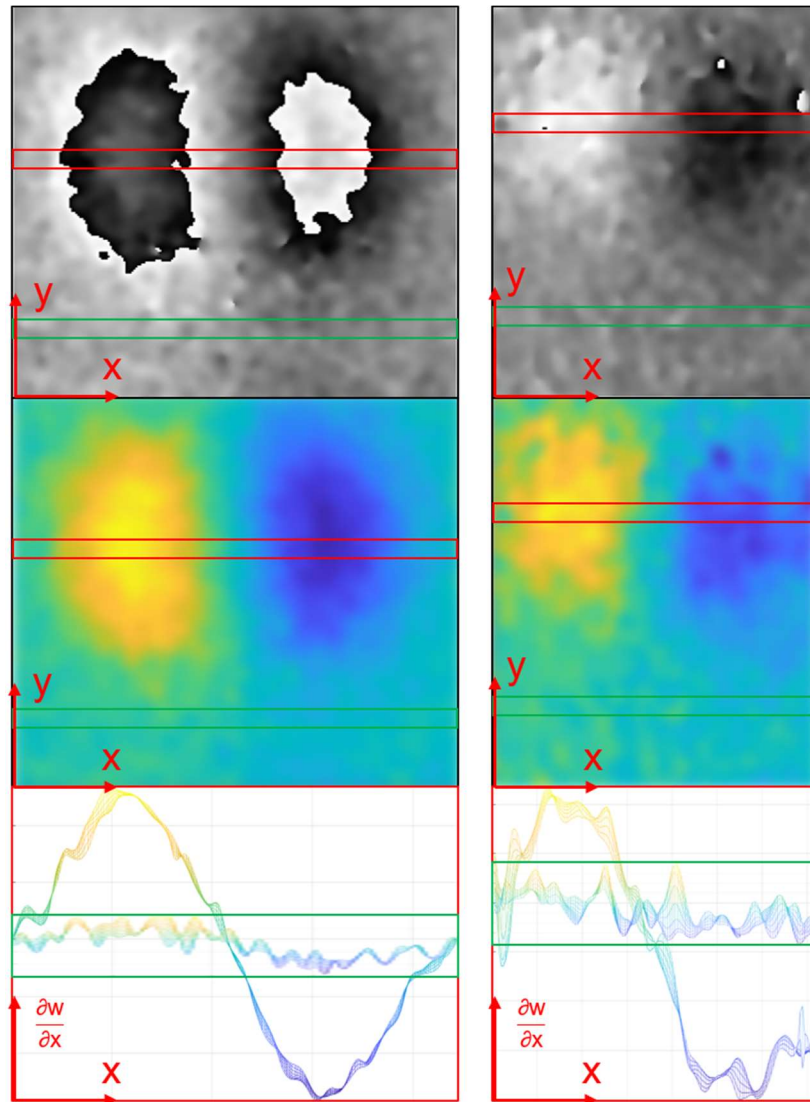


Abbildung 2.33: SNR-Bestimmung für zwei Shearogramme mit unterschiedlich starkem Fehlstellen-Indikator entsprechend der Phasensprungordnung des Schmetterlingsmusters; ein Phasensprung oben links, kein Phasensprung oben rechts; der Bereich des höchsten Fehlstellen-Signals (rot umrandet) im demodulierten Verformungsbild mittig links und rechts wird einem entsprechenden intakten Bereichs mit messbedingtem Rauschen (grün umrandet) gegenübergestellt. Ausschlaggebend für das SNR sind die durch das Signal und das Rauschen hervorgerufenen Verformungshöhen. SNR des Indikators der linken Zeile ist ca. 3, SNR der rechten Zeile ca. 2; Berechnung s. Gleichung 2.33.

$$\text{SNR} = \frac{A_S}{\sigma_{\text{Std}}} \quad (2.33.)$$

Mit

SNR = Signal-Rausch-Verhältnis

A_s = Signalamplitude / halbe Höhe des maximalen Verformungsunterschieds im Bereich des Fehlstellenindikators

σ_{Std} = Rauschen / Standardabweichung eines intakten Bereichs gleich großer Fläche wie der Signalbereich

Ein SNR vom Wert 1 bedeutet demnach, dass das Rauschen gleichhoch dem Signal ist, wodurch ein Indikator als nicht glaubwürdig bewertet würde. Ab einem SNR-Wert von mindestens 2 wird eine sichere Datenevaluation erst interessant. Alle in diesem Kapitel 2.5 aufgezeigten Datenverarbeitungsschritte beeinflussen das SNR sehr stark. Wie bereits bei der Filterung oben beschrieben, muss hierzu aktiv und oft individuell zum Messversuch darauf geachtet werden, dass das SNR zum Positiven und vor allem realistisch beeinflusst wird. Weiterhin hat der praxisorientierte Messablauf inkl. der Wahl der passenden Objektanregung selbst zunächst den höchsten Einfluss auf das Auftreten eines Fehlstellenindikators (s. auch Kapitel 6.1), der dann mittels SNR quantifiziert werden kann.

2.6. Messparameter und Störeinflüsse

In diesem Kapitel werden Gesetzmäßigkeiten, einfache Berechnungen und Betrachtungen zu Parametereinflüssen bzgl. der Messspezifikationen der Shearografie aufgezeigt. Demgegenüber stehen die Störeinflüsse, die zum Großteil verantwortlich für den Unterschied zwischen den theoretisch und praktisch erreichbaren Messergebnissen sind. DIN 1319-1 [66] regelt die Termini, die in den folgenden Kapiteln aufgegriffen werden. Die Thematik wird nicht bis ins Detail ausgearbeitet. Stattdessen wird eine erste theoretische Einführung in den Einsatzbereich, die Einsatzgrenzen und die allgemeine Handhabung dieser Messtechnik aufgezeigt. Auf weiterführende Quellen wird im Text verwiesen. Dieser einfach-theoretischen Betrachtung gegenübergestellt sind die anwendungsorientierten Informationen und Beispielversuche in Kapitel 6 und Kapitel 7 mit Fokus auf die ZfP. Dort wird auch die kleinste, mit Shearografie detektierbare Fehlstellengröße diskutiert, welche für die ZfP vor allem von Interesse ist. Sie ist jedoch nochmals von vielen weiteren, spezielleren Parametern abhängig.

2.6.a. Messauflösung

Das wohl interessanteste Kriterium bei der Wahl eines Messverfahrens für eine Messaufgabe ist, neben seinem Messprinzip, die Messauflösung⁵⁴. Bei den optischen Messverfahren wird diese in Tiefenauflösung und laterale Auflösung unterteilt.

Tiefenauflösung

Im Falle der Speckle-Interferometrie sagt die Tiefenauflösung aus, welche kleinsten Verformungsänderungen das Messgerät registrieren kann. Diese Betrachtung sei zunächst für den einfachen Fall der

⁵⁴ ([66] S. 25): „Auflösung: Angabe zur quantitativen Erfassung des Merkmals eines Messgerätes, zwischen nahe beieinanderliegenden Messwerten [...] eindeutig zu unterscheiden.“

oop ESPI geführt. Die holografische oop Grundgleichung 2.34 (s. auch Kapitel 2.4.a) besagt, dass die Änderung direkt von der eingesetzten Laserwellenlänge abhängt.

$$D_w = \frac{N\lambda}{2} \quad (2.34.)$$

In dieser Arbeit werden dazu bereits moderne blaue Laserdioden mit einer geringen Wellenlänge von nur 450 nm verwendet. Die Phasenänderung eines entsprechenden Laser-Speckles bei einer Objektverformung wird durch die im Messgerät verwendete Kamera anhand der Intensitätsänderungen des Speckles nach der allgemeinen Interferometrie-Gleichung 2.35 (s. auch Kapitel 2.2.b) ermittelt⁵⁵.

$$I = I_0 (1 + \gamma \cos \Phi) \quad (2.35.)$$

Im theoretisch möglichen Idealfall weist der Speckle eine Modulation von 1 auf, d. h. der Laserkontrast ist maximal und der Laser damit hochkohärent mit einer unendlichen Kohärenzlänge. In dem Fall kann die Kamerabelichtung so eingestellt werden, dass die hellste Speckleintensität den Kamerapixel maximal belichtet, knapp vor der Überbelichtung. Die tiefste Speckle-Intensität hingegen bei einer Phasenverschiebung von 180° ist gleich 0. Somit kann die volle Kamertiefenauflösung für einen halben Phasenstreifen genutzt werden. Moderne Kameras erreichen hier eine Grauwertabstufung von bis zu 12 Bit, d. h. $2^{12} = 4096$ Werte. Abbildung 2.34 verbildlicht die Gegebenheiten.

Hieraus ergibt sich mit:

$$\frac{N}{2} = \frac{1}{2^{12}} = \frac{1}{4096}$$

die kleinste erfassbare Verformung und damit eine theoretische Tiefenauflösung von:

$$D_w = \frac{N\lambda}{2} = \frac{450}{4096} \text{ nm} \approx 0,11 \text{ nm}$$

⁵⁵ Durch Phasenschieben.

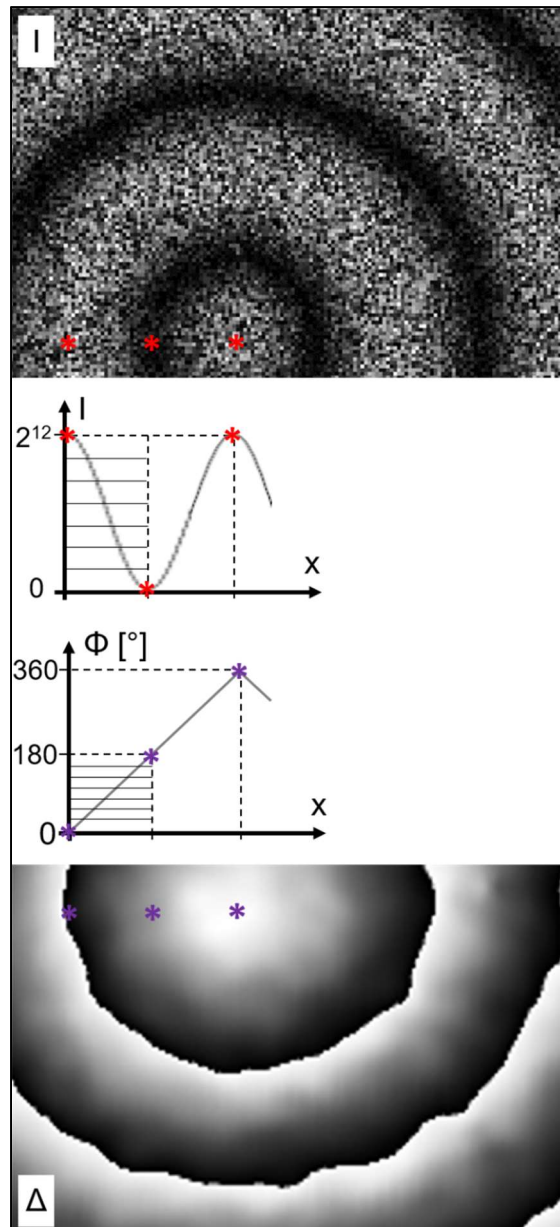


Abbildung 2.34: Abhängigkeit der erreichbaren Tiefenauflösung bei der Phasenstreifenerfassung; im Idealfall existiert eine optimale Lasermodulation, wodurch die Intensitätserfassung mit voller Kameratiefenauflösung (hier 12 Bit) erfolgen kann (Bild oben und obere Grafik). Auf diese Weise besitzt ein halber Phasenstreifen nach dem Phasenschieben die volle Tiefenauflösung (untere Grafik und Bild unten). Die auflösungsreduzierende Filterung wird hierbei nicht weiter betrachtet.

Ein großer Unterschied in der Praxis ergibt sich jedoch vor allem aus den real umsetzbaren Werten, beachte auch ([36] S. 29 f.). Typischerweise werden Kameras mit einer Tiefenauflösung von nur 8 Bit (256 Werte) verwendet, da nach der Filterung zur Eliminierung des hochfrequenten Rauschens keine höher auflösbare Modulation mehr zur Verfügung steht. Darüber hinaus wurde die praktisch erreichbare Laserkohärenz und damit Specklekontrastmodulation bereits weiter oben diskutiert. Neben dem Vorhandensein von Fremdlicht in jeder Messung, zumindest in Form von elektronischem Pixelrauschen etc., ergibt sich in der Praxis eine typische Lasermodulation für Holografie beispielsweise zu 0,5. Demnach ist die praktische Tiefenauflösung für ESPI:

$$D_w = \frac{N\lambda}{2} = \frac{450 \text{ nm}}{(256/2)} \approx \mathbf{3,5 \text{ nm}}$$

Zur Veranschaulichung: Ein menschliches Kopfhhaar (ca. 50 Mikrometer Durchmesser) wird der Länge nach in 1000 gleich dünne Streifen geschnitten, dann ein Streifen davon nochmals in 10 gleich große Streifen. Die Breite dieser Streifen kann die oop Holografie als Höhe auflösen.

Nach dieser Betrachtung für die oop Holografie folgt sie analog für die oop Shearografie mit der Grundgleichung 2.36 (s. auch Kapitel 2.4.b).

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2\delta_x} \quad (2.36.)$$

Bei der Quantifizierung der Streifenordnung spielt der Shearbetrag eine zusätzliche Rolle. Umso höher der Shearbetrag ist, desto kleiner ist die Verformung für eine gegebene Streifenordnung. Dieser Einfluss ist jedoch insoweit begrenzt, dass mit der Shearografie prinzipbedingt bestenfalls die Empfindlichkeit der Holografie erreicht werden kann. Gao et al. [67] zeigt dies, indem er eine außerhalb des Bildbereichs stehende Referenzplatte auf das Messobjekt versheart, somit also eine feste Referenzwellenfront erzeugt und Holografie mit dem Shearografiesensor betreibt. In der ZfP-Praxis sind von daher Shearbeträge bis max. 10 mm ausreichend (s. Kapitel 6.1.c). Demnach ergibt sich:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2} \cdot \frac{1}{\delta_x} = \frac{0,45 \text{ } \mu\text{m}}{(256/2)} \cdot \frac{1}{10 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 0,35 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} = \mathbf{0,35 \text{ Mikrostrain}}^{56}$$

Zur Veranschaulichung: Ein menschliches Kopfhhaar (ca. 50 Mikrometer Durchmesser) wird der Länge nach in 100 gleichdünne Streifen geschnitten. Die Neigung, die ein 1 Meter langer Stab erfährt, wenn einer dieser Streifen des Haares unter eines seiner Enden gelegt wird, kann die oop Shearografie auflösen. Damit gleichbedeutend kann die Neigung des Stabes um 3,5 nm über eine Messbreite von 1 cm gerade noch aufgelöst werden, was direkt vergleichbar mit dem Wert für die Holografie ist. Schuth ([36] S. 145) und Yang ([41] S. 151) nennen hier einen ca. 20-fach höheren Wert von 5 Mikrostrain, was vor allem auf die damalige Kameratechnik aus dem Jahre 1996 zurückzuführen ist.

In-plane Anteile sind weniger sensitiv messbar, entsprechend dem Einfluss des notwendigen Beleuchtungswinkels nach der ip Shearografie Grundgleichung 2.37 (s. auch Kapitel 2.4.b).

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2\delta_x \sin(\Theta_{xz})} \quad (2.37.)$$

Praktisch wird aufgrund von Beleuchtungs- und Aufbaugrenzen maximal ein Winkel von ca. 45° eingestellt, woraus sich verglichen zum reinen oop eine ca. 41 % höhere Tiefenauflösung ergibt.

⁵⁶ Die Pseudoeinheit [Mikrometer pro Meter] der Dehnung wird im Bereich der Shearografie auch mit *Mikrostrain* bezeichnet (engl.: strain = dt.: Dehnung).

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2\sin(\Theta_{xz})} \quad \frac{1}{\delta_x} = \frac{0,45 \mu\text{m}}{(256/2)\sin(45^\circ)} \quad \frac{1}{10 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx \mathbf{0,5 \text{ Mikrostrain}}$$

Über eine Messbreite von 1 cm kann die Dehnung eines Stabes um 5 nm gerade noch aufgelöst werden.

Laterale Auflösung

Die laterale Messauflösung ergibt sich zunächst aus der Abbildung der Messfläche auf dem Kamerachip. Dabei wird im Mittel jedem Pixel ein Speckle zugeordnet (s. Kapitel 2.2.c), welcher die Verformungsinformation eines kleinen Anteils der Messfläche liefert. In dieser Arbeit kommt im Falle der höchsten Auflösung (s. Kapitel 5.3) beispielsweise eine 5 Megapixel Kamera zum Einsatz, die eine Fläche von ca. 1 cm² auflöst. Dies entspricht einer lateralen Auflösung von 20 μm². Bei diesem Anwendungsfall handelt es sich jedoch um ein Grenzgebiet der Speckle-Interferometrie, da auftretende Verformungskorrelationen (s. Kapitel 2.6.d) die Messung einschränken. Stattdessen würde diese Messaufgabe ggf. mit anderen Verfahren gelöst werden, wie z. B. mit DIC. Die berechnete laterale Auflösung erhöht sich zudem durch die notwendige Filterung (s. Kapitel 2.5.c) um einen überschlägig angesetzten Faktor von mindestens 5 (entsprechend eines Filterkerns) auf ca. 100 μm².

2.6.b. Messbereich

Der Messbereich beschreibt den „Bereich derjenigen Werte der Messgröße [...], für den gefordert ist, dass die Messabweichung eines Messgerätes [...] innerhalb festgelegter Grenzen bleibt“ ([66] S. 23). Die Messabweichung wird unten in Kapitel 2.6.c weiter beschrieben. Der Anfangswert des Tiefen- und lateralen Messbereichs wird mit der Tiefen- bzw. lateralen Messauflösung gleichgesetzt (s. oben). Der Endwert ist stark von den spezifischen Messparametern abhängig. Von daher wird er in der folgenden Betrachtung anhand typischer Werte erörtert.

Tiefenmessbereich

Die höchste messbare Verformung bei der Shearografie wird mit großen Laserwellenlängen und kleinen Shearbeträgen bei hohen Streifenordnungen erfassbar. Zum intuitiven Vergleich wird zunächst die Holografie betrachtet.

Mit ausreichend hoher Quanteneffizienz durch gewöhnliche Kamerachips sind verfügbare Laserwellenlängen von beispielsweise 980 nm im IR erfassbar (s. auch Kapitel 2.2.d und Kapitel 2.3). Eine hohe Streifenordnung ergibt sich aus der hohen Messobjektverformung. Um einen halben Interferenzstreifen eindeutig, inkl. seiner auf- oder absteigenden Richtung, durch die Bildaufnahme zu erfassen, sind mindestens 3 laterale Messpunkte (Kamerapixel) nötig, wie Abbildung 2.35 verbildlicht.

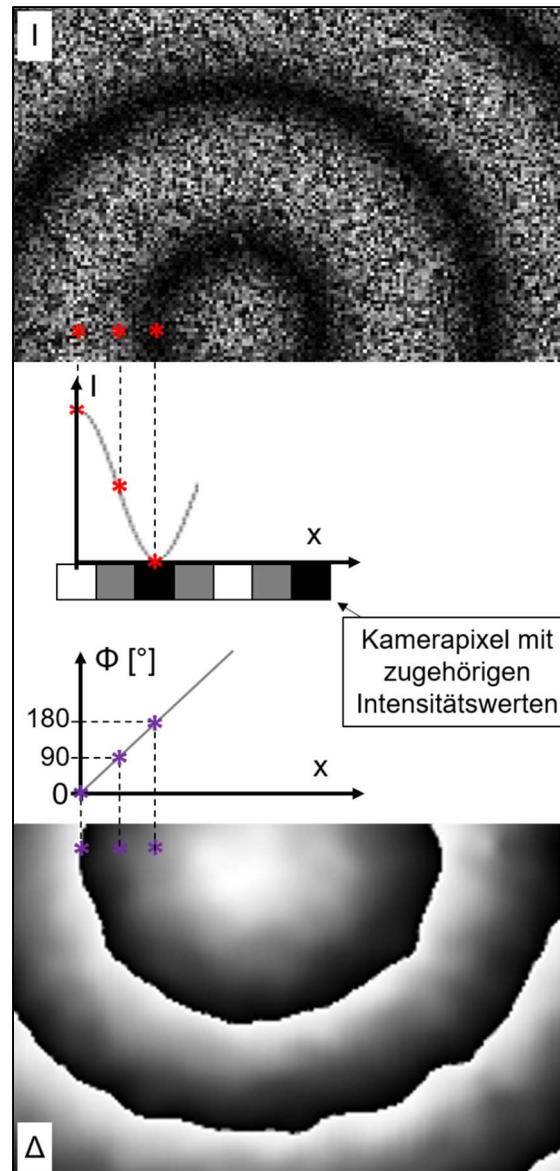


Abbildung 2.35: Abhängigkeit des erreichbaren Endwerts des Tiefenmessbereichs durch möglichst hohe Streifenordnungen im Interferogramm; ein halber Interferenzstreifen in der Intensitätsbildaufnahme muss durch mindestens drei Kamerapixel erfasst werden (Bild oben und obere Grafik). Nur so kann die Richtung des entsprechenden Sägezahn-Phasenstreifens nach dem Phasenschieben zugeordnet werden (untere Grafik und Bild unten).

Aus Gründen der realistischen, praxisgerechten Filterung wird wieder ein Faktor 5 (s. oben) beaufschlagt, was bedeutet, dass ein halber Interferenzstreifen durch 15 Pixel erfasst werden muss. Bei einem 5 Megapixel Kamerachip stehen ca. 2500 Pixel zur Erfassung der Bildbreite zur Verfügung. Somit könnten etwa 83 Streifen⁵⁷ abgebildet werden. Daraus ergibt sich ein Endwert des Tiefen-Messbereichs von:

$$D_w = \frac{N\lambda}{2} = \frac{83 \cdot 980 \text{ nm}}{2} \approx 41 \text{ } \mu\text{m}$$

⁵⁷ $2500 \text{ Px} / (15 \text{ Px} / (N/2)) = 2500 \text{ Px} / 30 \text{ Px} \cdot N \approx 83 \cdot N$.

Stark begrenzt wird dieser Wert durch die in der Praxis eintretende Verformungsdekorrelation (s. Kapitel 2.6.d), die vor allem durch optische Verzerrungen in der Abbildung verursacht wird. Schuth ([36] S. 147) nennt für die maximal erfassbare Streifenordnung einen erreichbaren Wert von 10. Daraus ergibt sich ein Endwert von lediglich:

$$D_w = \frac{N\lambda}{2} = \frac{10 \cdot 980 \text{ nm}}{2} = \mathbf{4,9 \mu m}$$

Zur Messung der höchsten Verformung mit der Shearografie muss der Shearbetrag minimiert werden. Theoretisch ergeben sich unendlich hohe Werte für einen Shearbetrag von 0 mm. Dies ist jedoch nicht praxisgerecht, da in dem Falle bei einer Messobjektverformung keine Phasenstreifen beobachtbar wären und es ab einer gewissen Verformung lediglich zur Verformungsdekorrelation käme (s. Kapitel 2.6.d). Realistisch ist stattdessen ein sehr kleiner Shearbetrag von 0,5 mm bei einer Messbreite von typischen 500 mm, also 1 Promille. Dieser Shearbetrag kann noch reproduzierbar und mit überschaubarer Messabweichung (s. Kapitel 2.6.c) am Messgerät eingestellt werden. Schuth ([36] S. 145) nennt für oop DS eine maximal erfassbare Streifenordnung von 5. Hieraus ergibt sich ein Endwert von:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2} \cdot \frac{1}{\delta_x} = \frac{5 \cdot 0,98 \mu m}{2} \cdot \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = \mathbf{4,9 \text{ Millistrain}}$$

Über eine maximale Messbreite⁵⁸ von ca. 1,4 m kann die Erhöhung eines Stabes um maximal knapp 7 mm erfasst werden. Dieser Wert hebt sich um mehr als das Tausendfache von dem Wert für die Holografie ab. Schuth ([36] S. 146) nennt hier im Jahre 1996 einen erreichbaren Wert von nur 0,21 Millistrain, was vor allem auf den damals hohen, nicht einstellbaren Shearbetrag von 10 mm zurückzuführen ist. Yang ([41] S. 151) nennt im Jahre 1998 einen Wert von 0,5 Millistrain.

In-plane Anteile werden, entsprechend dem Einfluss des notwendigen Beleuchtungswinkels analog zur Betrachtung oben (s. Tiefenauflösung), weniger sensitiv angezeigt. Somit ist die gemessene Streifenordnung für gleiche ip Verformung tiefer als diejenige für entsprechende oop Verformungen. Demzufolge ist auch die maximal erfassbare Streifenordnung tiefer, denn die Verformung selbst ist ausschlaggebend für das Eintreten einer Verformungsdekorrelation (s. Kapitel 2.6.d). Darüber hinaus tritt diese Art der Dekorrelation vor allem durch ip Verformungsanteile auf, wodurch die maximal erfassbare Streifenordnung bei der ip Messung grundsätzlich tiefer ist, s. auch Yang ([41] S. 151). Hingegen des Wertes von Schuth ([36] S. 145), $N=10$, wird anhand der Erfahrungen des Autors ein Wert von nur $N=2,5$ für die maximale ip Streifenordnung bei kleinen Shearbeträgen angesetzt. Damit ergibt sich ein Endwert des Tiefenmessbereichs von:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{N\lambda}{2\sin(\Theta_{xz})} \cdot \frac{1}{\delta_x} = \frac{2,5 \cdot 0,98 \mu m}{2\sin(45^\circ)} \cdot \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx \mathbf{3,5 \text{ Millistrain}}$$

Über eine maximale Messbreite⁵⁸ von ca. 1,4 m kann die Dehnung eines Stabes um maximal knapp 5 mm erfasst werden, sofern keine Verformungsdekorrelation auftritt.

⁵⁸ Entsprechend der Wurzel der Messfläche von 2 m²; siehe „lateraler Messbereich“ unten.

Lateraler Messbereich

Der laterale Messbereich bei der optischen Interferometrie ist theoretisch unbegrenzt und richtet sich nach der Brennweite der Abbildungsoptik und dem Messabstand. Praktisch ist er jedoch vor allem aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Verfahrensrobustheit (s. auch Kapitel 2.6.e) beschränkt, was im Folgenden übersichtlich dargestellt wird.

Die Beleuchtung einer typischen Messfläche ohne Oberflächenvorbehandlung von $0,25 \text{ m}^2$ erfordert bereits eine Laserleistung von ca. $0,5 \text{ W}$, um ausreichend qualitative Messergebnisse zu erhalten. Die Laserleistung für eine 2 m^2 Fläche wäre demnach 4 W . Die Kosten für einen solchen Laser inkl. Aufweitungsoptiken betragen aktuell ca. 10.000 € . Die Bedienung eines solchen Systems wäre, ohne feste Installation mit Schutzumhausung, nur durch einen speziell geschulten Mitarbeiter zulässig, da der erforderliche Laserschutz erheblich wäre (s. auch Kapitel 2.2.e). Die 2 m^2 Messfläche könnte über ein Weitwinkelobjektiv mit 8 mm Brennweite im Messabstand von 2 m erfasst werden. Kürzere Brennweiten verursachen für die optische Interferometrie bedenkliche Abbildungsfehler, verbunden mit entsprechend hohen Messabweichungen (s. auch Kapitel 2.6.c). Verglichen zu typischen Messabständen bis $0,5 \text{ m}$ ergeben sich für den dargestellten Aufbau stark erhöhte Störeinflüsse (s. auch Kapitel 2.6.e), wodurch die Messrobustheit und Ergebnisqualität entsprechend herabgesetzt ist. Dementsprechend wird der laterale Messbereich von **2 m^2** als Grenze angesehen, die mit zusätzlichem Kostenaufwand bzgl. notwendiger Messstabilisation noch erreichbar ist. ([10] S. 400) nennt hier einen Wert von 2 m^2 bis 4 m^2 , wobei auch rasternde Prozeduren gemeint sind ([10] S. 565 f.). Verkäufliche Systeme am Markt sind auf Messbereiche von max. ca. $0,25 \text{ m}^2$ beschränkt. Gerade im Rahmen der shearografischen Prüfung ist hierbei auch die kleinste detektierbare Fehlstellendimension zu beachten (s. Kapitel 6.1.c), die im Falle großflächiger Abbildungen durch die laterale Messauflösung (s. oben) beschränkt wird.

Ein entsprechender Messversuch mit sehr großer Bildfläche wird, verglichen zu rasternd erfassten Ergebnissen, in Kapitel 7.3.b vorgestellt.

Zusammenfassung Messbereich

Die ermittelten Messbereiche der modernen ESPI und ESPSI nach diesem Kapitel 2.6.b veranschaulicht Abbildung 2.36. Der Vorteil der Shearografie gegenüber der Holografie ist auch hier nochmals erkennbar. Der Nutzbereich der Shearografie fällt durch den zusätzlichen Parameter, den Shearbetrag, um eine Zehnerpotenz höher aus (vgl. Anfangswert mit Endwert).

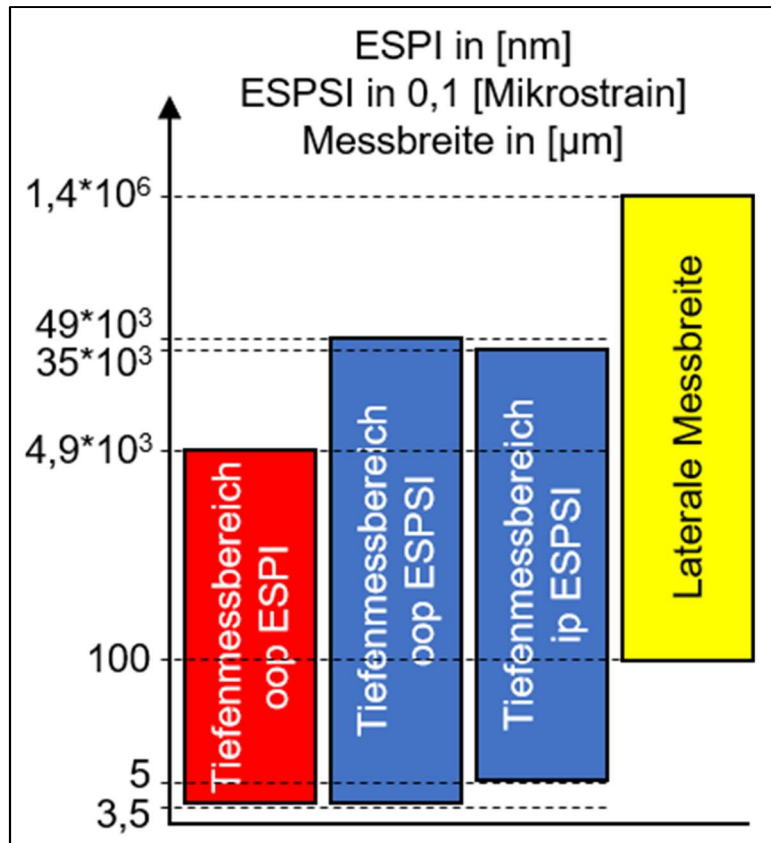


Abbildung 2.36: Grafik für den Tiefenmessbereich und den lateralen Messbereich der modernen ESPI und ESPI, logarithmisch aufgetragen.

2.6.c. Messabweichung

Nach DIN 1319-1 ([66] S. 12) bezeichnet die Messabweichung die Abweichung zwischen dem wahren Wert⁵⁹ und dem Messergebnis. Aus ihr kann zudem die Messunsicherheit zur Kennzeichnung eines Wertebereiches für den wahren Wert festgelegt werden ([66] S. 14). Es wird nach zufälliger und systematischer Messabweichung unterschieden ([66] S. 12 f.).

Eine Fehlerbetrachtung der Shearografie wurde von Schuth ([36] S. 130 ff.) für den messtechnisch kritischeren Anwendungsfall der ip Messung durchgeführt. Für die Fehlerbetrachtung zum Parametereinfluss ist sowohl der Shearvektor als auch, bei typischerweise orthogonal zur Messoberfläche stehender Beobachtungsrichtung, der Beleuchtungswinkel maßgebend. Gerade bei größeren Messflächen und kurzen Messabständen ergibt sich eine örtlich variierende Sensitivität. Nichts desto trotz kann gefolgert werden, dass mit Fehlergrößen über 2 % in der Praxis nicht gerechnet werden muss ([36] S. 139, bestätigt in [41] mit weiteren Hinweisen). Der hier genannte, veraltete Ausdruck „Fehler“ bezieht sich dabei auf die Messabweichung und kann auch als sog. Richtigkeit der Messung betrachtet werden. Durch eine statistische Versuchsauswertung wurde eine Standardabweichung von ca. 5 % des Mittelwerts festgestellt ([36] S. 143), was sich auf die Präzision der Messung bezieht. Zu beachten ist dabei, dass mit einer händisch aufgetragenen, mechanischen Objektbelastung gearbeitet wurde, die auch als äußerst stömpfindlich bzgl. der Reproduzierbarkeit bewertet wird ([36] S. 141). Weitere Analysen und Ergebnisse finden sich in ([41] Kapitel 8).

⁵⁹ Ideeller Schätzwert als Ziel der Auswertung, in aller Regel nicht genau bekannt ([66] S. 3).

Die Messabweichung der Shearografie wird nicht weiter untersucht, da die oben aufgezeigten Werte im Rahmen der Zielanwendung dieser Arbeit, die zerstörungsfreie Prüfung, als einsatzgerecht bewertet werden. Gerade die Richtigkeit spielt eine stark untergeordnete Rolle, da die ermittelten Ergebnisse bei der ZfP rein relativ und oft ohne bekannte Randbedingungen bewertet werden. Beispielhaft sei hierbei die Vermessung von vielen industriell vorkommenden, unebenen Messobjekten genannt (s. Kapitel 8.2.c), wo für absolute Aussagen zunächst die 3D Form des Teils erfasst werden müsste. Lediglich beim Verfahrensvergleich mit anderen Messmethoden zur Evaluation der entwickelten, neuartigen Aufbauten und Methoden wird ein Augenmerk auf die absolute Richtigkeit der Messergebnisse gelegt.

2.6.d. Dekorrelation

Dekorrelation bei der Speckle-Messtechnik bedeutet, dass zwischen zwei Interferenzphasen keine eindeutige Beziehung besteht, sodass das Differenzphasenbild fehlerhaft ist. Dies zeigt sich durch lokales schwaches Rauschen bis hin zu globalem starkem Rauschen.

Elektronisches Kamerarauschen und Rauschen durch eine zeitlich instabile oder inkohärente Laserquelle kann durch die zweckmäßige Wahl der passenden Komponenten und Messparameter verhindert werden. Auf diese zeitlichen Dekorrelationseffekte wird in dieser Arbeit daher nicht weiter eingegangen. Zudem wird eine stabile Lagerung des Messgerätes vorausgesetzt.

Stattdessen spielen laterale Verformungseffekte des Messobjekts die entscheidende Rolle. Unter Annahme der Fernfeldbetrachtung (s. Kapitel 2.2.c) kann als einfache Betrachtung angenommen werden, dass die Interferenzphase eines Speckles auf einem Kamerapixel ermittelt wurde, während derselbe Speckle bei der nächsten Interferenzphasen-Berechnung auf einem anderen, benachbarten Pixel abgebildet wird. Die beiden Informationen bei der Differenzphasenbildung passen somit nicht zusammen, denn „der Speckle sitzt nicht mehr auf seinem ursprünglichen Platz“. Unter der Betrachtung, dass Speckles auf der Messobjektoberfläche „haften“ (s. Kapitel 2.2.c), ist dafür die Messobjektverformung selbst ausschlaggebend für dieses Phänomen, wie in Abbildung 2.37 angedeutet. Dabei sind vor allem die i_p Verformungsanteile der begrenzende Faktor, was i_p Messungen sowie Messungen mit hoher Vergrößerung (s. auch Kapitel 5.3) umso schwieriger macht.

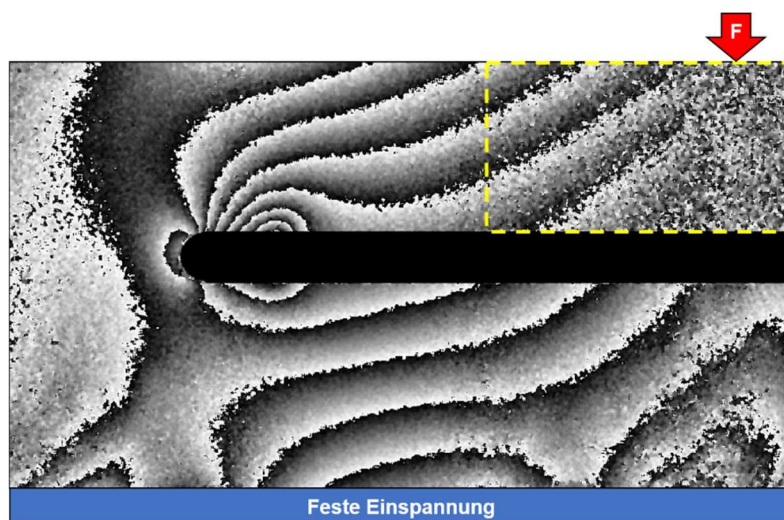


Abbildung 2.37: Laterale Krafteinleitung in einen Kragbalken (Messobjekt s. auch Abbildung 2.9 auf S. 21) führt örtlich zu verstärktem Rauschen des Messergebnisses (Bereich gelb markiert) aufgrund von i_p Verformungen der Oberfläche.

Gleichung 2.38 beschreibt eine einfache Beziehung für einen Dekorrelationsgrenzwert, s. auch ([23] Teil 1 Kapitel 2).

$$d_{\text{Dekor}} = \frac{1}{2} \frac{b_{\text{Px}}}{M_a} \quad (2.38.)$$

Mit

d_{Dekor} = Dekorrelationsgrenzwert

b_{Px} = Pixelbreite

M_a = Abbildungsmaßstab, hier z. B. Bild- bzw. Chipbreite dividiert durch Messbreite

Demnach ergibt sich für typische Messparameter mit einer Messbreite von 200 mm bei einer Abbildung auf 2000 Pixel ein Verhältnis von 0,1 mm/Pixel, wodurch eine maximale Objektverformung von 0,05 mm für die Differenzphasenbildung zulässig ist. In der Praxis sollte dieser Wert in jedem Fall nicht nur eingehalten, sondern unterschritten werden, da er aufgrund überlagernder Effekte bereits zu stärkerem Rauschen führt.

Es gibt viele Möglichkeiten, um Dekorrelationsproblemen entgegenzuwirken. Bezüglich der Umsetzung handelt es sich jedoch um einen komplexen Parameterraum, der passend zur Messaufgabe hin optimiert werden muss. Tabelle 2.1 stellt die einflussreichsten Maßnahmen dar, die für den Anwendungsfall der shearografischen Prüfung bewertet werden. Weitere Handlungsempfehlungen sind auch in ([68] S. 75 f.) zu finden.

Neben einer zur Messaufgabe passenden Messobjektlagerung ist vor allem die Erhöhung der Messgeschwindigkeit die vielversprechendste Maßnahme gegen Verformungsdekorrelation. Hierzu liefert SPS den entscheidenden Kernvorteil (s. auch Kapitel 3.3.a). Die Voraussetzung ist, dass die Messobjektverformung während der Erfassung zweier Interferenzphasen unterhalb dem Dekorrelationsgrenzwert liegt. Unter dieser Bedingung erfasste Differenzphasen können für eine kontinuierliche Messobjektverformung fortlaufend aufsummiert werden, was mit SPS im Videotakt möglich ist. Auf diese Weise kann Verformungsdekorrelation auf Kosten der lateralen Messgenauigkeit z. T. vollständig eliminiert werden. Abbildung 2.38 zeigt dies vergleichend für einen Messversuch. Wie in der Einleitung (Kapitel 1.5) beschrieben, stellt diese Herangehensweise einen zielführenden Kompromiss für die moderne shearografische Prüfung dar.

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

Tabelle 2.1: Maßnahmen gegen Verformungsdekorrelation, bewertet für die Anwendung bei der shearografischen Prüfung.

Einfluss	Maßnahme	Bewertung
--	Verformung verringern	- Bezüglich der aktiven Anregung bei der Prüfung nur bedingt möglich, da so der Fehlstellenkontrast sinkt (s. Kapitel 6.1.a)
++	Optimale Messobjektlagerung , ggf. mit Messobjekt-Vorbelastung zur Versteifung; irrelevante Verformungsanteile können entkoppelt werden	+ Wichtige Maßnahme, vor allem bei dünnen oder instabilen Bauteilen eine Grundvoraussetzung
0	Kameraauflösung reduzieren , um die abgebildeten Messobjekt-Flächenelemente zu vergrößern	- Reduziert die laterale Auflösung ➔ Kleinste detektierbare Fehlstellendimension erhöht sich (s. Kapitel 6.1.c)
-	Größere Messflächen erfassen durch kürzere Objektivbrennweite bzw. größere Messabstände	- Verstärkt optische Messabweichungen (Abbildungsfehler) - Verstärkt Umgebungsstöreinflüsse (s. unten)
-	Speckledurchmesser größer als ein Kamerapixel wählen durch Verkleinerung der Blendenapertur	- Reduziert die laterale Auflösung ➔ Kleinste detektierbare Fehlstellendimension erhöht sich (s. Kapitel 6.1.c) - Reduziert die Messlichtintensität ➔ Höhere Belichtungszeiten führen zu verstärkten Umgebungsstöreinflüssen (s. unten) ➔ Stärkere Laser nötig, damit höhere Kosten und ggf. höhere Lasersicherheit nötig (s. Kapitel 2.2.e) - Unzweckmäßig bei SPS (s. Kapitel 4.1.c)
+	Höhere Laserwellenlänge verwenden, dadurch größere Speckles vorhanden (vgl. vorheriger Punkt)	(vgl. vorheriger Punkt) + Reduziert nicht die Messlichtintensität + Für SPS möglich - Verringert die Verfahrensempfindlichkeit und kann das SNR senken
--	Shearbetrag verringern	- Verschiebt den Dekorrelationseffekt lediglich leicht örtlich (durch eigene Versuche bestätigt)
0	Re-Korrelation ➔ entspricht DIC für Specklemuster, ausgehend von einer Speckle-Fotografie (ohne Interferometer); bedingt einsatztauglich, vgl. ([26], [69], [25])	- Erweiterter, gekoppelter Sensoraufbau nötig - Gesteigerter Rechenaufwand - Keine Echtzeit-Berechnung möglich
++	Messgeschwindigkeit erhöhen und Sum-Methode verwenden	+ Kernthema dieser Arbeit, nähere Beschreibung im Text unterhalb dieser Tabelle - Reduziert die laterale Auflösung ➔ Kleinste detektierbare Fehlstellendimension erhöht sich (s. Kapitel 6.1.c)

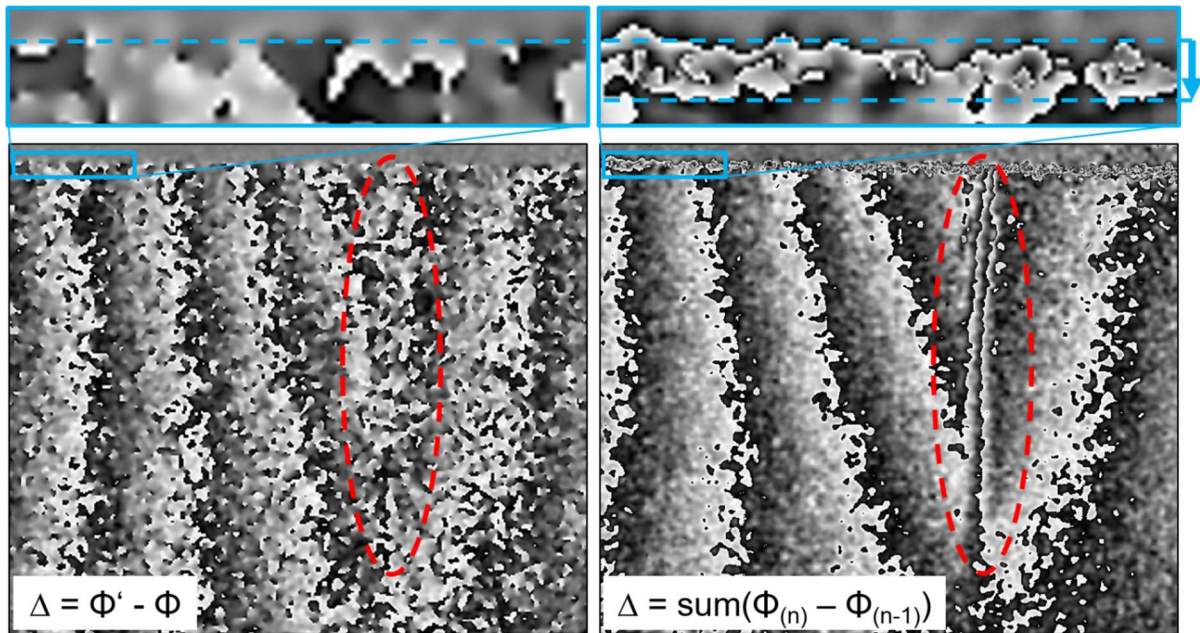


Abbildung 2.38: Shearografische Vermessung einer dünnen, aufrecht stehenden und angelehnten Platte mit Wärmeanregung; beim Abkühlen zieht sich die Platte von oben nach unten zusammen, wodurch es zur Verformungsdekorrelation bzw. zu starkem Rauschen im Standard-Shearogramm links kommt. Abhilfe kann durch das Aufsummieren vieler Shearogramme während des Abkühlvorgangs geschaffen werden. Das Shearogramm rechts ist nur schwach verrauscht und zeigt einen Indikator für einen Riss (rot umkreist). Die Detailansicht für den oberen Plattenrand, Bild oben rechts, zeigt lediglich Rauschen im Bereich der Verschiebung, welche die Platte während der Messung erfährt. Die laterale Messgenauigkeit ist entsprechend reduziert.

Mit dieser Methode kann der Tiefenmessbereich der Shearografie theoretisch bis ins unendliche gesteigert werden. Die notwendigen Randbedingungen hierbei sind vom Autor et al. in [58] aufgezeigt. Jedoch sei erwähnt, dass Rauschen sich beim Aufsummieren verstärkt (vgl. auch Abbildung 2.39). Leicht verrauschte Bildbereiche, z. B. bedingt durch eine schlechte Laser-Ausleuchtung, sind nach dem Aufsummieren mehrerer Differenzphasen stark verrauscht. Stattdessen wären diese Bereiche in der Standard Differenzphase ebenfalls nur leicht verrauscht und könnten zumindest noch visuell ausgewertet werden.

Über die Verformungsdekorrelation hinaus existiert eine Auflösungsdekorrelation bei der Differenzphasenbildung. Sie spielt eine vergleichsweise untergeordnete Rolle. Sie macht sich dadurch bemerkbar, dass hohe Streifenkonzentrationen im Differenzphasenbild durch die notwendige Tiefpassfilterung zerstört werden, vgl. Abbildung 2.39 mittig. Hierbei kann Abhilfe geschaffen werden, indem die Messobjektbelastung reduziert, der Shearbetrag verringert, die verwendete Laser-Wellenlänge erhöht, eine höher auflösende Kamera verwendet oder ein kleinerer Messbereich betrachtet wird. Mit nahezu keinem Nachteil verbunden ist jedoch lediglich das Aufsummieren mehrerer Differenzphasen zu einer zusammengesetzten Differenzphase. Da die Filterung hierbei je Zwischenschritt erfolgt und die feinstrukturierten Streifenkonzentrationen erst anschließend durch das Aufsummieren entstehen, werden sie durch den Filter nicht zerstört. Dies entspricht gleichzeitig einer künstlichen Steigerung des Tiefenmessbereichs. Ein unbegrenzter Tiefenmessbereich kann sogar durch schrittweise Demodulation und anschließendem Aufsummieren der Zwischenergebnisse erreicht werden, was jedoch nur bedingt echtzeittauglich ist. Abbildung 2.39 stellt die Verformungsdekorrelation, die Auflösungskorrelation und die Abhilfe mittels Aufsummieren vergleichend gegenüber.

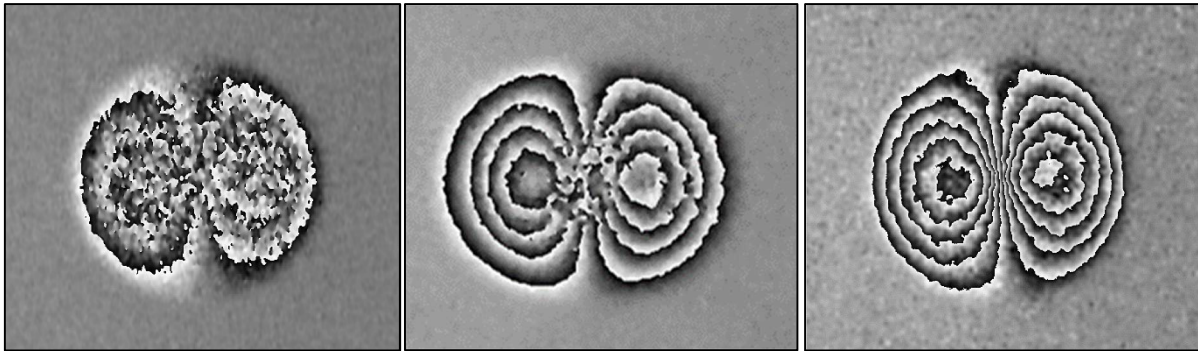


Abbildung 2.39: Shearogramm bei geringem Shearbetrag zeigt Dekorrelation im Bereich der höchsten Verformung (links); Shearogramm bei höherem Shearbetrag zeigt Auflösungsdekorrelation im Bereich der höchsten Streifenkonzentration (mittig); Shearogramm mit geringem Shearbetrag ohne Dekorrelation durch Aufsummierung vieler Phasenbilder (rechts); die Ringe des Schmetterlingsmusters sind leicht verzerrt und das globale Umfeld leicht verrauscht („körnigen“ Struktur).

2.6.e. Einflussgrößen

„Einflussgröße“ bezeichnet eine „Größe, die nicht Gegenstand der Messung [...] ist, jedoch die Messgröße [...] oder die Ausgabe [...] beeinflusst“ ([66] S. 3). Im Rahmen der shearografischen ZfP werden die Einflussgrößen oftmals als störend empfunden.

Tabelle 2.2 zeigt die wichtigsten Größen und mögliche Abhilfemaßnahmen gegen die Störungen auf. Weitere Handlungsempfehlungen sind auch in ([68] S. 75 f.) zu finden. Ein sehr starker Störeinfluss ergibt sich durch gerichtet-reflektierende Oberflächen. Entsprechende Bauteile, wie etwa chromierte Kunststoffteile, bilden die Ausnahme bei der shearografischen Prüfung. CFK Bauteile weisen oftmals diffus-gerichtet-reflektierende Oberflächen auf und sind damit unter Zusatzaufwand messbar (s. Tabelle oben). Halb-transparente Kunststoffe hingegen stellen das Öfteren ein Problem bei der Prüfung dar, wobei ggf. mit angepassten Laserwellenlängen, ansonsten nur mit der Aufbringung einer Prüfbeschichtung, gearbeitet werden kann.

Zufällige oder systematische Schwingungen bei der Messung sind ausschlaggebend für die Robustheit des optisch-interferometrischen Messverfahrens, s. auch ([43] S. 21 f.). Sie reduzieren die Mobilität und Flexibilität des Verfahrens erheblich. In [58] wird vom Autor et al. aufgezeigt, wie und bis zu welchen Grenzen SPS diesen Einfluss reduzieren kann, was gleichzeitig dem Kernthema dieser Arbeit entspricht. Der Messversuch in Kapitel 7.3.a mit akustischer Schwingungsanregung verdeutlicht sehr gut, was SPS in dieser Beziehung im Gegensatz zu TPS leisten kann. Die Schlüsselvoraussetzung dafür ist jedoch eine hinreichend kurze Belichtungszeit der Kamera, um hochdynamische Umgebungseinflüsse oder Messobjektbewegungen „einzufrieren“. Dies erfordert eine ausreichend hohe Beleuchtungsleistung, die zudem noch möglichst kohärent sein (vgl. Kapitel 2.6.a) und sich in überschaubaren Grenzen bzgl. der Lasersicherheit bewegt muss (vgl. Kapitel 2.2.e). Aufgrund dessen rückt die Messlicht-Effizienz des Shearografie-Sensors abermals in den Fokus.

2. Grundlagen der interferometrischen, optischen Messtechnik

Tabelle 2.2: Störende Einflussgrößen bei der shearografischen Prüfung und Maßnahmen, diesen entgegenzuwirken.

Einflussstärke	Einflussgröße	Maßnahme
-	Optische Weglängenänderung durch Temperaturunterschiede in der Luft zwischen Messgerät und Messobjekt führt zu Wärmeschlieren im Messergebnis ([37] S. 412, [42] S. 83)	Abhilfe mittels erzwungener Konvektion ([24] S. 100 ff.)
0	Optische Weglängenänderung durch Luftdruckunterschiede zwischen Messgerät und Messobjekt ([37] S. 412)	-
0	Optische Weglängenänderung durch Wasserdampfdruckunterschiede zwischen Messgerät und Messobjekt ([37] S. 412)	-
-	Messdrift durch Prozesserwärmung der Komponenten des Messgerätes, vor allem der Kamera und des Lasers	Einschwingzeit von ca. 3 Minuten abwarten, bis sich ein thermodynamisches Gleichgewicht mit der Umgebung eingestellt hat
--	Glänzende Oberfläche , somit gerichtete Reflexion, führt zu inhomogener Messobjektausleuchtung	Messung mit Hilfe einer diffus reflektierenden Referenzoberfläche [70] ähnlich einer deflektometrischen Messung durchführen
-	Halb-glänzende Oberfläche , somit teilgerichtete Reflexion, führt zu inhomogener Messobjektausleuchtung	Zweifache Messung, zunächst des stark reflektierenden Bereichs, danach des umgebenden Bereichs jeweils bei Anpassung der Belichtungszeit; im Anschluss Ergebniszusammensetzung
-	Stark lichtabsorbierendes Material	• Passende Laserwellenlänge mit möglichst geringer Absorption wählen • Lange Belichtungszeiten bei ausreichender Messrobustheit einstellen • Oberfläche weiß-matt beschichten
--	Halbtransparentes Material , Mehrfachreflexionen unterhalb der Oberfläche verursachen starkes Rauschen	• Passende Laserwellenlänge mit möglichst geringer Transmission wählen • Oberfläche weiß-matt beschichten
-	Transparentes Material	Messung in Transmission mit Hilfe einer diffus reflektierenden Referenzoberfläche hinter dem Messobjekt, wobei das Ergebnis nicht trivial über die optische Verzerrung kalibriert werden muss
-	Fremdlicht , z. B. Halogenlampen bei der optischen Anregung, wird unter Netzfrequenz mit schwankender Intensität erfasst, was sich verfälschend auf das TPS auswirkt	Unproblematisch beim SPS, s. [58]
--	Schwingungen zwischen Messgerät und Messobjekt verursachen schnelle Phasenänderungen, die das Ergebnis des Phasenschiebens verfälschen ([42] S. 83)	Einfluss wird beim SPS stark reduziert, s. [58]

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

Phasenschieben ist das Schlüsselement der modernen optisch-interferometrischen Messtechnik, wie bereits in Kapitel 2.5.a aufgezeigt wurde. Es wird zwischen zeitlich ablaufendem Phasenschieben (TPS) und örtlich ablaufendem, *räumlichem* Phasenschieben (SPS) unterschieden. TPS liefert eine hohe Messqualität, jedoch nur unter stabilen Umgebungsbedingungen. Es ist die gängige Praxis der am Markt verfügbaren Messgeräte. SPS stattdessen ist seit den Anfängen der Shearografie ein Forschungsthema. Es besitzt das hohe Potential eine stark gesteigerte Messrobustheit zu gewährleisten, da die Interferenzphasenberechnung unmittelbar mit einer einzigen Bildaufnahme erfolgt. Auf diese Weise könnte die hochsensible optisch-interferometrische Messtechnik mit nie dagewesener Flexibilität und Robustheit für ein breites Feld industrieller Aufgabenstellungen verwendet werden. Die Vorteile von SPS ergeben sich jedoch nur auf Kosten der Messergebnisqualität. Die Problematik kompensiert sich teilweise durch die heute erreichten Standards der Laser- undameratechnik (s. Kapitel 2.2.d und Kapitel 2.3). Eine praxisgerechte industrielle Nutzung von SPS wird somit erstmals realistisch.

Die Weiterentwicklung von SPS zu diesem Zweck ist das Kernthema dieser Arbeit. Der Fokus liegt hierbei auf der shearografischen Prüfung. SPS Holografie wird lediglich am Rande behandelt. Zudem beziehen sich die Betrachtungen auf die ESPSI, wobei häufig nur wenige, nicht weiter erwähnte Besonderheiten gegenüber Nicht-Speckle Verfahren existieren.

Im Folgenden wird zunächst der Stand der Forschung zum SPS aufgegriffen, wobei die Vorteile der sog. FFT⁶⁰ Trägerfrequenzmethode gegenüber anderen Methoden erörtert werden. Anschließend werden die Grundlagen der dazu benötigten Fourier-Transformation und zur Trägerfrequenz aufgezeigt. Daraufhin wird der Sensoraufbau vorgestellt, welcher bzgl. der Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Kapitel 1.5) das höchste Potential aufweist. Die Vor- und Nachteile des SPS Aufbaus gegenüber dem industriell eingesetzten, etablierten TPS Michelson-Interferometer Aufbau werden im Anschluss aufgezeigt. Am Kapitelende werden die beiden modernsten FFT Trägerfrequenz SPS Aufbauten für ip ESPSI, dual-shear ESPSI und oop ESPI nach dem aktuellen Stand der Forschung kurz vorgestellt. Ihre Nachteile im Rahmen einer praxisgerechten Nutzung können ebenfalls mithilfe der Weiterentwicklungen in Kapitel 4 eliminiert werden.

3.1. Stand der Forschung

Seither wurden für die Shearografie viele räumliche Phasenschiebemethoden mit dazugehörigen unterschiedlichen optischen Aufbauten entwickelt. Die Methoden mit jeweils einer modernen Veröffentlichung seien hier lediglich kurz genannt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Es existieren Methoden mit festem Beugungsgitter, Mehr-Kamera-Interferometer und verkippter Referenzwellenfront ([35] S. 58 ff.), Polarisationsinterferometer [72], Doppel-Puls Laser [73], „sinusoidal fitting“ ([74], [75]), fester Doppelblende [76], doppelbrechendem Wollaston Prisma [77] und Flüssigkristall als räumlicher Lichtmodulator⁶¹ [78]. Die letzten beiden Methoden besitzen nach Meinung des Autors ein noch nicht ausgeschöpftes Potential und sollten weiter erforscht werden. Alle anderen haben sich in der praktischen Anwendung bisher nicht bewährt. Gründe dafür sind u. a. eine unzureichende Ergebnisqualität, hohe Gerätekosten, ein hoher Einrichtungs- und Kalibrierungsaufwand und eine geringe Einsatzflexibilität.

Stattdessen hat sich gezeigt, dass die Methode mit FFT Auswertung die oben genannten Nachteile nicht oder nur bedingt aufweist (s. auch Kapitel 3.3.a unten). In der Forschung wird sie häufig ([35]

⁶⁰ Fast Fourier Transformation, dt.: schnelle Fourier-Transformation; siehe Kapitel 3.2 unten.

⁶¹ Engl.: Spatial Light Modulator (SLM).

Kapitel 3, [79] Kapitel 7 ff., [27] Kapitel 13) und teilweise für ungelöste ZfP Aufgabenstellungen angewendet [81]. Die genannten Methoden arbeiten teilweise mit Trägerfrequenz (s. Kapitel 3.2.e unten) und teilweise mit optischen Blenden. Die im Folgenden beschriebene Methode mit FFT Auswertung nutzt immer eine Trägerfrequenz, welche durch optische Blenden erzeugt wird. Sie wird daher fortan als *FFT Trägerfrequenzmethode* bezeichnet und diese Art des räumlichen Phasenschiebens folglich kurz als FFT CF⁶² SPS.

Die FFT CF Methode für interferometrische Analysen wurde bereits 1982 von Takeda et al. vorgestellt [82]. Doch erst 1996 legte Pedrini et al. den Grundstein des optischen Aufbaus mit einem Mach-Zehnder-Interferometer (MZ) mit vorgeschalteter Einfachblende [104]. Die Nachteile des Aufbaus waren zum einen die Abschattungen im Bild durch den großen Abstand zwischen Blende und Kamera, zum anderen die begrenzte Einstellbarkeit des Shearvektors. Santos et al. umging 2003 mit Hilfe eines verschiebbaren Strahlteilers im MZ Aufbau zumindest letzteren Nachteil [84]. 2013 entwickelte Xie et al. den FFT CF Aufbau mit einem Michelson-Interferometer (MI) mit vorgeschalteter Einfachblende [85], welcher 2016 auch patentiert wurde [86]. Die Einstellbarkeit des Shearvektors war wieder begrenzt, die Bildabschattungen konnten jedoch um ca. 1/3 verringert werden. Auf diese Weise wurde erstmals eine ausreichend große Messfläche von ca. 100 mm x 75 mm für erste ZfP Anwendungen erreicht. Der Aufbau hat sich durch sein kleines Volumen und die einfache Handhabung als äußerst robust erwiesen. Er besitzt damit ein hohes Potential bzgl. der Aufgabenstellung dieser Arbeit, die Shearografie für schwierige Umgebungsbedingungen praxistauglich einzusetzen (vgl. Kapitel 1.5). Er dient somit als Grundlage der Weiterentwicklungen in dieser Arbeit und wird im Folgenden genau beschrieben und analysiert.

3.2. Grundlagen der Fourier-Transformation und der Trägerfrequenzmethode

Im Folgenden werden die benötigten Grundlagen für die FFT Trägerfrequenzmethode erläutert. Dazu wird zunächst die allgemeine, dann die zeitliche und abschließend die eindimensional-ortsabhängige Fourier-Transformation aufgezeigt. Letztere wird dann weiterentwickelt für zweidimensional-ortabhängige Funktionen und die Besonderheiten bei der technischen Anwendung und der Analyse eines Specklebildes beschrieben. Auf Basis dessen wird abschließend kurz auf die Grundlagen der Trägerfrequenzmethode eingegangen.

3.2.a. Fourier-Transformation allgemein und für zeitabhängige Funktionen

Um das Jahr 1800 stellte der Mathematiker Joseph Fourier Gleichungen auf, welche heutzutage die Basis vieler technischer Anwendungen ist. Die relevante Grundgleichung 3.1 ([59] S. 81) wird im Folgenden für die Anwendung bei der optisch-interferometrischen Speckle-Messtechnik umformuliert und jeweils kurz diskutiert. Bezüglich genauerer Einblicke sei auf die einschlägige Literatur verwiesen ([33], [59]). Die Grundgleichung besagt, dass die Funktion einer Variablen, hier der Zeit, als Linearkombination unendlich vieler harmonischer Schwingungen plus einem schwingungslosen Anteil beschrieben werden kann. Abbildung 3.1 verdeutlicht dies für die Zusammensetzung einer Rechteckfunktion aus sechs harmonischen Schwingungen gleicher Phase und abnehmender Amplitude.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{\omega=1}^{\infty} (a_{\omega} \cos(\omega t) + b_{\omega} \sin(\omega t)) \quad (3.1)$$

⁶² Carrier Frequency, dt.: Trägerfrequenz.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

Mit

$f(t)$ = Zeitabhängige Funktion

a_0 = Fourier-Koeffizient für den schwingungslosen Gleichanteil

ω = Kreisfrequenz

a_ω = Fourier-Koeffizient für cosinusförmige Schwingungsanteile

b_ω = Fourier-Koeffizient für sinusförmige Schwingungsanteile

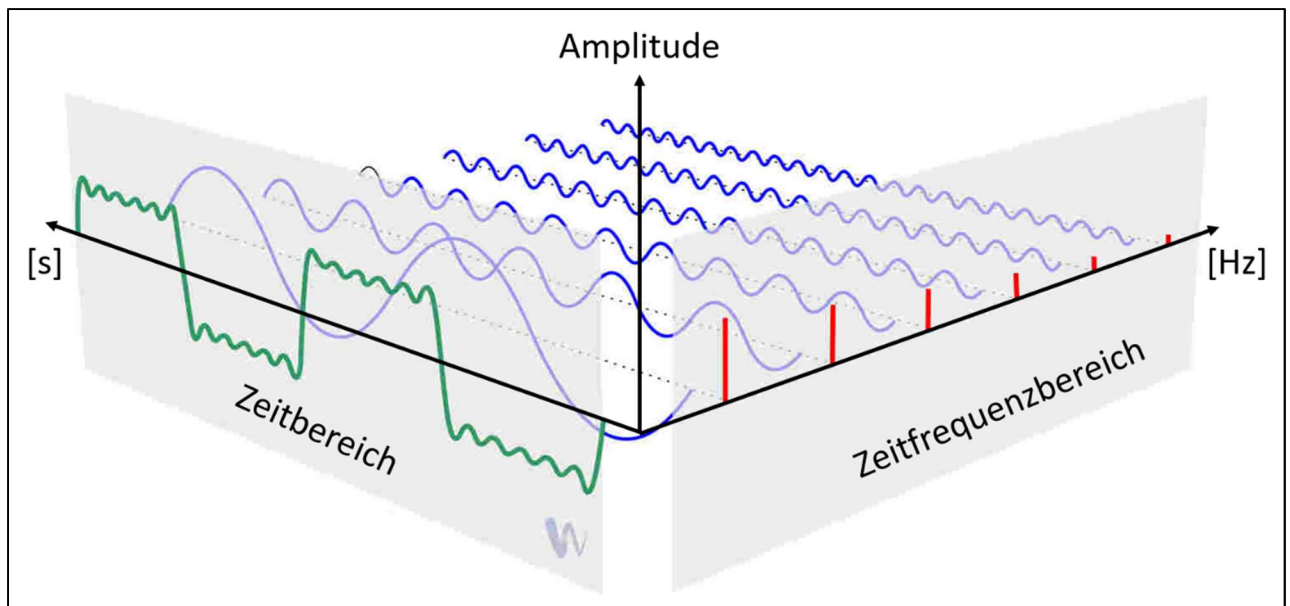


Abbildung 3.1: 3D Grafik zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Zeitbereich und Zeitfrequenzbereich; hier die Fourier Analyse einer Rechteckfunktion (grün), welche aus sechs harmonischen, gleichphasigen Schwingungsanteilen (blau) unterschiedlicher Amplitude (rot) besteht; zusammengestellt aus ([35] S. 17).

Gleichung 3.1 kann mittels der Euler Identität verkürzt werden zu Gleichung 3.2.

$$f(t) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} (c_\omega e^{i\omega t}) \quad (3.2.)$$

mit $e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t)$

Mit

c_ω = Fourier-Koeffizient für komplexe Schwingungsanteile

Die Besonderheit, die nun durchführbar ist, ist die von Fourier entwickelte *Fourier-Transformation*. Demnach kann Gleichung 3.2 umgeschrieben werden zu Gleichung 3.3 ([59] S. 83).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.3.)$$

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

Mit

$F(\omega)$ = Kreisfrequenzabhängige Fourier Transformierte

dt = Zeitdifferential

Während Funktionen typischerweise im Bereich der Variablen dargestellt werden (vgl. Abbildung 3.1: Zeitbereich), handelt es sich bei der Fourier Transformierten um eine Darstellung im Frequenzbereich (vgl. Abbildung 3.1: Zeitfrequenzbereich). Das heißt die Fourier Transformierte beschreibt die Funktion durch die Anteile der Kreisfrequenzen, die in der Funktion enthalten sind. Mittels Gleichung 3.4 ([59] S. 83) kann aus der Fourier Transformierten für eine bestimmte Kreisfrequenz die Amplitude bzw. „Stärke“ des enthaltenen Anteils in einer Funktion abgefragt werden (vgl. auch Abbildung 3.1, rote Markierungen). Mittels Gleichung 3.5 ([59] S. 84) kann die Phase des Anteils abgefragt werden, d. h. der Anfangswert beim Durchgang durch die Abszisse des Frequenzbereichs.

$$|F(\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}(F(\omega))^2 + \operatorname{Im}(F(\omega))^2} \quad (3.4.)$$

$$\Phi(\omega) = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(F(\omega))}{\operatorname{Re}(F(\omega))}\right) \quad (3.5.)$$

Mit

$|F(\omega)|$ = Amplitude der Fourier Transformierten

Re = Realteil des Funktionswerts

Im = Imaginärteil des Funktionswerts

$\Phi(\omega)$ = Phase der Fourier Transformierten

Die Fourier-Transformation einer Funktion wird auch als *Fourier Analyse* bezeichnet, die Rücktransformation bzw. inverse Fourier-Transformation nach Gleichung 3.6 ([59] S. 83) auch als *Fourier Synthese*.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (3.6.)$$

Mit

$d\omega$ = Frequenzdifferential

Im Rahmen der technischen Anwendung werden typischerweise diskrete Funktionen (s. auch weiter unten) verarbeitet. Dabei hat sich seit dem Jahre 1965 die sog. *Fast Fourier Transformation*⁶³ (FFT) etabliert. Anstatt eine direkte Berechnung durchzuführen, können Zwischenergebnisse wiederverwendet werden und so Rechenoperationen eingespart werden. Die FFT läuft in der praktischen Anwendung somit ca. 100-fach schneller ab ([59] Kapitel 8.3). Analog existiert die entsprechende inverse FFT (iFFT).

⁶³ Dt.: schnelle Fourier-Transformation.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

Für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit wurde eine durchschnittliche Berechnungszeit von ca. 10 ms für Bildauflösungen von 2,3 Megapixel für eine Transformation ermittelt⁶⁴.

Als Beispiel des technischen Einsatzes sei hier die akustische Modalanalyse genannt, die auch zur ZfP an Faserbauteilen zum Einsatz kommt ([27] Teil 1 Kapitel 9). Mittels Mikrofon wird die Signalantwort einer Struktur nach der Anregung durch einen Impulshammer zeitlich abgetastet. Während das Zeitsignal meist einen kompliziert ausgeprägten Verlauf aufweist, liefert das Amplitudenspektrum der Fourier Transformaten auf einen Blick nahezu konstante Ausschläge im Zeitfrequenzbereich, wie in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Ausschläge entsprechen dabei den natürlichen Eigenfrequenzen der Struktur, die in [Hz] bzw. [1/s], also Schwingungen pro Sekunde, aufgetragen sind.

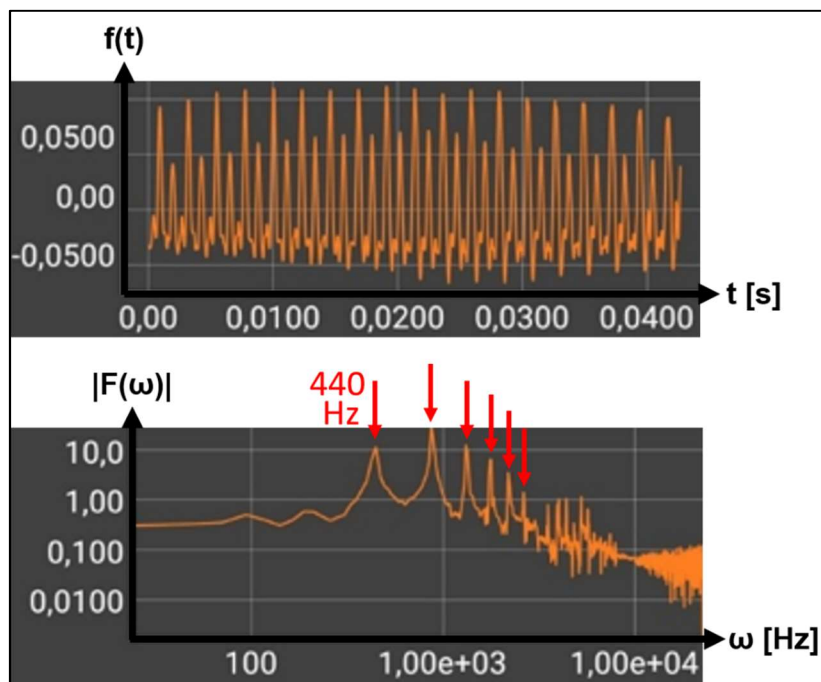


Abbildung 3.2: Zeitsignal (oben) und Zeitfrequenzsignal (unten) bei der akustischen Abtastung einer konstant geblasenen Oboe mittels Smartphone⁶⁵; das Zeitsignal zeigt den komplizierten Schwingungsverlauf und deutet auf mehrere überlagerte harmonische Schwingungsanteile hin. Das Zeitfrequenzsignal, typischerweise in logarithmischer Darstellung, zeigt die enthaltenen Anteile mit hoher Amplitude durch die Maxima an (s. Pfeile). Das niederfrequente Maximum bei 440 Hz (Kammer-ton a') entspricht dem gespielten Grundton. Alle weiteren Maxima sind durch die Oboe erzeugte Obertöne bzw. natürliche Eigenfrequenzen und machen die Klangfarbe des Instrumentes aus.

3.2.b. Fourier-Transformation für eindimensional-ortsabhängige Funktion

Ein ähnliches Ergebnis wie in Abbildung 3.2 entsteht, wenn die Schwingungsform einer Struktur, beispielsweise einer Gitarrensaite, linienhaft zu einem festen Zeitpunkt maximaler Auslenkung erfasst wird⁶⁶. In dem Falle ist die Funktion abhängig von der räumlichen Variablen und wird nach Fourier durch Gleichung 3.7 beschrieben ([59] S. 81). Die entsprechende Fourier Transformatierte für eindimensionale Ortsfunktionen beschreibt Gleichung 3.8 ([59] S. 83).

⁶⁴ Intel Core i7 mit 3,6 GHz CPU.

⁶⁵ Kostenlose *Phyphox* Smartphone-App der RWTH Aachen.

⁶⁶ Beispielsweise mit Laserlinien-Triangulationssensor.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (c_k e^{ikx}) \quad (3.7.)$$

Mit

$f(x)$ = Ortsabhängige Funktion

k = Kreiswellenzahl

c_k = Fourier-Koeffizient für komplexe Schwingungsanteile

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx \quad (3.8.)$$

Mit

$F(k)$ = Wellenzahlabhängige Fourier Transformierte

dx = Ortsdifferential

Die Fourier Transformierte beschreibt die Ortsfunktion durch die Anteile der Wellenzahl, auch Raumfrequenzen genannt, die in der Funktion enthalten sind. Bei der optisch abgetasteten Modalanalyse weist das Ortssignal der ausgelenkten Form teilweise einen kompliziert ausgeprägten Verlauf auf, während die Fourier Transformierte konstante Ausschläge im Ortsfrequenzbereich wiedergibt, wie bereits in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Ausschläge entsprechen dann den natürlichen Eigenformen der Struktur, die in [1/m], also Schwingungsamplituden pro Meter, aufgetragen sind. Die Fourier Synthese liefert die Eigenformen dann beispielsweise separiert, wie in Abbildung 3.3 angedeutet. Gleichung 3.9 ([59] S. 83) beschreibt die inverse eindimensional-ortsabhängige Fourier Transformation.

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{-ikx} dk \quad (3.9.)$$

Mit

dk = Frequenzdifferential

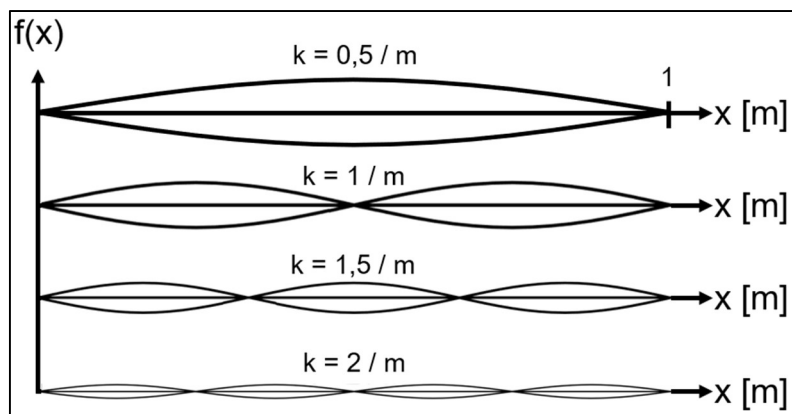


Abbildung 3.3: Eigenformen bzw. Raumfrequenzen einer ein Meter langen, schwingenden Saite; die Grundform oben entspricht einer halben Sinusschwingung und ergibt sich aus den Lagerbedingungen der Saite, hier beidseitig fest; es sind drei weitere Oberfrequenzen aufgezeigt.

3.2.c. Fourier-Transformation für zweidimensional-ortsabhängige Funktionen

Ein Bild kann auch „als räumliche Verteilung optischer Information“ ([33] S. 974) betrachtet werden. Im einfachsten Falle ist die optische Information die Intensität an einem Ort. Das Bild ist also eine Anordnung von Elementen mit einer Grauwertverteilung von dunkel nach hell. Die zweidimensionale Darstellung der Fourier Transformaten eines Bildes, ab sofort auch *Fourier Bild* genannt, ist analog. Stark vertretene Schwingungsanteile werden in der zweidimensionalen Fourier Transformation durch helle Punkte wiedergegeben, vgl. Abbildung 3.4. Für zweidimensionale Ortssignale, also Bilder, ergibt sich die typische Darstellung des Fourier Bildes, wie Abbildung 3.5 zeigt.

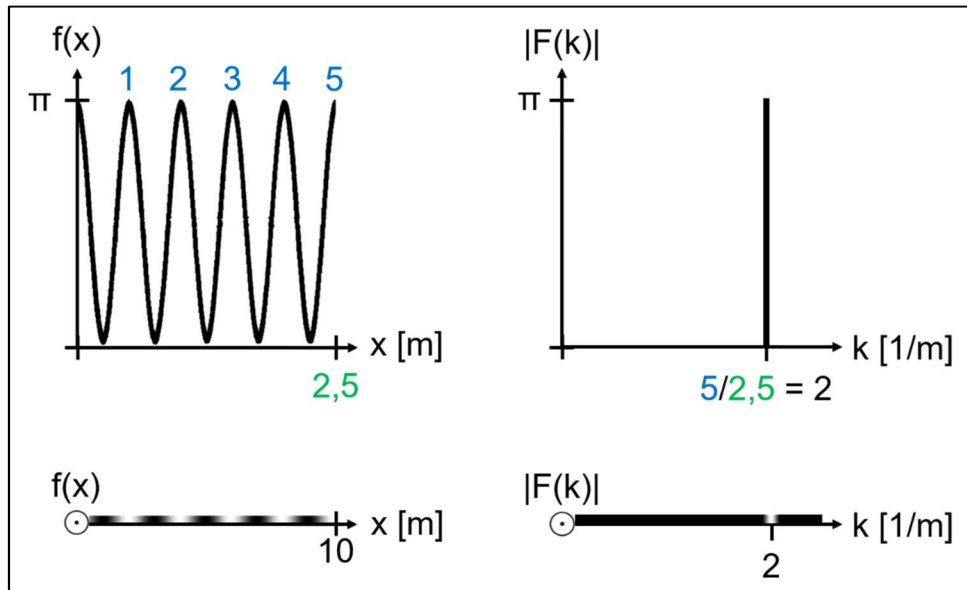


Abbildung 3.4: Eindimensionales Ortssignal oben links und eindimensional-bildliche Darstellung mittels Grauwertverteilung unten links; analog dazu die Amplitude der Fourier Transformaten oben rechts und ihre eindimensional-bildliche Darstellung unten rechts.

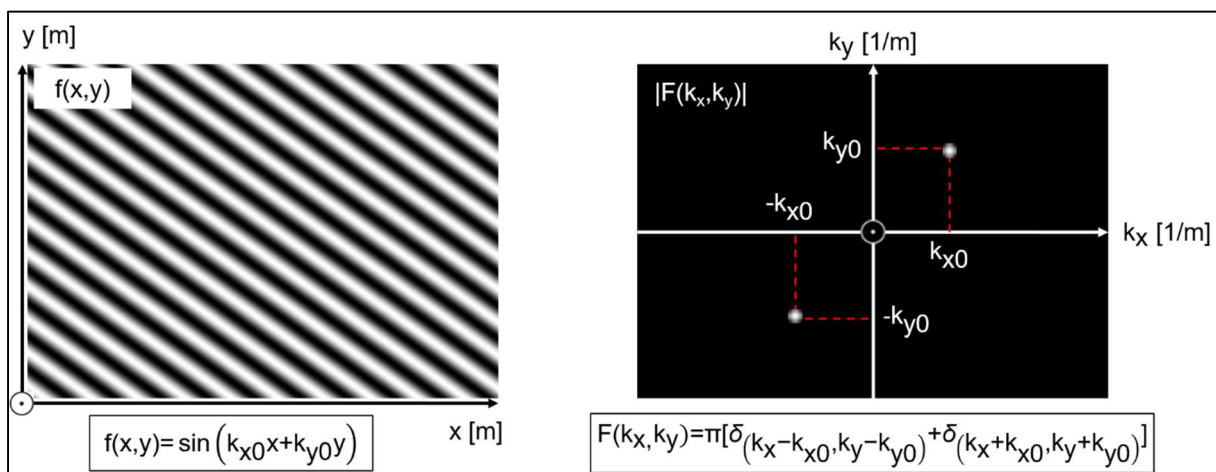


Abbildung 3.5: Bild mit sinusförmiger Streifenverteilung auf der xy-Ebene nach der Gleichung links und entsprechendes, geschiftetes⁶⁷ Fourier Amplitudenbild mit Gleichung rechts; δ entspricht in dieser Abbildung der Dirac-Verteilung. Im Fourier Amplitudenbild wird deutlich, dass das Bild eine Schwingung mit Wellenzahl in xy-Richtung enthält. Die Anteile sind rot gestrichelt markiert. Der erste Quadrant oben rechts zeigt die Amplitude für die positiven Frequenzen an, der dritte Quadrant unten links die Amplitude für negative Frequenzen. Letztere hat keine physikalische Bedeutung. Niederfrequente Anteile werden in der Bildmitte angezeigt, höherfrequente Anteile liegen zum Bildrand hin.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

Das Streifenbild nach Abbildung 3.5 links besitzt eine Wellenzahl mit x- und y-Anteil. Beim komplexwertigen Fourier Bild wird in den meisten Fällen das rechts dargestellte Fourier Amplitudenbild ausgewertet. Es enthält auch hier den relevanten Informationsgehalt. Das Fourier Phasenbild ist, zumindest zur visuellen Auswertung, oftmals ungeeignet. Die typische Darstellung des Fourier Bildes erfolgt in *geshifeter*⁶⁷ Form. Das heißt es besteht aus vier Quadranten, wobei der obere rechte die mathematisch-positiven Werte enthält. Niederfrequente Anteile werden in der Bildmitte wiedergegeben, höherfrequente Anteile liegen zum Bildrand hin. Die im Bild enthaltene Wellenzahl wird im Fourier Amplitudenbild an der entsprechenden Stelle für den Anteil in x- und in y-Richtung als weißer Punkt wiedergegeben. Darüber hinaus ergibt sich für die geshiftete Darstellung immer punktsymmetrisch zum Ursprung ein Punkt gleicher Amplitude⁶⁸ für die Wellenzahlen mit umgekehrtem Vorzeichen. Dieser zweite Punkt ist dem ersten gleichwertig und ergibt sich mathematisch⁶⁹. Physikalisch hat er keine Bedeutung.

Abbildung 3.6 zeigt erneut den Vorteil der Fourier Transformation bzgl. der Aussagekraft bei der Analyse von Schwingungsanteilen. Das Bild links zeigt ein Muster horizontal etwas in die Länge gezogener Punkte mit Gauß-Intensitätsverteilung. Aus der dazugehörigen Gleichung wird ersichtlich, dass das Muster durch die Überlagerung zweier Schwingungen zustande kommt, eine mit Wellenzahl in x-Richtung und eine mit Wellenzahl in y-Richtung. Das Fourier Amplitudenbild zeigt die beiden Schwingungsanteile klar an. Der Amplitudenausschlag (positiv und negativ) der horizontal verlaufenden Schwingung liegt näher an der Bildmitte, was die niedrigere Frequenz durch die horizontal langgezogenen Punkte widerspiegelt.

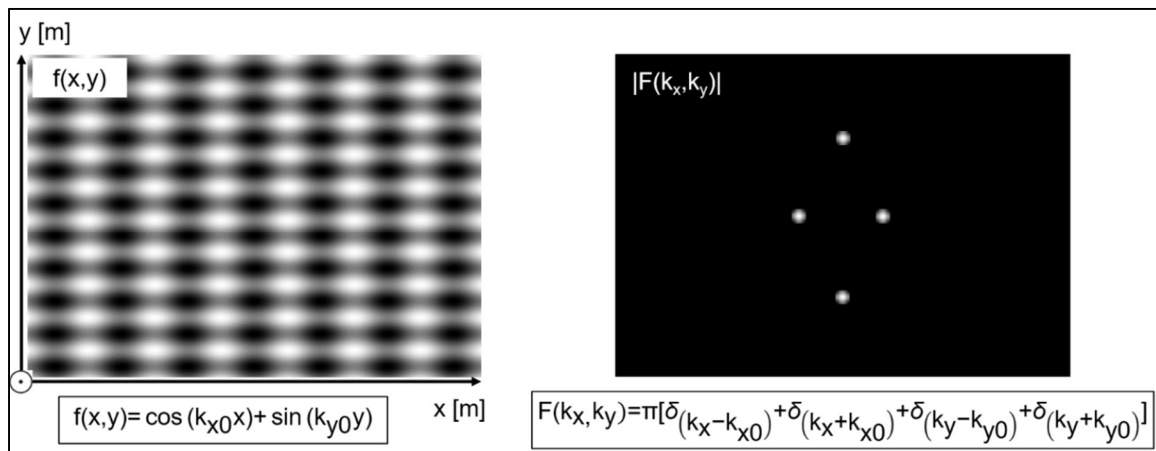


Abbildung 3.6: Bild eines Punktemusters mit Gauß-förmiger Intensitätsverteilung auf der xy-Ebene nach der Gleichung links und entsprechendes, geshiftetes⁶⁷ Fourier Amplitudenbild mit Gleichung rechts; δ entspricht in dieser Abbildung der Dirac-Verteilung. Im Fourier Amplitudenbild wird deutlich, dass das Bild aus der Überlagerung zweier Schwingungen je mit Wellenzahl in x- und in y-Richtung besteht. Die Achsen und Kennwerte im Fourier Amplitudenbild rechts wurden zur besseren Übersicht nicht dargestellt, vgl. ggf. Abbildung 3.5. Die eher niederfrequente Schwingung im Bild in x-Richtung wird im Fourier Amplitudenbild durch die zwei Punkte auf der Horizontalen nahe der Bildmitte repräsentiert. Die eher hochfrequente Schwingung im Bild in y-Richtung wird durch die zwei Punkte auf der Vertikalen näher am Bildrand repräsentiert.

Umgekehrt zum Fall oben wird ein Bild mit sprunghafter Verteilung im Fourier Amplitudenbild durch eine sinusförmige Verteilung beschrieben, wie Abbildung 3.7 zeigt. Je „schärfer“ die Kanten von hell

⁶⁷ Typische Umorganisation der Quadranten zur eindeutigeren Visualisierung ([59] S. 89).

⁶⁸ Und Phase mit umgekehrtem Vorzeichen.

⁶⁹ Bei typischen Darstellungen der eindimensionalen Fourier Transformation, s. Kapitel 3.2.a und 3.2.b oben, werden die negativen Frequenzbereiche nicht abgebildet.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

nach dunkel und je näher beieinander die Übergänge von schwarzen und weißen Bereichen im Bild, desto mehr hochfrequente Anteile mit hoher Amplitude sind im Fourier Amplitudenbild zu finden. Dies wird besonders anhand des Rechtecksprungs deutlich, der horizontal „kürzer“ bzw. höherfrequent als in der Vertikalen ausgeführt ist. Dadurch ruft er im Fourier Amplitudenbild eine starke Intensitätsverteilung auf der Horizontalen hervor. Das Phänomen ist gleichbedeutend für den eindimensionalen Fall bei der Zusammensetzung einer Rechteckfunktion, vgl. Abbildung 3.1.

Vorgreifend sei angemerkt, dass dieses Phänomen ebenfalls bei der Rücktransformation aus dem Fourier Bereich auftritt, sofern „scharfkantig“ maskiert wird, vgl. Abbildung 3.9 unten. Dies kann störende Effekte im Synthese-Ergebnis hervorrufen. Abhilfe wird geschaffen, indem der maskierte Anteil vor der Rücktransformation zusätzlich mit einer Gauß-Gewichtung versehen wird. Die so erreichbare Steigerung der Interferenzphasen-Qualität bei der Anwendung für SPS mit Trägerfrequenz wird in ([79] Kapitel 7.4) gezeigt. Dies wird ebenfalls bei der eigenen Softwareentwicklung umgesetzt, s. Kapitel 5.5.

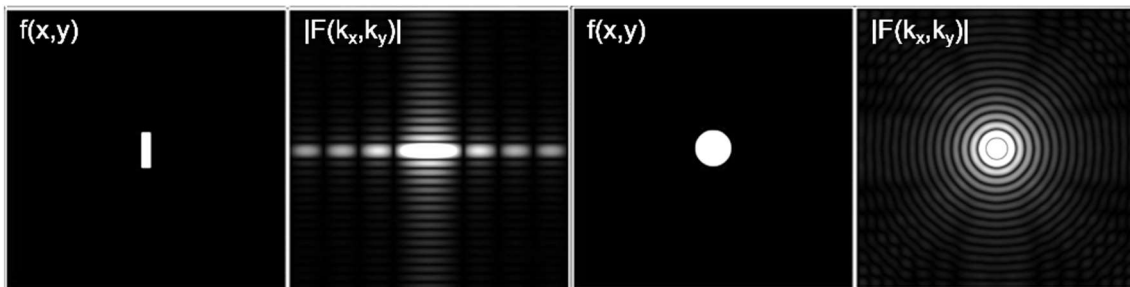


Abbildung 3.7: Bild einer rechteckigen (links) und kreisförmigen (mittig rechts) Sprungfunktion und ihre Fourier Amplitudenbilder (mittig links bzw. rechts) in logarithmischer Darstellung; die „scharfen“ Kanten von schwarz nach weiß im Bild werden aus einer Vielzahl hochfrequenter Schwingungsanteile mit höherer Amplitude zusammengesetzt. Aus diesem Grund existiert eine Fülle an Grauwerten im gesamten Fourier Amplitudenbild. Besonders die nahe aneinander liegenden, vertikalen Kanten des Rechtecksprungs rufen viele hochfrequente Anteile mit hoher Amplitude hervor. Die Verteilungen folgen ähnlichen Gesetzen wie die entstehenden Muster von monochromatischem Licht beim Durchlaufen von Blenden. Gekoppelt ist dieses Phänomen über die sog. Fourier-Optik, s. auch Kapitel 2.2.c.

Die Gleichungen ([59] S. 83) für die zweidimensional-ortsabhängige Fourier Transformation sind Erweiterungen der Gleichungen für den eindimensionalen Fall, s. auch Kapitel 3.2.b. Eine Funktion abhängig von zwei räumlichen Variablen, also ein Bild, wird nach Fourier beschrieben durch Gleichung 3.10.

$$f(x,y) = \sum_{k_x=-\infty}^{\infty} \sum_{k_y=-\infty}^{\infty} (c_{k_x} c_{k_y} e^{i(k_x x + k_y y)}) \quad (3.10.)$$

Mit

$f(x,y)$ = Zweidimensional-ortsabhängige Funktion

k_x = Wellenzahl in x-Richtung

k_y = Wellenzahl in y-Richtung

c_{k_x} = Fourier-Koeffizient für komplexe Schwingungsanteile in x-Richtung

c_{k_y} = Fourier-Koeffizient für komplexe Schwingungsanteile in y-Richtung

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

Die entsprechende Fourier Transformierte beschreibt Gleichung 3.11, die inverse Fourier Transformation Gleichung 3.12

$$F(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3.11.)$$

Mit

$F(k_x, k_y)$ = Zweidimensional-wellenzahlabhängige Fourier Transformierte

dx = Ortsdifferential in x-Richtung

dy = Ortsdifferential in y-Richtung

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (3.12.)$$

Mit

dk_x = Frequenzdifferential in x-Richtung

dk_y = Frequenzdifferential in y-Richtung

Die im Rahmen dieser Arbeit wichtigsten Eigenschaften der Fourier-Transformation bzgl. ihrer Anwendung werden im Folgenden kurz beschrieben ([59] S. 86 ff.).

- Linearität: Die Fourier-Transformierte der Summe von Ortsfunktionen ist gleich der Summe der Fourier-Transformierten der Ortsfunktionen. Dies wird bei der Aufbringung der Trägerfrequenz ausgenutzt, s. Kapitel 3.2.e unten.
- Symmetrie: Das Fourier Bild ist Mittelpunkt⁷⁰-symmetrisch für positive und negative Frequenzen, s. auch Abbildung 3.5.
- Rotation: Eine Drehung der Bildfunktionen verursacht dieselbe Drehung der Fourier Bildfunktion, vgl. auch Abbildung 3.5 mit Abbildung 3.6.
- Verschiebung: Eine Verschiebung der Bildfunktion bewirkt eine lineare Phasenverschiebung im Fourier Bild. Dies muss für Messungen in der Bewegung beachtet werden, s. auch Kapitel 5.2.c (Handmessung Interferoskop).

Am Rande sei auch die einfachere bzw. schnellere Berechnung von Faltungen und Korrelationen im Fourier Bild genannt.

3.2.d. Angewandte Fourier-Transformation am Bild

In der praktischen Digitaltechnik wird nicht, wie oben behandelt, mit harmonischen Funktionen, sondern mit endlichen Mengen diskreter Werte gearbeitet, wie Gleichung 3.13 beschreibt.

⁷⁰ Bei der geshifteten Darstellung, s. auch ([59] S. 89).

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

$$f(x,y) = \begin{pmatrix} f_{0,0} & f_{1,0} & \cdots & f_{m,0} & \cdots & f_{M_S-1,0} \\ f_{0,1} & f_{1,1} & & & & f_{M_S-1,1} \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ f_{0,n} & & & f_{m,n} & & f_{M_S-1,n} \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ f_{0,N_Z-1} & f_{1,N_Z-1} & \cdots & f_{m,N_Z-1} & \cdots & f_{M_S-1,N_Z-1} \end{pmatrix} \quad (3.13.)$$

Mit

$f_{m,n}$ = Diskreter Funktionswert $\in \mathbb{N}_0$ an der Stelle (m,n)

m = Zählwert in x-Richtung $\in \mathbb{N}_0$

M_S = Matrix-Spaltenanzahl

n = Zählwert in y-Richtung $\in \mathbb{N}_0$

N_Z = Matrix-Zeilenzahl

Gleichung 3.14 beschreibt die entsprechende Fourier Transformierte, Gleichung 3.15 die inverse Fourier Transformierte.

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{M_S N_Z} \sum_{x=0}^{M_S-1} \sum_{y=0}^{N_Z-1} f(x,y) \cdot e^{-2\pi i \left(\frac{k_x x}{M_S} + \frac{k_y y}{N_Z} \right)} \quad (3.14.)$$

$$f(x,y) = \sum_{k_x=0}^{M_S-1} \sum_{k_y=0}^{N_Z-1} F(k_x, k_y) \cdot e^{2\pi i \left(\frac{k_x x}{M_S} + \frac{k_y y}{N_Z} \right)} \quad (3.15.)$$

Abbildung 3.8 zeigt die Fourier-Transformation einer Digital-Fotografie als praktisches Beispiel der Anwendung. Im Vergleich zu den bisher gezeigten Abbildungen zeigt das Fourier Amplitudenbild hier eine komplizierte, jedoch typische Ausprägung. Anhand der globalen Grauwertverteilung des Fourier Amplitudenbildes ist erkennbar, dass im Bild unterschiedlichste Frequenzanteile mit variierender Stärke enthalten sind. Niederfrequente Anteile sind typischerweise stark vertreten, was an dem lokal hellen Bereich in der Mitte des Fourier Amplitudenbildes erkennbar ist. Aus diesem Grund ist die Darstellung des Amplitudenbildes logarithmisch gewählt, um höherfrequente Anteile visuell erkennbar zu machen. Im Fourier Amplitudenbild können verschiedene linienhafte Bereiche mit stärkerem Amplitudenanteil über ein ganzes Frequenzband (vom Mittelpunkt bis zum Rand) ausgemacht werden. Jedoch können nur die beiden farblich markierten Bereiche den entsprechend markierten Bereichen im Bild ohne Weiteres zugeordnet werden. Hier liegen regelmäßige Intensitätsschwingungen vor, bedingt durch die Struktur von Dachziegeln mit winkliger Anordnung entsprechend der eingezeichneten Pfeile im Bild. Die eher nicht-sinusförmigen Ortsschwingungen verursachen die breiten Linien im Fourier Amplitudenbild. Ein besonderes Phänomen bei Digitalbildern sind die ausgeprägten Linien auf der Horizontalen und Vertikalen⁷¹ des Fourier Amplitudenbildes. Diese werden verursacht durch die sprunghafte Bildabtastung aufgrund der quadratischen Kamerapixel. Resultat dessen sind ausgeprägte Oberschwingungsanteile in den entsprechenden Richtungen, welche bei der Bildanalyse meist als störend empfunden werden. Eine typische technische Anwendung der Fourier-Transformation bei Bildern ist

⁷¹ Die Linie auf der Vertikalen ist hier nicht gut sichtbar aufgrund der Überlagerung mit dem rot markierten Spektrum.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

die Bildoptimierung mittels FFT Analyse, Filterung bzw. Maskierung von gewissen Spektren und FFT Synthese. Für weiterführende Informationen sei auf [59] verwiesen.

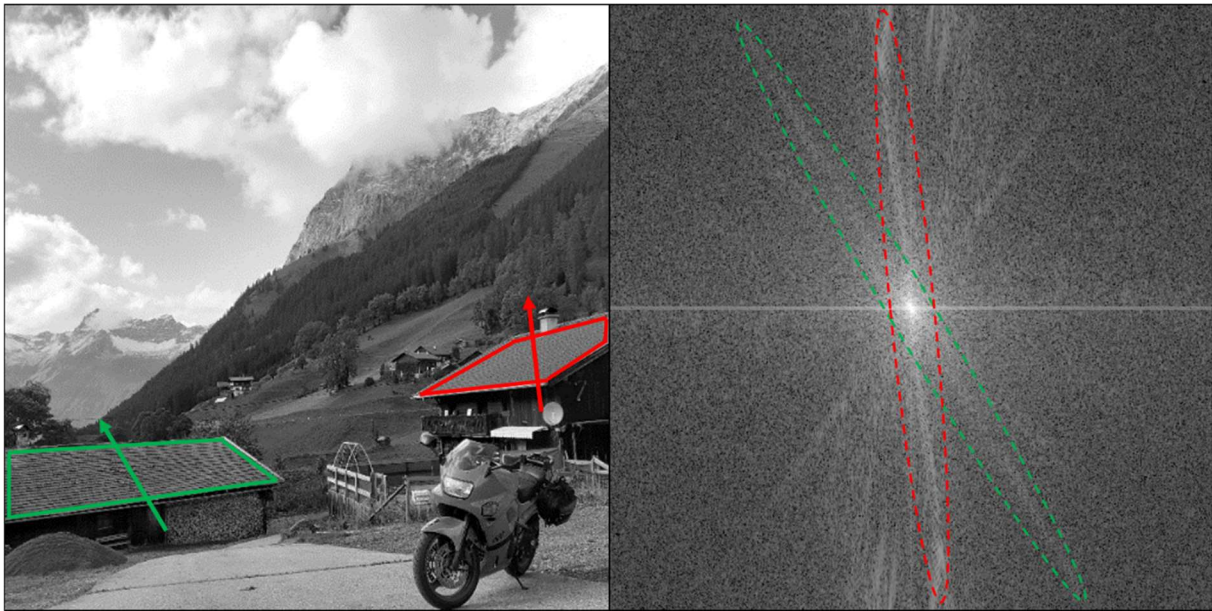


Abbildung 3.8: Digitale Fotografie eines Motorrads in den Alpen; die FFT Analyse (Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung) deutet auf ein ausgeprägtes Frequenzspektrum hin, ersichtlich durch die lokale Grauwertverteilung. Dennoch sind zum Großteil niederfrequente Schwingungen enthalten, erkennbar am lokalen, hellen Bereich in der Amplitudenbildmitte. Die zwei farblich markierten Frequenzspektren können den regelmäßigen Strukturen von jeweils winklig liegenden Dachziegeln im Bild zugewiesen werden (hier ggf. nicht mehr ausreichend lateral aufgelöst). Die Bildbereiche sind entsprechend farblich markiert und die jeweilige Schwingungsrichtung mittels Pfeil angedeutet. Ein Phänomen der digitalen Fotografie ist der weiße Streifen auf der Horizontalen (und auf der Vertikalen) im Amplitudenbild. Dieser resultiert aus der sprunghaften Bildabtastung aufgrund der quadratischen Pixel, was stark ausgeprägte Oberfrequenzanteile hervorruft.

Eine Anwendung der Fourier-Transformation für Bilder im Bereich der ZfP zeigt Abbildung 3.9. Anhand der Fotografie eines NFK Bauteils werden mittels FFT Bildanalyse und gefilterter Synthese spezielle, separierte Zusatzinformationen aufbereitet. Das Amplitudenbild und das Phasenbild für ein Frequenzspektrum werden bewertet, mit der ursprünglichen Fotografie verglichen und der Mehrwert beschrieben. Die Auswertung wird beispielhaft geführt ohne Anspruch auf eine genaue Evaluation. Details können der ausführlichen Bildbeschriftung entnommen werden. Diese Art der Faseranalyse wird industriell auf hohem Niveau betrieben. Als weiterführende Quelle wird auf [88] vom Fraunhofer IZfP verwiesen.

Für den weiteren Verlauf der Arbeit steht die FFT Bildanalyse (und Synthese) von Specklefotografien im Fokus. Abbildung 3.10 zeigt die Beschaffenheit des Fourier Amplitudenbildes für ein laserbeleuchtetes Messobjekt. Die Besonderheit hierbei ist die statistische Verteilung des Specklemusters, welche einem umfangreichen Spektrum an Ortsfrequenzen entspricht. Das Amplitudenbild spiegelt dies durch den globalen Grauwert wider.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

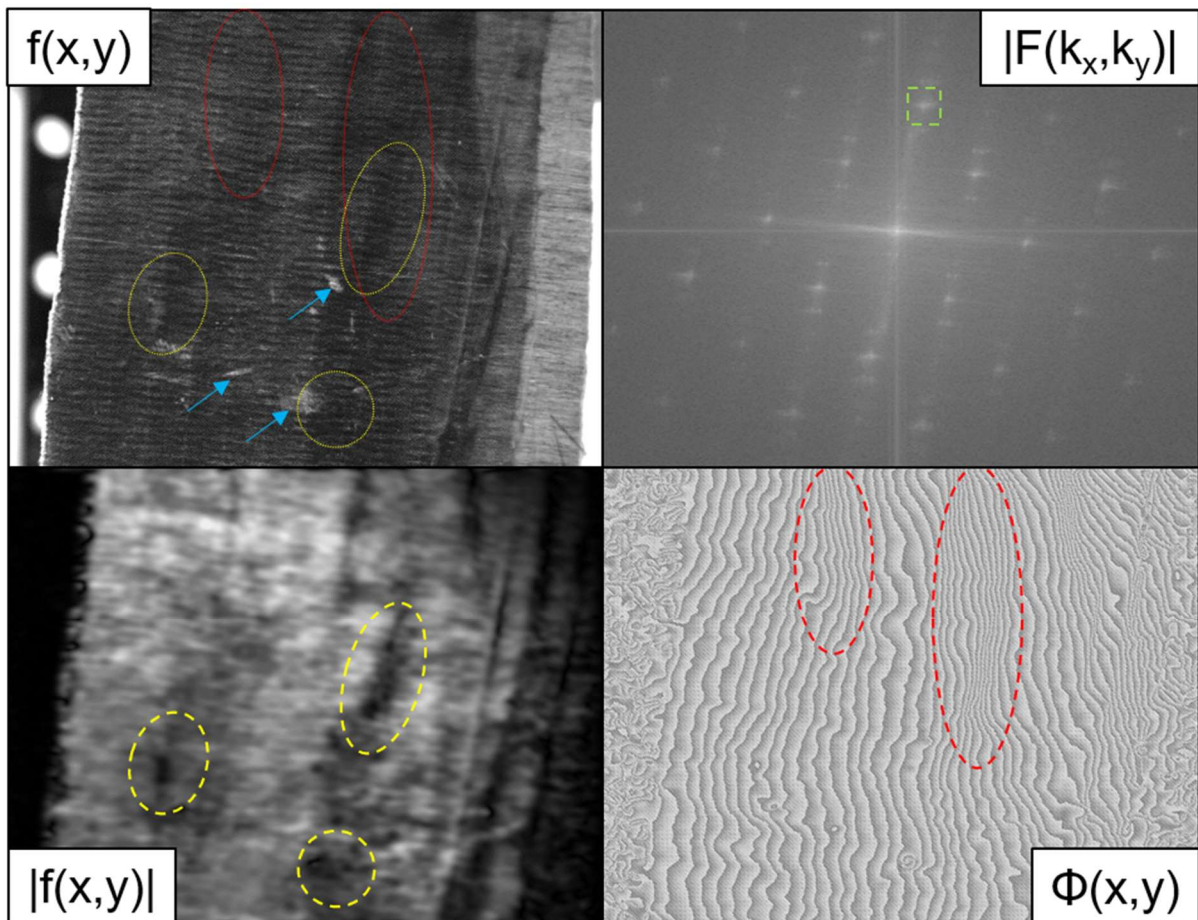


Abbildung 3.9: Einfache Faseranalyse mittels FFT Bildauswertung; bw Fotografie eines NFK Bauteils oben links; das Intensitätsbild zeigt oberflächliche Fehlstellen (s. blaue Pfeile); das Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung oben rechts zeigt annähernd punktförmige, lokale Ortsfrequenzspektren an, bedingt durch die Faserstruktur des Bauteils. Ein Grundfrequenz-Spektrum mit hohem k_y Anteil (s. grünes Rechteck) wird maskiert für die Rücktransformation. Das Bauteil wurde für die digitale Fotografie bewusst rotiert, damit sich die interessanten Spektren nicht mit den Störanteilen der Horizontalen und Vertikalen überlagern. Entsprechend der Maskierung im Fourier Amplitudenbild (oben rechts) gefiltertes, rücktransformiertes Amplitudenbild unten links; die dunklen Stellen (s. gelbe Kreise) markieren Bereiche, in denen die Amplitude des maskierten Ortsfrequenzspektrums nur schwach vertreten ist, ggf. aufgrund einer verdrückten Bauteiloberfläche. Dies ist auf der Fotografie aufgrund der Überlagerung mit vielen weiteren Ortsfrequenzanteilen nicht ohne weiteres erkennbar (vgl. oben links). Rücktransformiertes, gefiltertes Phasenbild unten rechts; es sind Bereiche erhöhter Streifenkonzentration erkennbar (s. rote Kreise), in denen die Phase des maskierten Ortsfrequenzspektrums stärker ansteigt, ggf. aufgrund von Faserstauchungen bei der händischen Fertigung des Bauteils. Dies ist auf der Fotografie aufgrund der Intensitätsschwankungen nicht ohne weiteres erkennbar (vgl. oben links).

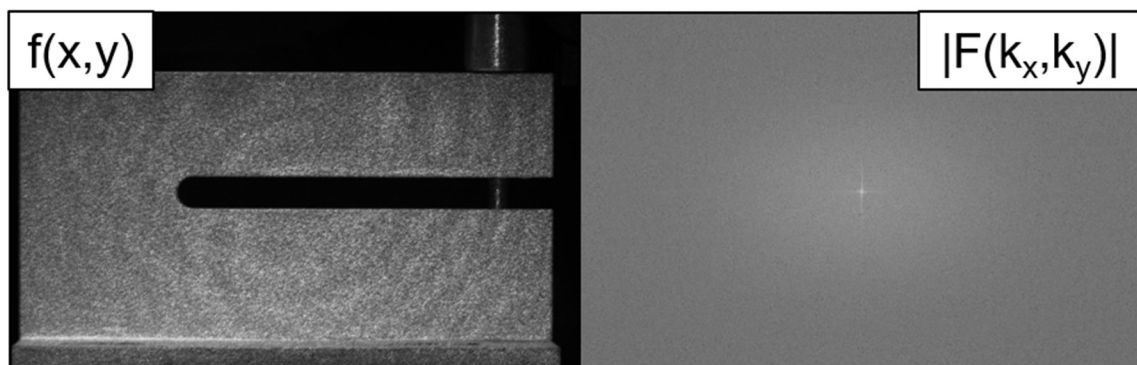


Abbildung 3.10: Bild mit Speckles (links) und dazugehöriges Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung (rechts); das statistisch-verteilte Specklemuster ergibt die (logarithmisch) nahezu homogene Amplitude (globaler Grauwert) über das gesamte Spektrum des Fourier Bildes (vgl. zu Abbildung 3.8).

3.2.e. Grundlagen der Trägerfrequenzmethode

Die Trägerfrequenzmethode wird verwendet, um ein Nutzsignal möglichst effizient zu transportieren. Das heißt ohne die zusätzlich aufgebrachte Trägerfrequenz-Modulation wäre die Reichweite⁷² des Nutzsignals stark begrenzt. Es handelt sich um eine etablierte Methode der Kommunikationstechnik, wobei zwischen Amplitudenmodulation (AM) und Frequenzmodulation (FM) unterschieden wird ([89] S. 283 f.), wie Abbildung 3.11 schematisch aufzeigt. Am Empfangsort des Signals muss die Trägerfrequenz wieder auf eine entsprechende Art demoduliert werden, was im Bereich der Speckle-Interferometrie jedoch entfällt.

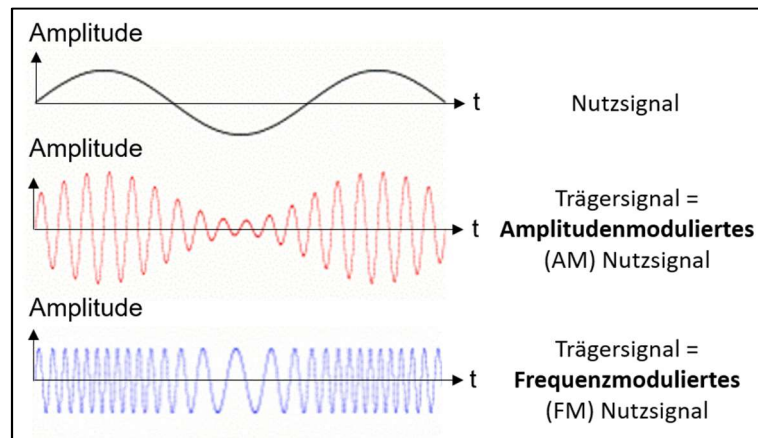


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung eines Nutzsignals (oben), das durch Amplitudenmodulation (mittig) oder Frequenzmodulation (unten) zum Trägersignal aufbereitet wird; auf diese Weise (Trägerfrequenzmethode genannt) kann die Effizienz des Nutzsignal-Transports erhöht werden.

Im Bereich der optisch-interferometrischen Messtechnik ist das Nutzsignal die Bildintensität des Specklemusters. Dementsprechend wird als Trägerfrequenz eine Intensitätsmodulation aufgebracht, wie Abbildung 3.12 aufzeigt. Dabei handelt es sich speziell um die Modulation des kohärenten Lichtanteils, ab sofort auch *kohärente Intensitätsmodulation* (KIM) genannt. Die Physik bei der Aufbringung der KIM wird im folgenden Kapitel für die speziellen Messaufbauten gezeigt.

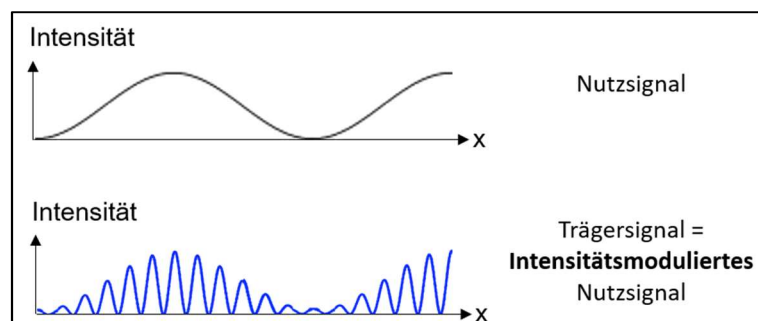


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung eines optisch-erfassten Nutzsignals (oben), das durch Intensitätsmodulation (unten) zum Trägersignal aufbereitet wird.

⁷² Beispiel: Die hochfrequente Kurzwellen (Trägersignal) beim Funken wird an den Ionosphärenschichten der Erdoberfläche reflektiert. Erst dadurch hat Funk eine sehr hohe Reichweite.

3.3. Optische Aufbauten entsprechend dem Ausgangspunkt der Weiterentwicklungen

Im Folgenden werden die SPS Aufbauten für oop ESPSI, ip ESPSI, dual-shear ESPSI, oop ESPI und ip ESPI nach der FFT Trägerfrequenzmethode (CF) vorgestellt, die die Ausgangspunkte dieser Arbeit sind. Der oop DS Aufbau dient dabei als Basis, da mit ihm viele der modernen Messaufgaben gelöst werden können, sofern er praxistauglich weiterentwickelt wird. Die Wahl des jeweiligen Aufbaus mit dem höchsten Potential für die Praxis wird kurz begründet. Anschließend wird das Verfahren beschrieben. Die Vor- und Nachteile verglichen zum entsprechenden TPS Aufbau (s. Kapitel 2.4) werden abschließend erörtert.

3.3.a. MI FFT CF SPS oop ESPSI

Der im Jahre 2013 von Xie et al. entwickelte Michelson-Interferometer FFT Trägerfrequenz Einfachblenden-Aufbau für out-of-plane Speckle-Shearografie mit räumlichem Phasenschieben ([85], [86]), kurz MI FFT CF SPS oop ESPSI, hat sich gegenüber anderen Methoden (s. Kapitel 3.1 oben) als äußerst robust erwiesen. Er dient somit als Grundlage der Weiterentwicklungen in dieser Arbeit. Seine Funktionalität wird anhand der schematischen Abbildung 3.13 beschrieben. Dem bekannten shearografischen MI Aufbau (vgl. Kapitel 2.4.b.) wird zusätzlich eine Blende vorgeschaltet. Diese verursacht eine Beugung des gesamten Lichts beim Eintritt in den Sensor, wodurch die Kamera ein sehr grobkörniges Speckle-Muster erfasst, wie Abbildung 3.14 links zeigt. Die beiden am Strahlteiler entstehenden Wellenfronten werden durch die Einstellung des Shearwinkels gegeneinander verkippt. Infolgedessen entsteht ein in Shearrichtung linearer Gangunterschied der Fronten. Dieser macht sich durch eine dem groben Speckle-Muster überlagerte räumliche Trägerfrequenz bemerkbar, vgl. Abbildung 3.14 rechts. Dabei handelt es sich um eine KIM, welche ausschließlich den kohärenten Lichtanteil beeinflusst. Der inkohärente Lichtanteil bleibt unbeeinflusst.

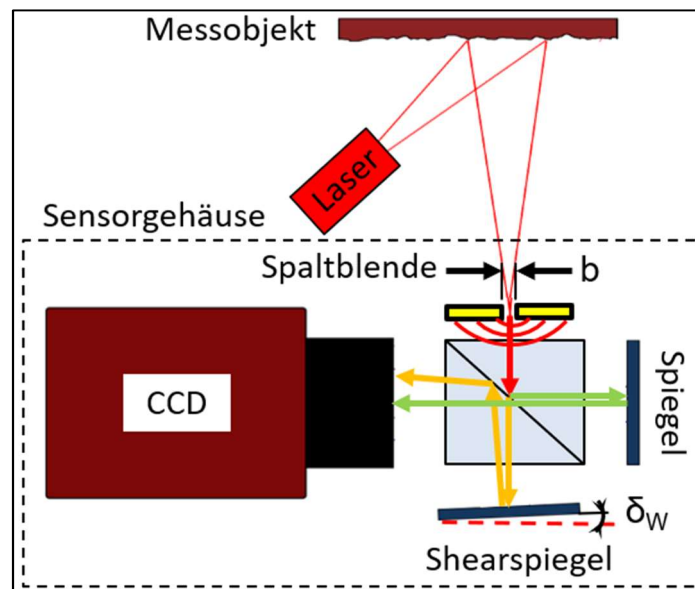


Abbildung 3.13: Michelson-Interferometer Aufbau für SPS ESPSI nach der FFT Trägerfrequenzmethode⁷³; durch die vorgeschaltete Blende wird eine Lichtbeugung hervorgerufen, die das Ortsfrequenzspektrum begrenzt. Durch den Shearwinkel wird die KIM verursacht, wodurch ein Trägersignal mit höheren Ortsfrequenzanteilen entsteht.

⁷³ Die variierenden Farben des Lichtstrahlengangs in dieser sowie folgenden Abbildungen wurden lediglich aus Anschaulichkeitsgründen gewählt und stehen nicht im Zusammenhang mit der Wellenlänge.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

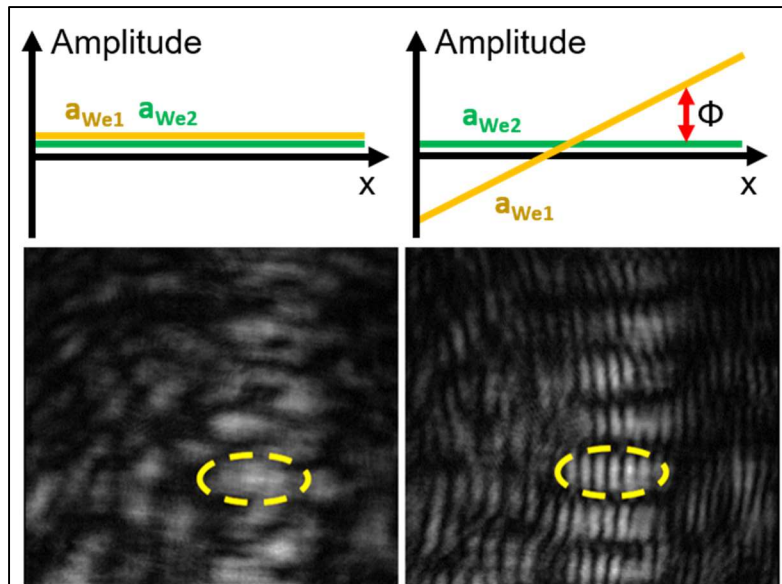


Abbildung 3.14: Bildaufnahme des grobkörnigen Speckle-Musters hinter der Blende ohne vershearte Wellenfronten (links); ein Speckle wurde zum Vergleich gelb eingekreist. Bildaufnahme des Speckle-Musters mit KIM aufgrund der Verkipfung der beiden Fronten durch den Shearspiegel (rechts); der eingekreiste Speckle weist nun eine überlagerte Trägerfrequenz in x-Richtung auf. Der jeweilige Gangunterschied der beiden Fronten ist schematisch über den Bildaufnahmen dargestellt.

Abbildung 3.15 links zeigt das Fourier Amplitudenbild des grobkörnigen Specklemusters nach dem Durchlaufen einer vertikalen Spaltapertur. In diesem Falle werden die Speckles ausschließlich horizontal gebeugt, wobei die Ortsfrequenzen in diese Richtung kleiner werden. Somit weist das Fourier Amplitudenbild ein entsprechend spaltförmiges Spektrum auf, welches als Hintergrundlichtspektrum oder kurz Hintergrundspektrum S bezeichnet wird. Die Begrenzung des Specklemuster-Spektrums (vgl. zu Abbildung 3.10) im Fourier Bild ist eine Notwendigkeit bei der Trägerfrequenzmethode, die den folgenden Schritt ermöglicht. Abbildung 3.15 rechts zeigt das Fourier Amplitudenbild des gebeugten Specklemusters mit Trägerfrequenz, verursacht durch die Shearspiegel-Verkipfung. Es weist weiterhin das Hintergrundspektrum mittig auf, aus dem jedoch nun die beiden sog. Trägerfrequenzspektren oder Trägerspektren S' und $-S'$ herausgeschoben⁷⁴ wurden. Sie geben denjenigen Bildanteil wieder, der aufgrund der KIM höhere Ortsfrequenzen aufweist. Demnach beinhaltet das Hintergrundspektrum nur denjenigen Bildanteil, der durch das inkohärente Licht beschrieben wird.

Wie oftmals in der Literatur verwendet, werden ab sofort die Ortsfrequenzen statt der Wellenzahlen für die Betrachtungen im Fourier Bild herangezogen. Gleichung 3.16 gibt die einfache Beziehung wieder. Da im Rahmen der Arbeit aufgezeigt wird (s. Kapitel 4.1.c), dass eindimensionale Anwendungen bei der Generierung der Trägerfrequenz zielführend sind, wird die Nomenklatur ab sofort entsprechend vereinfacht und die Trägerfrequenz in x-Richtung nicht als f_{x0} bezeichnet, sondern lediglich als f_0 .

$$k_x = 2\pi f_x \quad \text{und} \quad k_y = 2\pi f_y \quad (3.16.)$$

Mit

f_x = Ortsfrequenz in x-Richtung

f_y = Ortsfrequenz in y-Richtung

⁷⁴ Die Verschiebung ist linear zur Shearspiegel-Verkipfung beobachtbar. Vgl. auch: Phasenschieben.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

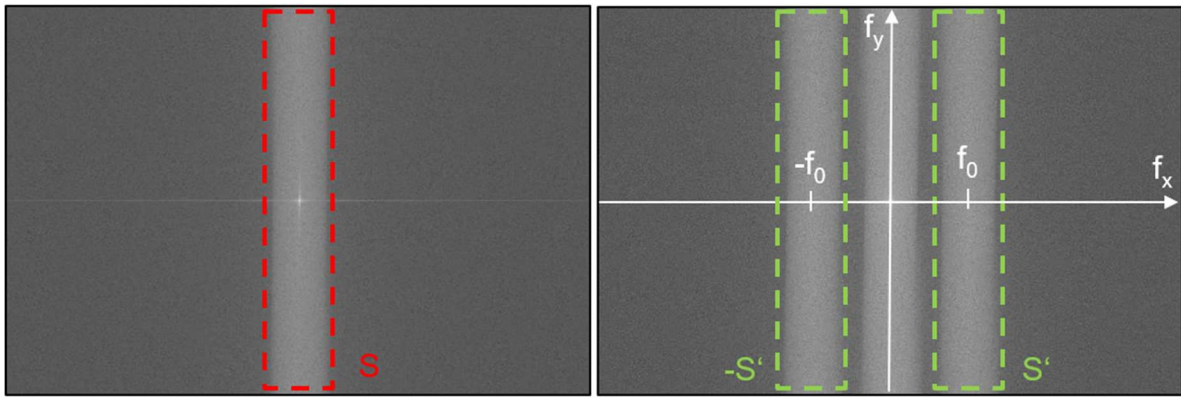


Abbildung 3.15: Fourier Amplitudenbilder in logarithmischer Darstellung; links für ein Specklemuster nach Lichtbeugung am vertikalen Spalt (Darstellung aus Anschaulichkeitsgründen ohne Achsenbeschriftungen), wodurch sich das horizontal begrenzte Hintergrundspektrum S abzeichnet (rot umrandet); rechts mit zusätzlicher Beaufschlagung des gebeugten Specklemusters mit einer Trägerfrequenz, wodurch sich die beiden Trägerspektren zeigen (grün umrandet); die erfolgte Entkopplung des kohärenten Lichtanteils vom inkohärenten Anteil ermöglicht die erwünschte Interferenzphasenberechnung, s. Text.

Die Entkopplung der Lichtanteile auf diese Art und Weise ist gleichbedeutend mit der Lösung der allgemeinen Interferometrie-Gleichung 3.17 (s. auch Kapitel 2.2.b). Hier erfolgt dies durch eine räumliche Verschiebung der Interferenzphase hin zu höheren Ortsfrequenzen.

$$I = I_0 + I_0 \gamma \cos \Phi \quad (3.17.)$$

Mit

I = Intensität

I_0 = Hintergrundintensität

γ = Interferenzkontrast, auch Lasermodulation genannt

Φ = Interferenzphase

Mittels iFFT der komplexwertigen Trägerspektren in einer Bildaufnahme können alle Unbekannten der Gleichung berechnet werden. Das eher irrelevante Amplitudenbild des Hintergrundspektrums, die Hintergrundintensität, ergibt sich nach Gleichung 3.18. Das Amplitudenbild des Trägerspektrums, die gewichtete Lasermodulation, ergibt sich nach Gleichung 3.19. Das Phasenbild des Trägerspektrums, also die erwünschte Interferenzphase, ergibt sich nach Gleichung 3.20. Der darin noch enthaltene Trägerphasenanteil bleibt während der Messung konstant und wird daher bei der Differenzphasenberechnung eliminiert. Weitere, aufbauspezifische Gleichungen werden hier nicht aufgeführt. Es sei auf [85] und ([79] Kapitel 7) verwiesen. Stattdessen werden die physikalischen Gegebenheiten bei der Einstellung der Trägerfrequenz in Kapitel 4.1.b neu aufbereitet und direkt für die Weiterentwicklungen vorgestellt. Abbildung 3.16 zeigt den allgemeinen Messablauf für FFT CF SPS DS schematisch. Verglichen zum TPS werden mit SPS nur 2 statt 8 Bildaufnahmen für die Differenzphasenberechnung benötigt (vgl. Kapitel 2.5.b., Abbildung 2.25 auf S. 47). Eine Berechnung ist von daher im Videotakt der eingesetzten Kamera möglich.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

$$I_0 = \sqrt{\text{Re}(S)^2 + \text{Im}(S)^2} \quad (3.18.)$$

$$I_0 Y = \sqrt{\text{Re}(S')^2 + \text{Im}(S')^2} \quad (3.19.)$$

$$\Phi + 2\pi f_0 = \arctan\left(\frac{\text{Im}(S')}{\text{Re}(S')}\right) \quad (3.20.)$$

Mit

S = Hintergrundspektrum

S' = Trägerspektrum

f_0 = Trägerfrequenz

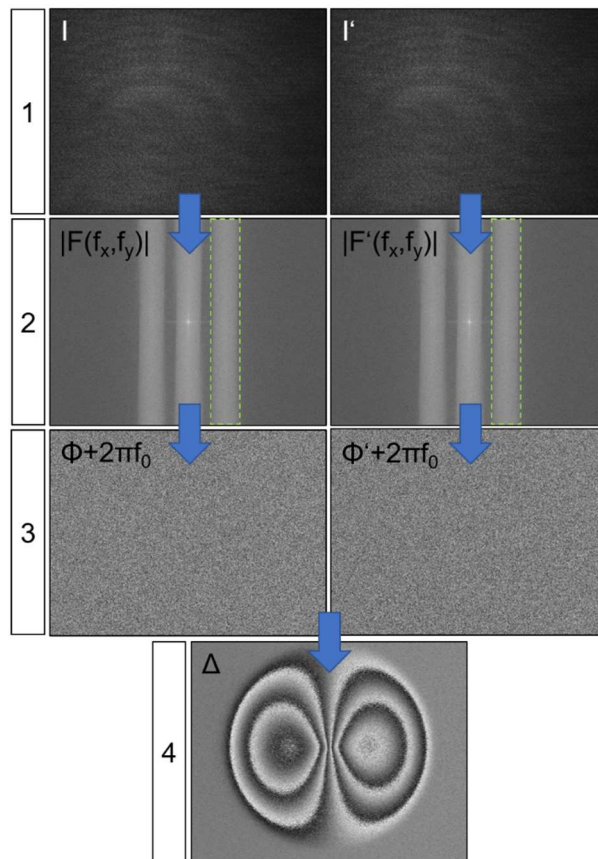


Abbildung 3.16: Die beiden Intensitätsbildaufnahmen des Messobjekts im Grundzustand I und im angeregten Zustand I' (erste Zeile) werden durch einen optischen Shearografie-Aufbau für FFT CF SPS erfasst. Mittels Fourier Analyse der Bilder lässt sich jeweils die Trägerfrequenz im Amplitudenbild $|F|$ bzw. $|F'|$ auffinden (zweite Zeile) und zur Interferenzphase Φ bzw. Φ' rücktransformieren (dritte Zeile). Bei der Berechnung der Differenzphase Δ aus den beiden Interferenzphasen subtrahiert sich die Trägerfrequenzphase $2\pi f_0$ selbstständig heraus (vierte Zeile).

Vor- und Nachteile von MI FFT CF SPS DS vgl. zu MI 4-bucket TPS DS

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile des SPS DS Aufbaus, verglichen zum etablierten TPS DS Aufbau, jeweils mit sinkender Priorität aufgeführt. Bezüglich der Eliminierung der Nachteile wird bereits auf die relevanten Kapitel der Weiterentwicklungen verwiesen.

- + **Erhöhte Messgeschwindigkeit:** Durch SPS werden Messungen im Videotakt der Kamera möglich. Störeinflüsse können sich nur im Zeitraum der kurzen Belichtungszeit auswirken. Die Verfahrensrobustheit ist stark gesteigert. Zudem ergeben sich neue Möglichkeiten bzgl. dynamischer Anregung und ein erhöhter Tiefenmessbereich, s. Kapitel 2.6.d. und 2.6.e.
- + **Fremdlichtunabhängig:** Einflüsse von Hintergrundlicht wirken sich nicht auf die Phasenberechnung aus, s. oben. Es ergeben sich neue Möglichkeiten bzgl. dynamischer, optischer Anregung, s. Kapitel 6.2.c und 2.6.e.
- + **Günstig:** Durch das Einsparen des Piezoelements für die Phasenschiebung kann der Aufwand beim Messgeräteaufbau, bei dessen Ansteuerung sowie bei der Software reduziert werden. Auch die regelmäßige Kalibrierung des Phasenschiebens entfällt.
- + **Klein und robust:** Durch das Entfallen des Piezoelements ist der Messgeräteaufbau kleiner. Zudem besitzt der SPS Aufbau, bis auf den während einer Messung ruhenden Shearspiegel, keine bewegten Bauteile, wodurch die Messung robuster ist.
- + **Einfache Handhabung:** Bis auf die Einstellung des Shears ist bei einer Messung nichts weiteres zu beachten. Am Messgerät wird nur die Kamera und ggf. der Laser angesteuert.
- + **Geringere Datenmenge:** Die Auswertung der Interferenzphase im Videotakt erfordert lediglich die Verarbeitung eines einzigen Bildes. Beim TPS ist der vierfache Aufwand nötig.
- **Reduzierte Lichtintensität:** Die beim SPS eingesetzte Blende reduziert die Messlichtintensität teilweise auf unter 1 % verglichen zu TPS. Ohne einen höheren Kosten- und Sicherheitsaufwand sind die Kernvorteile von SPS damit unzugänglich, s. Kapitel 2.6.e., 2.6.a. und 2.2.e.
➔ Abhilfe mittels der Weiterentwicklung *Gitterblenden*, s. Kapitel 4.2
- **Shearbetrag stark begrenzt:** Da die Trägerfrequenz mittels Shearspiegel erzeugt wird, existieren Grenzen für die Einstellbarkeit des Shearbetrags. Der einstellbare Mindestbetrag von ca. 25 mm ist praxisuntauglich (typisch sind z. B. 1 mm bis 5 mm), s. auch Kapitel 6.1.c.
➔ Abhilfe mittels der Weiterentwicklung *VDS*, s. Kapitel 4.1.a
- **Reduzierte Auflösung:** Zur Phasenberechnung müssen die Speckles über mehrere Kamerapixel gebeugt werden, wodurch nicht die optimale Specklegröße (s. Kapitel 2.6.d.) bei der Interferogrammbildung verwendet wird. Die räumliche Auflösung beträgt bestenfalls ca. 1/12 der beim TPS (s. Kapitel 4.1.c), wodurch die kleinste detektierbare Fehlstellendimension erhöht wird, s. Kapitel 6.1.c.
➔ Abhilfe mittels *Auslegung der optimalen SPS-Parameter* für die Weiterentwicklung, s. Kapitel 4.1.c
- **Bildabschattungen:** Ohne Zusatzaufwand in Form von weiteren Optiken⁷⁵, welche die Geräterobustheit reduziert und die Kosten erhöht, ergeben sich durch die beim SPS eingesetzte Blende Bildabschattungen, welche bereits bei einem typischen Objektiv mit 25 mm Brennweite die Messfläche reduzieren (max. ca. 0,075 m², s. Kapitel 3.1). Die flächenhafte Messgeschwindigkeit liegt damit deutlich unter der mit TPS (typisch. ca. 0,25 m²).
➔ Abhilfe mittels der Weiterentwicklung *Gitterblenden*, s. Kapitel 4.2, und *VDS*, s. Kapitel 4.1.a
- **Shearrichtung unflexibel:** Im Rahmen der Arbeit wird aufgezeigt, dass die Verwendung einer Spaltapertur als Blende zielführend ist (s. Kapitel 4.1.c). Dabei muss die Trägerfrequenz über die Shearspiegel-Verkippung orthogonal zur Spalthöhe erzeugt werden (s. Abbildung 3.15 oben). Soll die Shearrichtung verändert werden, muss die Spaltblende entsprechend mitgedreht werden. Die Shearrichtung spielt eine besondere Rolle bei gerichteten Fehlstellen, s. Kapitel 4.3.b.
➔ Abhilfe mittels der Weiterentwicklung *VDS*, s. Kapitel 4.1.a

⁷⁵ Einsatz eines 4f-Systems, s. [110].

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

Die Eliminierung oder zumindest eine praxisgerechte Abhilfe bzgl. der aufgeführten Nachteile ist das Kernthema dieser Arbeit. Besonders der Nachteil der geringen Messlichtintensität macht die entscheidenden Vorteile der SPS DS gegenüber der TPS DS unzugänglich. Dies ist die messgerätetechnische Hürde, die es zu überwinden gilt, um die Shearografie als ZfP-Verfahren der modernen, automatisierten Industrie zu etablieren.

3.3.b. MI FFT CF SPS ip ESPSI

Ein besonderer Vorteil von SPS nach der FFT Trägerfrequenz-Methode ist es, dass viele Trägerfrequenzen auf ein Bild aufgebracht werden und im Fourier Bild, unter Berücksichtigung der passenden Einstellparameter, unabhängig voneinander abgerufen werden können. Dies wird für die Weiterentwicklungen in Kapitel 4 oftmals umgesetzt. Der Vorteil bietet ein hohes Potential, die sonst so zeitaufwändige in-plane ESPSI statt mit 16 Bildaufnahmen (s. Kapitel 2.4.b.) mit nur 2 Bildern durchführbar zu machen. Diese Berechnung im Videotakt würde alle oben genannten Vorteile der SPS DS bei ip Messungen zugänglich machen und beispielsweise Rissdetektionen mit nie dagewesener Auswertegüte erlauben.

Es gab bereits viele Arbeiten zur Verbesserung der ip DS, an dieser Stelle sei jedoch lediglich der vielversprechendste Ansatz als Grundlage für die Weiterentwicklungen kurz aufgezeigt. Dieser basiert auf dem oben vorgestellten MI FFT CF SPS Aufbau. Die Besonderheit dabei ist die Nutzung zweier Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge. Abbildung 3.17 links zeigt den Aufbau von Xie et al. aus dem Jahre 2015 [70].

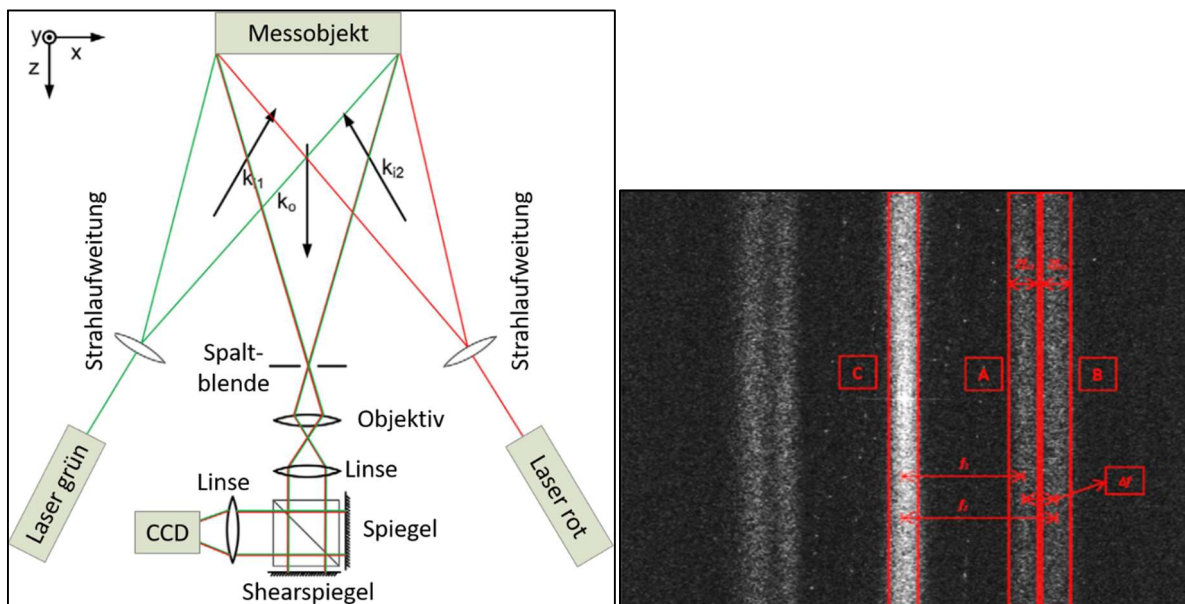


Abbildung 3.17: [70] Michelson-Interferometer FFT CF SPS DS Aufbau mit vorgeschalteter Blende bei Objektbeleuchtung mit zwei Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge zur ip Messung im Videotakt links (Begriffe auf Deutsch übersetzt); zur Vergrößerung der Messfläche werden im Aufbau zusätzliche Optiken verwendet⁷⁵. Das Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung rechts zeigt zwei separate Trägerspektren für die beiden Laserwellenlängen.

Da die beiden verwendeten Laserquellen (532 nm grün und 633 nm rot) nicht interferenzfähig sind, ergeben sich zwei unterschiedliche, überlagerte Specklemuster auf dem Messobjekt. Diese werden,

bei passender Einstellung der SPS-Parameter, im Fourier Amplitudenbild räumlich entkoppelt voneinander angezeigt, denn die Trägerfrequenz, erzeugt durch die Shearspiegel-Verkipfung, ist wellenlängenabhängig⁷⁶. Die Interferenzphasen der beiden Specklemuster können nun getrennt voneinander berechnet werden, wie jeweils in Kapitel 3.3.a oben beschrieben. Aufgrund der Beleuchtungssituation für die ip Verformungsmessung (vgl. Kapitel 2.4.b.) existiert ein Zusammenhang zwischen der demodulierten Verformung des grünen und der des roten Lasers, sodass durch Subtraktion der Anteile die reine in-plane Verformung berechnet werden kann.

Der größte Nachteil dieses Aufbaus, welcher die erzielbare Ergebnisqualität für die Praxis unzureichend macht, ist weiterhin die Einstellung der Trägerfrequenz über die Shearspiegel-Verkipfung. Im Falle von zwei Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge ist der Shearbetrag bei der Messung nahezu fest vorgegeben, um die Trennung der Spektren zu gewährleisten. Zudem wird eine noch stärkere Beugung notwendig, dabei sinken die Messlichtintensität sowie die laterale Auflösung weiter (s. auch Nachteile S. 89). Eine ausführliche Diskussion des Autors et al. zu diesem Sachverhalt findet sich in [105] von 2019.

Über diesen Ausgangspunkt der eigenen Weiterentwicklung hinaus wurden zwischenzeitig weitere Arbeiten zur FFT CF SPS ip ESPSI veröffentlicht. Hooshmand-Ziafi et al. [92] präsentierte 2019 eine Methode, welche der von Xie (oben) sehr ähnlich ist, jedoch ein alternatives Interferometer verwendet. Die beschriebenen Nachteile bleiben die gleichen. Gao et al. [93] präsentierte 2018 eine nach Meinung des Autors geschickte Methode mit nur einer Laserquelle, um direkt ein in-plane Shearogramm zu messen, ohne zuvor demodulieren zu müssen. Nachteilig für die Praxis dabei ist jedoch der sehr große, störepfindliche Aufbau mit zusätzlicher Laserlichtführung. Auch die Kosten für den Aufbau fallen entsprechend höher aus. Die gleichen Nachteile weist der Aufbau von Dong et al. [54] von 2019 auf, mit dem ein gekoppeltes oop- und ip-Shearogramm gemessen werden kann.

Allen hier vorgestellten Aufbauten gleich ist, dass mit ihnen, neben der oop-Komponente, lediglich eine ip-Verformungskomponente im Videotakt gemessen werden kann (vgl. auch Kapitel 2.4.b.). Im Rahmen der Weiterentwicklungen wird vom Autor ein Aufbau und eine Methodik vorgestellt, welche gleichzeitig neben der oop-Komponente beide ip-Komponenten im Videotakt messbar machen, s. Kapitel 4.3.a. Dies wird als *3D DS* bezeichnet und weist keine der Nachteile der seither veröffentlichten Methoden auf.

3.3.c. MI FFT CF SPS dual-shear ESPSI

Der Vorteil von FFT CF SPS, Trägerfrequenzen mit unterschiedlichem Informationsgehalt im Fourier Bild unabhängig voneinander abrufen zu können, bietet ein hohes Potential für die sog. *dual-shear*⁷⁷ ESPSI. Hierbei werden die zwei shearografischen Messgrößen der Neigung in beide Shearrichtungen (s. auch Kapitel 2.4.b.) möglichst zeitgleich erfasst. Eine solche Auswertung ist bei der Fehlstellendetektion unverzichtbar, wenn in einem Messobjekt Fehlstellen mit asymmetrischen Abmaßen, ab sofort auch *gerichtete Fehlstellen* genannt, vermutet werden ([36] S. 127). Der Sachverhalt wird im Kapitel 4.3.b für die eigene Weiterentwicklung genauer erörtert. Bei der TPS dual-shear ESPSI sind 16 Bildaufnahmen notwendig, was einen enormen Zeitaufwand mit sich bringt. Stattdessen kann die Messung mit SPS bei nur 2 Bildaufnahmen erfolgen. Die Messung im Videotakt würde alle oben genannten Vorteile der SPS DS zugänglich machen und Messungen mit nie dagewesener Auswertegüte erlauben.

⁷⁶ Die aufbauspezifischen Gleichungen werden hier nicht aufgeführt. Es sei auf [70] und ([79] Kapitel 7) verwiesen. Stattdessen werden die physikalischen Gegebenheiten bei der Einstellung der Trägerfrequenz in Kapitel 4.1.b neu aufbereitet und direkt für die Weiterentwicklungen vorgestellt.

⁷⁷ In der Literatur teilweise auch *dual-directional* genannt, dt.: *in zwei Richtungen*.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

Es gab bereits viele Arbeiten zur Verbesserung der dual-shear DS, oftmals ohne einstellbaren Shearwinkel. An dieser Stelle sei jedoch lediglich der vielversprechendste Ansatz als Grundlage für die Weiterentwicklungen kurz aufgezeigt. Dieser basiert auf dem oben vorgestellten MI FFT CF SPS Aufbau. Abbildung 3.18 links zeigt den Aufbau von Wang et al. von 2016 [94]. Abermals werden zwei Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge verwendet. Konkret werden zwei MI FFT CF SPS Aufbauten parallelgeschaltet, indem ihnen ein zusätzlicher Strahlteiler vor- und nachgeschaltet wird. Jedem MI Aufbau wird zudem ein Absorptionsfilter vorgesetzt, sodass nur eine der beiden Laserwellenlängen passieren kann. In einem der MI Aufbauten wird ein Shear in x-Richtung, in dem anderen ein Shear in y-Richtung eingestellt.

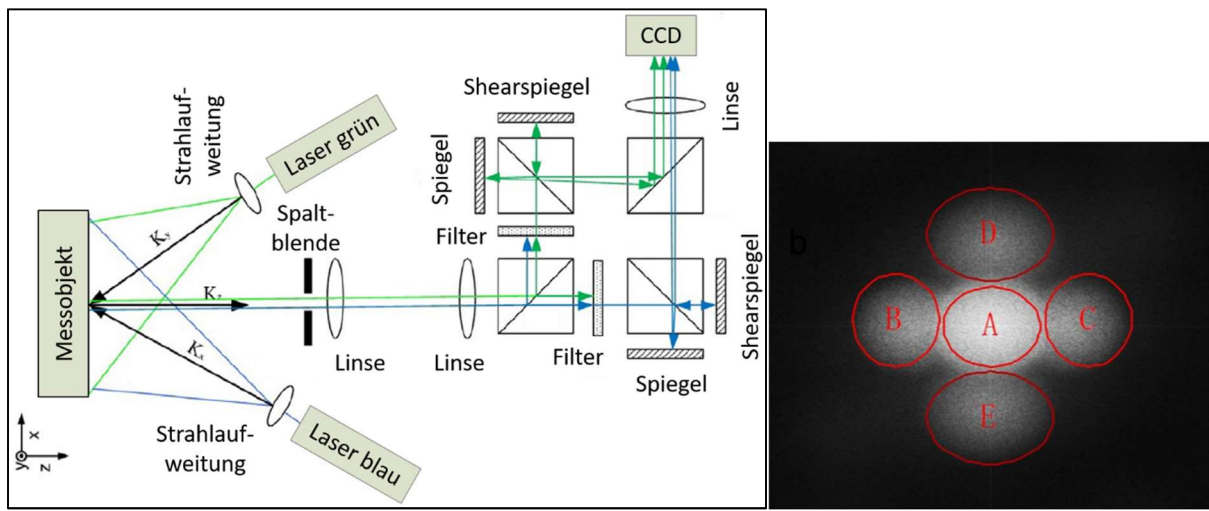


Abbildung 3.18: [94] Michelson-Interferometer FFT CF SPS DS Aufbau mit vorgeschalteter Kreisblende bei Objektbeleuchtung mit zwei Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge zur dual-shear Messung im Videotakt links (Begriffe auf Deutsch übersetzt); zur Vergrößerung der Messfläche werden im Aufbau zusätzliche Optiken verwendet⁷⁵. Das Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung rechts zeigt zwei separate Trägerspektren für die beiden Laserwellenlängen, eines horizontal und eines vertikal verschoben.

Da die beiden verwendeten Laserquellen (532 nm grün und 457 nm blau) nicht interferenzfähig sind, ergeben sich zwei unterschiedliche, überlagerte Specklemuster auf dem Messobjekt. Diese werden, bei passender Einstellung der SPS-Parameter, im Fourier Amplitudenbild räumlich entkoppelt voneinander angezeigt, da die Trägerfrequenz von der gewählten Shearrichtung⁷⁸ anhängig ist. Die Interferenzphasen der beiden Specklemuster können nun separat berechnet werden, wie jeweils in Kapitel 3.3.a oben beschrieben. Sie enthalten den shearografischen Neigungsanteil entsprechend der gewählten Shearrichtung der Laserwellenlänge.

Der größte Nachteil dieses Aufbaus, welcher die erzielbare Ergebnisqualität für die Praxis unzureichend macht, ist weiterhin die Einstellung der Trägerfrequenz über die Shearspiegel-Verkipfung. Darüber hinaus wird eine Kreisblende verwendet, welche die Messlichtintensität stark herabsetzt (vgl. Kapitel 4.1.c). Die Absorptionsfilter sowie das Durchlaufen von drei Strahlteilern je Laser reduzieren das verbleibende Licht hinter der Blende nochmals auf 1/8. Aufgrund der hohen Anzahl an optischen Bauteilen ist die Messrobustheit reduziert und die Gerätekosten fallen höher aus.

⁷⁸ Die aufbauspezifischen Gleichungen werden hier nicht aufgeführt. Es sei auf [94] und ([79] Kapitel 8.3) verwiesen. Stattdessen werden die physikalischen Gegebenheiten bei der Einstellung der Trägerfrequenz in Kapitel 4.1.b neu aufbereitet und direkt für die Weiterentwicklungen vorgestellt.

Xie et al. stellte 2016 einen weiteren Aufbau für FFT CF SPS dual-shear ESPSI vor, der mittels Polarisation zweier Specklemuster unterschiedlicher Trägerfrequenz arbeitet [95]. Der Aufbau, bestehend aus zwei parallelgeschalteten Mach-Zehnder-Interferometern mit vorgeschalteter Kreisblende bei nur einer Laserwellenlänge, weist alle oben genannten Nachteile auf. Darüber hinaus ist die Anzahl an optischen Bauteilen aufgrund der sechs verwendeten Strahlteiler noch höher und die Messlichtintensität entsprechend geringer.

Zeitlich nach den eigenen Weiterentwicklungen (s. Kapitel 4) stellte Zhang et al. 2019 einen modifizierten MI Aufbau mit zusätzlichem, polarisationsabhängigem Strahlteiler [96] und Jiang et al. 2020 einen MI Aufbau mit Farbkamera, zwei Laserquellen und zusätzlichem, dichroitischen Spiegel vor [97]. Beide Aufbauten werden hier nicht weiter diskutiert, da sie u. a. den entscheidenden Nachteil der shear-abhängigen Trägerfrequenz aufweisen.

Im Rahmen der Weiterentwicklungen wird vom Autor ein Aufbau und eine Methodik vorgestellt, mit denen praxistaugliche dual-shear ESPSI im Videotakt möglich wird, s. Kapitel 4.3.b. Hierbei wird erstmals eine Polarisationskamera für ESPSI verwendet, wodurch alle Nachteile der seither veröffentlichten Methoden umgangen werden können.

3.3.d. FFT CF SPS ESPI

Es gab bereits viele Arbeiten zur Verbesserung der SPS DH, an dieser Stelle sei jedoch lediglich der vielversprechendste Ansatz als Grundlage für die Weiterentwicklungen kurz aufgezeigt. Dieser arbeitet nach der oben bereits für die DS vorgestellten FFT CF Methode. Die Besonderheit dabei ist die Einkopplung der Referenzwellenfront mittels Glasfaserkabel. Dies geschieht durch eine spezielle Blende, wobei die Trägerfrequenz durch den Abstand von Glasfaserkabel-Austritt und Blendenapertur eingestellt wird⁷⁹. Abbildung 3.19 zeigt den Aufbau von Burke von 2000 [42], Abbildung 3.20 das bei passender Trägerfrequenzeinstellung entstehende, annähernd kreisförmige Trägerfrequenzspektrum im Fourier Amplitudenbild. Bis auf die Glasfasereinkopplung und die Blende ist er dem TPS oop ESPI Aufbau gleich, vgl. auch Kapitel 2.4.a. Er hat sich durch die damit erreichbaren, hochqualitativen Ergebnisse bewährt und entspricht daher weiterhin dem aktuellen Stand der Forschung der SPS DH [48]. Er kommt z. T. auch in modifizierter Weise zum Einsatz, beispielsweise bei der Kopplung von ESPI und Thermografie [98].

Der größte Nachteil dieses Aufbaus, welcher ihn für die Praxis unzureichend macht, ist seine Größe und damit einhergehend seine Störempfindlichkeit, zudem die Instabilität der feinjustierten, Faser-eingekoppelten Referenzwellenfront. Weiterhin ist die laterale Auflösung und die Tiefenauflösung durch die geringe Ausnutzung des Fourier Bildbereichs sowie durch die geringe Messlichtintensität aufgrund der Kreisapertur reduziert, s. Kapitel 4.1.c. Die ineffiziente Lichteinkopplung in die Glasfaser reduziert die Messlichtintensität weiter, wodurch die Belichtungszeit und damit die Störempfindlichkeit erhöht ist. Darüber hinaus ergibt sich ein Mehraufwand beim Gerätebau durch die Glasfaserkopplung und höhere Kosten, nicht zuletzt aufgrund der speziellen Blende. Am Glasfaseraustritt im Bereich des optischen Pfads existieren zudem Bildqualitätsverluste.

Im Rahmen der Weiterentwicklungen wird vom Autor ein Aufbau vorgestellt, der keinen der genannten Nachteile aufweist, s. Kapitel 4.1.e.

⁷⁹ Die aufbauspezifischen Gleichungen werden hier nicht aufgeführt. Es sei auf [42] und [48] verwiesen.

3. Räumliches Phasenschieben nach der FFT Trägerfrequenzmethode

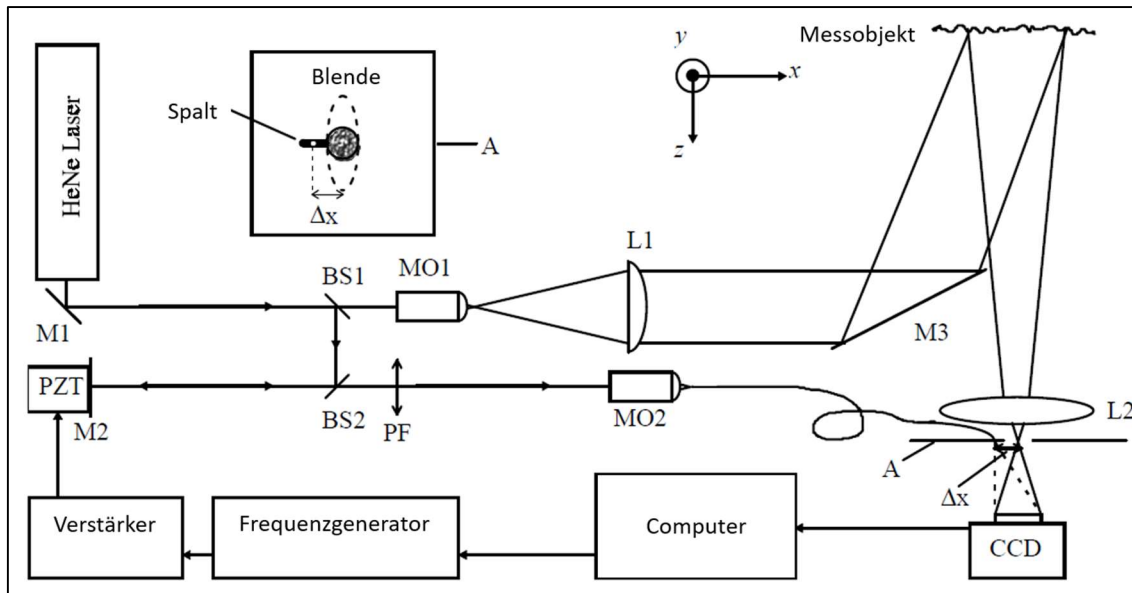


Abbildung 3.19: ([42] S. 112) FFT CF SPS ESPI Aufbau mit vorgeschalteter Blende und Faser-eingekoppelter Referenzwellenfront zur oop Messung im Videotakt (Begriffe auf Deutsch übersetzt); hier: A = Blende, BS = Strahlteiler, L = Linse, M = Spiegel, MO = Mikroskop-Objektiv, PF = Polarisationsfilter, PZT = Piezospiegel; die speziell geformte Blende ist als Detail nochmals oben links im Bild dargestellt, aus normaler Sicht auf die Messobjektoberfläche. Neben der Kreisapertur weist sie einen Führungsspalt auf, in dem ein Glasfaserkabel verschoben wird. Dieses leitet die Referenzwellenfront in den Strahlengang ein, wobei der Mittenabstand zur Kreisapertur, hier Δx , feinjustiert werden muss, um eine passende Trägerfrequenz zu erzeugen.

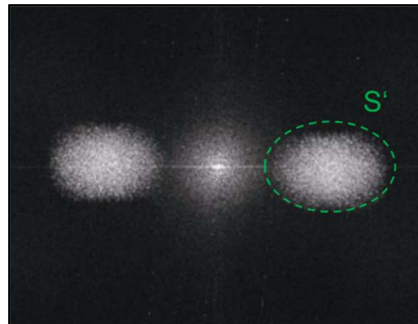


Abbildung 3.20: Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung beim FFT CF SPS oop ESPI Aufbau mit Faser-eingekoppelter Referenzwellenfront zeigt ein annähernd rundes Trägerfrequenzspektrum (grün umkreist) aufgrund der speziellen Blende mit Kreisapertur zur Trägerfrequenzerzeugung; zusammengestellt aus [48].

Ausgehend von dem FFT CF SPS oop ESPI Aufbau von Burke wurden Aufbauten entwickelt, mit denen dreidimensional-messende Holografie möglich ist, kurz als 3D DH bezeichnet. Es können also alle drei holografisch erfassbaren Verformungsanteile⁸⁰ im Videotakt gemessen werden, s. auch Kapitel 2.4.a. Bei den hier nicht weiter vorgestellten Aufbauten kommen demnach drei feinjustierte und Faser-eingekoppelte Referenzwellen zum Einsatz, s. [48] und [99], vgl. auch [100]. Fast alle oben aufgeführten Nachteile für den oop Aufbau kommen dabei ebenfalls dreifach zum Tragen.

Der im Rahmen der Weiterentwicklungen vorgestellte SPS ESPI Aufbau, s. Kapitel 4.1.e, kann mit der Methodik nach Kapitel 4.3.a betrieben werden. Auf diese Weise kann 3D DH im Videotakt erstmals praxisgerecht verwendet werden. Dies wird anhand eines entsprechend weiterentwickelten Messgeräts gezeigt, s. Kapitel 5.3.

⁸⁰ 1x oop, 2x ip.

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

In diesem Kapitel werden die Weiterentwicklungen vorgestellt, welche auf die Beseitigung der Nachteile von SPS DS nach dem aktuellen Stand der Forschung (s. Kapitel 3) zielen. Im Fokus steht dabei ein neuer Interferometer-Aufbau, auf dessen Basis sich weitere, stark verbesserte oder auch neue Messmöglichkeiten ergeben. Der Inhalt des gesamten Kapitels 4 wurde Mitte 2018 seitens des Autors et al. in Form einer Erfindungsmeldung beim deutschen Patent- und Markenamt eingereicht. Im Frühjahr 2019 kam es zur deutschen Patenterteilung [101]. Die internationale Patenterteilung ist in Bearbeitung, s. Offenlegungsschrift [102].

Der Basis-Aufbau wird ausführlich in Kapitel 4.1 vorgestellt und alle weiteren, abgeleiteten Möglichkeiten in den folgenden Kapiteln. Die Vorteile der Weiterentwicklungen, verglichen zum Stand der Forschung, werden je Kapitel anhand eines prinzipiellen Messversuchs diskutiert.

4.1. Mach-Zehnder-Interferometer mit virtuellem Doppelspalt

An dieser Stelle wird kurz der Ideenfindungsprozess zum selbst entwickelten Aufbau aufgeschlüsselt. Neben den umfangreichen Recherchen zu den physikalischen Grundlagen und den Aufbauten nach dem Stand der Forschung, waren Erfahrungen durch den Nachbau der optischen Systeme und die Anwendung derer für das Verständnis unumgänglich.

Die Idee war zunächst, die für SPS notwendige Trägerfrequenz mittels Doppelspalt (s. Kapitel 4.1.b) zu erzeugen. Hierbei muss jede Apertur von einer der beiden gegeneinander vershearnten Wellenfronten separat durchlaufen werden, um sie mittels Trägerfrequenz zueinander zu codieren, s. Abbildung 4.1 (1). Zudem sind für einen praktikablen variablen Shear längere Interferometerarme notwendig. Das heißt, eine einzige feststehende Optik, wie ein Keilprisma, ist nicht ausreichend. Der Aufbau von Bhaduri et al. [76] von 2006 erfüllt diese Bedingungen. Der dabei verwendete feste Doppelspalt ist bzgl. der Trägerfrequenzeinstellung jedoch unflexibel. Zudem ist eine feinjustierte Ablenkung der beiden Wellenfronten durch die Doppelblende nötig, wodurch der Aufbau stöempfindlich ist, s. Abbildung 4.1 (2). Auch die für die Praxis notwendige Steigerung der Messlichtintensität durch Gitterblenden (s. Kapitel 4.2) ist auf diese Weise nicht umsetzbar, da es keine vollflächige Bildzusammenführung im Interferometer gibt.

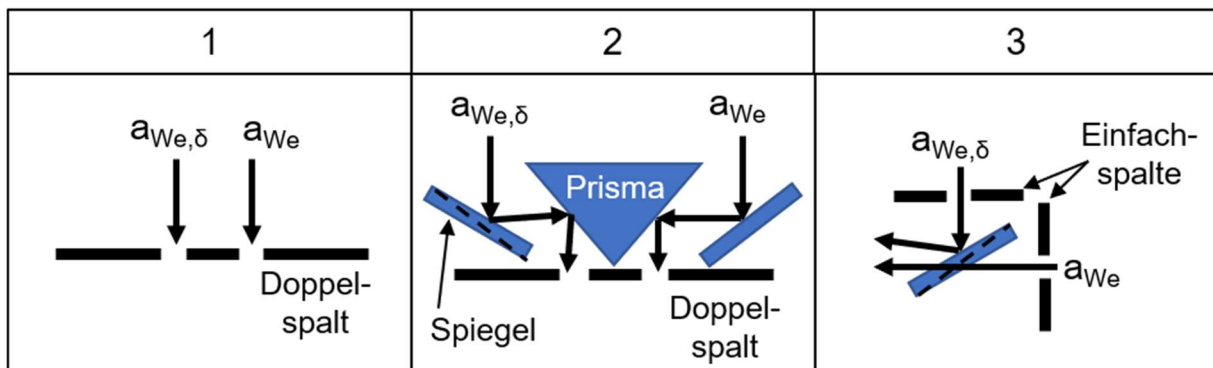


Abbildung 4.1: Darstellung von optischen Aufbauten mit Spaltblenden, wobei jede Apertur nur von einer der beiden Wellenfronten durchlaufen wird. (Auf diese Weise kann eine Trägerfrequenz durch die die unvershearnte Wellenfront a_{We} und die vershearnte Wellenfront $a_{We,\delta}$ erzeugt werden, s. auch Abbildung 4.5). (1) Einfachster, schematischer Zielaufbau; (2) Aufbau von Bhaduri et al. [76] mit hochgenau positioniertem Spiegelprisma; (3) Aufbau mit zwei Einfachblenden und Strahlteiler zur Wellenfrontzusammenführung, wodurch ein flexibel einstellbarer virtueller Doppelspalt erzeugt wird, s. auch Abbildung 4.2.

So kam die Idee auf, einen virtuellen Doppelspalt (VDS) mit variablem Doppelspaltabstand zu erzeugen (s. Kapitel 4.1.a). Dies ist durch die Zusammenführung der Bilder zweier Einfachblenden möglich, s. Abbildung 4.1 (3). Die Bildzusammenführung zweier Anteile auf einer Achse ist Grundbestandteil eines jeden Interferometers, somit steht diese Funktion immer zur Verfügung. Die Besonderheit hierbei ist, dass der optische Pfad in den Interferometerarmen nicht gefaltet sein darf. Dies ist jedoch beim MI der Fall, denn derselbe Strahlteiler wird zur Bildaufteilung sowie zur Bildzusammenführung verwendet, d. h. die Wellenfronten müssen sich auf der gleichen Strecke vom Strahlteiler weg und auf ihn zu bewegen. Werden dabei Blenden mit schmalen Aperturen in die Interferometerarme eingesetzt, kommt es zu unerwünschten Reflexionen an den Blenden. Dies verursacht einen starken Störeinfluss⁸¹ in Form von Mehrfachinterferenzen, welche die Messung unmöglich machen.

Der logische Schluss hieraus ist nun der Mach-Zehnder-Interferometer (MZ) Aufbau als nächst kleinster Interferometer-Aufbau ohne gefalteten optischen Pfad. Es sei auf die Originalveröffentlichung des Autors et al. verwiesen [103].

4.1.a. Interferometer-Aufbau

Abbildung 4.2 links zeigt den optischen Aufbau für FFT CF SPS ESPSI mit virtuellem Doppelspalt (VDS) am Mach-Zehnder-Interferometer (MZ).

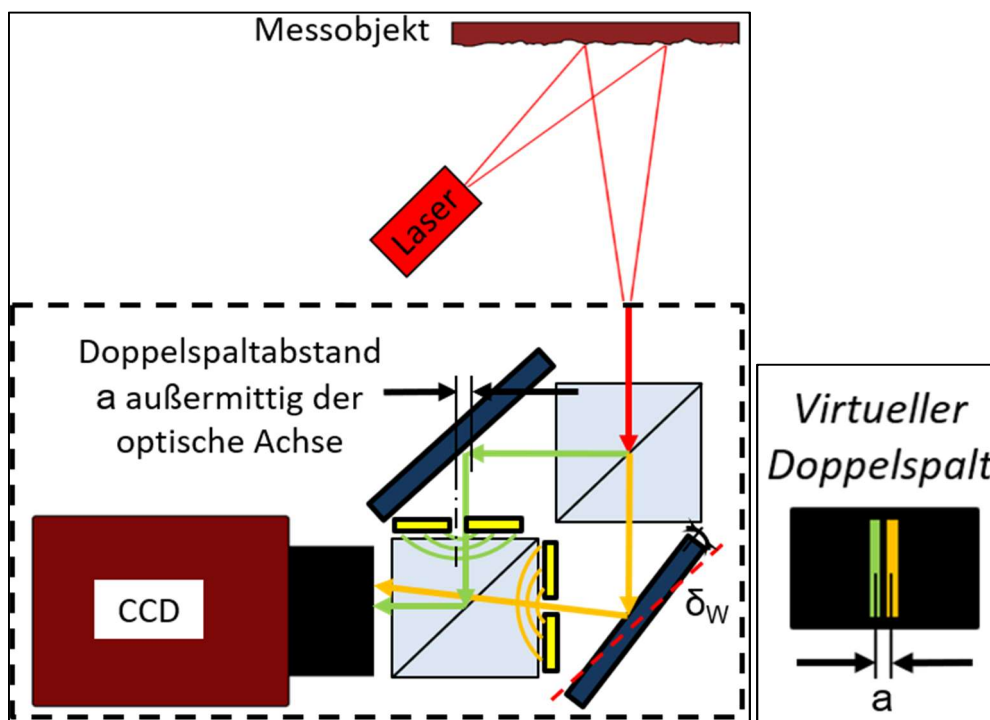


Abbildung 4.2: (Links) shearografische Auswertung einer laserbeleuchteten Oberfläche mit Mach-Zehnder-Interferometer (MZ) Aufbau bestehend aus zwei Strahlteilern, festem Spiegel und Shear Spiegel; durch die beiden Blenden (gelb) kann SPS nach der FFT Methode durchgeführt werden. Die kohärente Intensitätsmodulation (KIM) wird durch den virtuellen Doppelspaltabstand a verursacht, wodurch die Trägerfrequenz entkoppelt vom Shearwinkel erzeugt wird. (Rechts) aus Blickrichtung der Kamera ist mit Fokus auf der Blendenebene ein virtueller Doppelspalt (VDS) mit Doppelspaltabstand a zu sehen, der aus der Wellenfrontzusammenführung der Bilder aus den beiden Interferometerarmen im kameranahen Strahlteilerwürfel resultiert.

⁸¹ Der Einfluss kann durch die Verwendung von Gitterblenden reduziert werden, s. Kapitel 4.2.

Das vom Messobjekt reflektierte Laserlicht wird beim Eintritt in den Sensor am ersten, kamerafernen Strahlteiler in zwei Wellenfronten aufgeteilt. Diese werden an jeweils einem folgenden Spiegel abgelenkt, wobei ein Spiegel, der sog. Shearspiegel, kippbar ist. Die gespiegelten Wellenfronten werden in einem zweiten, kameranahen Strahlteilerwürfel wieder auf eine gemeinsame optische Achse in Richtung der Kamera gebracht. Dem kameranahen Strahlteiler ist je Interferometerarm eine Spaltblende vorgelagert. Dabei wird eine der Blenden außermittig zur optischen Achse um den Abstand a in die Richtung orthogonal zur Spalthöhe verschoben. Wird der Kameraobjektivfokus nun auf die Ebene der Spaltblenden eingestellt, ist im Kamerabild ein *virtueller Doppelspalt* (VDS) zu sehen, wie in Abbildung 4.2 rechts dargestellt. Dieser entsteht durch die Wellenfrontzusammenführung der Bildanteile aus den beiden Interferometerarmen beim Durchlaufen der Einfachspaltblenden.

Der VDS verursacht eine KIM (s. Kapitel 3.3.e), deren Trägerfrequenz anhand des virtuellen Doppelspaltabstands a variiert werden kann (s. Kapitel 4.1.b). Das Phänomen ist unabhängig vom Shearwinkel, somit ist die Trägerfrequenzerzeugung vom Shearvektor entkoppelt. Dies ist der entscheidende Vorteil der in dieser Arbeit entwickelten MZ SPS ESPSI gegenüber der MI SPS ESPSI (vgl. Kapitel 3.3.a).

Unter typischen Messbedingungen beträgt der Shearbetrag beim MI FFT CF SPS ca. 35 mm (s. Kapitel 3.3.a), was zu hoch für typische shearografische Prüfungen ist (vgl. auch Kapitel 6.1.c). Die daraus resultierenden Defizite sind eine zu hohe Sensitivität und somit hohe Stör- und Dekorrelationsempfindlichkeiten, eine schwierige Ergebnisinterpretation aufgrund der verzerrten Schmetterlingsmuster sowie eine starke Verringerung der Messfläche an den Probenrändern. Abbildung 4.3 verdeutlicht dies anhand einer Messung mit variiertem Shearbetrag. Links ist der Shearbetrag mit nur 2 mm passend zur Messaufgabe gewählt, wie es mit dem VDS MZ nun für SPS möglich ist. Rechts beträgt er 15 mm, was bereits zu einem unzureichenden Ergebnis führt.

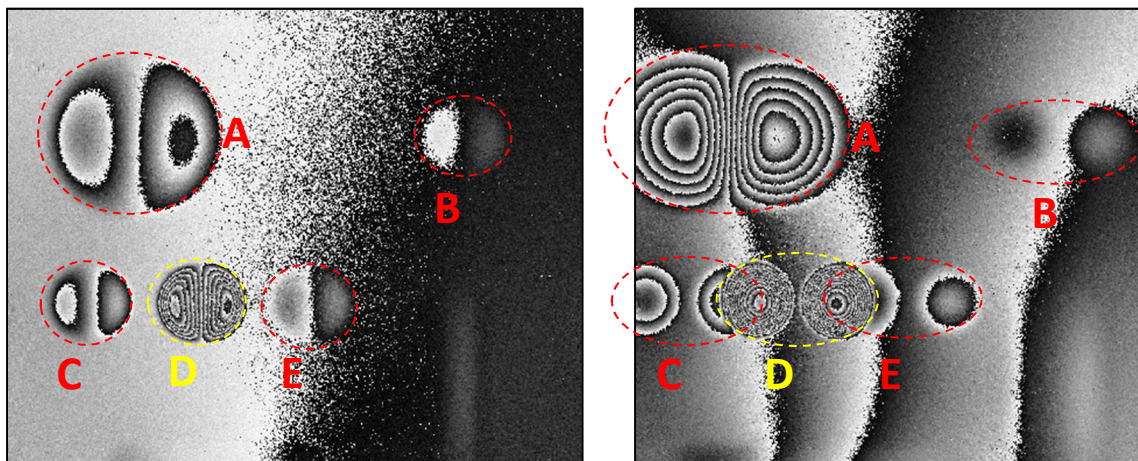


Abbildung 4.3: Shearogramme einer Platte mit künstlichen Fehlstellen in Form von rückseitig eingebrachten Sacklochbohrungen unterschiedlicher Restwandstärke (nicht weiter benannt), Bohrungsdurchmesser $A = 30$ mm, $B = C = D = E = 15$ mm; links Messung bei einem Shearbetrag von 2 mm; rechts bei einem Shearbetrag von 15 mm; die Messbreite rechts fällt geringer aus, die verzerrten Schmetterlingsmuster von Fehlstelle C, D und E überlagern sich, die Phasenstreifen von Ergebnis D sind dekorreliert und den Fehlstellenindikatoren sind trotz geringer Belastung aufgrund der zu hohen Sensitivität vertikal verlaufende, globale Verformungsstreifen überlagert.

Ein weiterer Vorteil des MZ ist, dass die Messlichtintensität gegenüber dem MI durch den Einsatz von Polarisationsoptiken verdoppelt werden kann zu theoretisch 100 % der Eingangsintensität (ungeachtet der Verluste durch die Blenden). Abbildung 4.4 zeigt die Verhältnisse schematisch. Aufgrund der typi-

schonweise 50 % verspiegelten Schicht eines Strahlteilers werden bei jedem Passieren 50 % des Eingangslichts reflektiert, die übrigen 50 % transmittiert. Am MI werden daher, wie der Strahlenverlauf in der Abbildung darstellt, prinzipbedingt 50 % des Eingangslichts aus dem Sensor in Richtung des Messobjektes zurückgeworfen. Stattdessen können am MZ zwei polarisationsabhängige Strahlteiler verwendet werden. Das typischerweise linear polarisierte Laserlicht ist nach der Reflexion an der rauen Messobjektoberfläche nahezu vollständig unpolarisiert. Der kameraferne Strahlteiler transmittiert den p-polarisierten Lichtanteil, während der s-polarisierte reflektiert wird, s. auch ([33] Kapitel 8). Am kameranahen Strahlteiler geschieht gleiches, wodurch das gesamte Eingangslicht in Richtung der Kamera verläuft. Es muss jedoch beachtet werden, dass die beiden Wellenfronten zur interferometrischen Überlagerung eine gleichmäßige Polarisation aufweisen müssen (s. Kapitel 2.2.b S. 14). Hierzu wird dem kameranahen Strahlteiler ein Depolarisator nachgeschaltet, der beide Wellenfronten unpolarisiert und damit interferenzfähig macht. Ein entsprechend praktischer Ergebnisvergleich für FFT CF SPS ESPSI ist in der Originalveröffentlichung des Autors et al. zu finden [103].

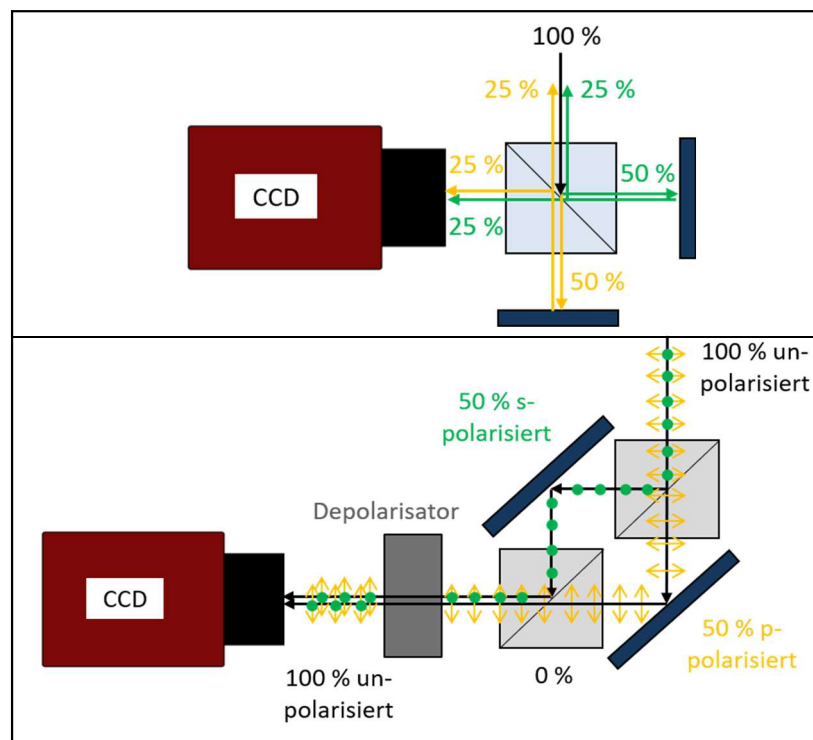


Abbildung 4.4: (Oben) am Michelson-Interferometer werden 50 % des Eingangslichts prinzipbedingt zurückgeworfen. (Unten) am Mach-Zehnder-Interferometer können durch polarisationsabhängige Strahlteilerwürfel 100 % des Eingangslichts zur Kamera geleitet werden. Für die interferometrische Überlagerung auf dem Kamerachip muss die Polarisation der Wellenfronten aus den beiden Interferometerarmen wieder angeglichen werden, hier durch einen Depolarisator unmittelbar nach dem kameranahen Strahlteilerwürfel.

4.1.b. Erzeugung der Trägerfrequenz

Der VDS kann für die folgenden Betrachtungen mit einem normalen Doppelspalt gleichgesetzt werden, für den die Gegebenheiten in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt sind. Eine einfallende Wellenfront (rot) wird an den beiden Spaltaperturen gebeugt, wodurch zwei neue Wellenfronten (orange und grün) entstehen. Zwischen beiden kommt es zu einer interferometrischen Überlagerung, welche auf dem Bildsensor der Kamera Intensitätsextrema (blau) verursacht. Die Besonderheit bei der optisch-interferometrischen Messtechnik ist das eingesetzte Kameraobjektiv. Beim oben beschriebenen VDS MZ (Ab-

bildung 4.2) sitzt die Blende nicht unmittelbar vor dem Objektiv, wie in entgegen Abbildung 4.5 dargestellt. Dennoch verursacht die Strahlablenkung durch das Objektiv den entscheidenden Einfluss bei der interferometrischen Überlagerung. Das heißt für den praktischen Einsatz in dieser Arbeit kann der Blendenabstand zum Bildsensor vernachlässigt⁸² werden. Hiermit ergibt sich anhand von Abbildung 4.5 durch die Ähnlichkeit der beiden rechtwinkligen Dreiecke, die den Winkel α einschließen, unter der Kleinwinkelnäherung die einfache Beziehung für den Ort der Intensitätsextrema nach Gleichung 4.1.

$$\frac{\Delta s}{a} = \frac{x}{f} \quad (4.1.)$$

für $\tan(\alpha) \approx \alpha$ (Kleinwinkelnäherung)

Mit

Δs = Gangunterschied von zwei Wellenfronten

a = Doppelspaltabstand

x = Ortsvariable

f = Objektivbrennweite

α = Winkel im Dreieck, s. Abbildung 4.5

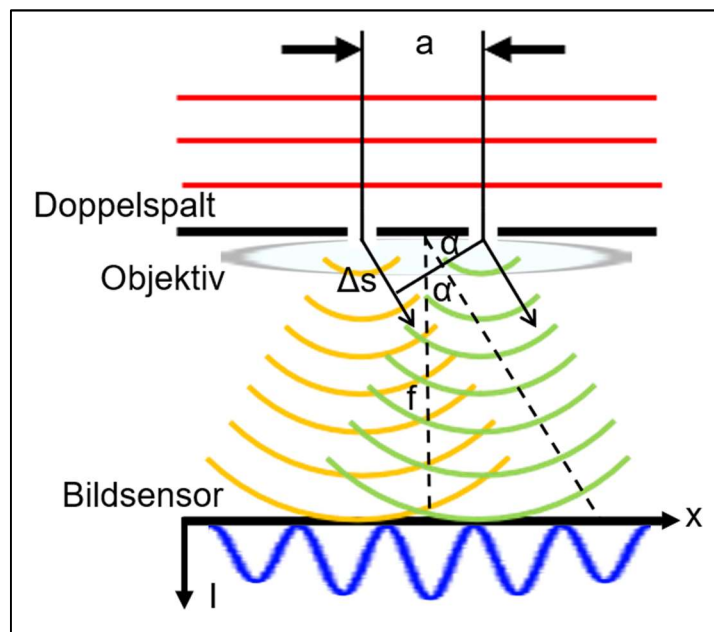


Abbildung 4.5: Interferenzphänomen einer Eingangswellenfront (rot) beim Durchlaufen eines Doppelspalts; es entstehen zwei neue Wellenfronten (orange und grün), deren Wellenfelder sich überlagern. Auf einem Bildsensor im Abstand der Objektivbrennweite f vom Doppelspalt entsteht eine Intensitätsmodulation (blau).

Allgemein gilt zudem Gleichung 4.2 für die Umrechnung eines Gangunterschieds in einen Phasenunterschied.

⁸² Für weiterführende Informationen sei auf [81] verwiesen.

$$\frac{\Delta s}{\lambda} 2\pi = \Phi_0 \quad (4.2.)$$

Mit

λ = Laserwellenlänge

Φ_0 = Phasenunterschied (hier: Trägerphase)

Wird nun Gleichung 4.1 nach dem Gangunterschied umgestellt und in Gleichung 4.2 eingesetzt, ergibt sich die Trägerphase nach Gleichung 4.3.

$$\Phi_0 = 2\pi \frac{a}{\lambda f} x = 2\pi f_0 x \quad (4.3.)$$

Mit

f_0 = Trägerfrequenz

Für eine interferometrische Bildaufnahme mit enthaltener Trägerfrequenz addiert sich diese Trägerphase zur allgemeinen Interferometrie-Gleichung hinzu und es ergibt sich Gleichung 4.4.

$$I = I_0 (1 + \gamma \cos \Phi + \Phi_0) = I_0 (1 + \gamma \cos \Phi + 2\pi f_0 x) \quad (4.4.)$$

Im Folgenden wird nun gezeigt, wie die Parameter des VDS optimal einzustellen sind.

4.1.c. Auslegung der optimalen SPS-Parameter

Die bestmögliche Ergebnisqualität beim FFT CF SPS kann durch die optimale Auslegung der VDS-Parameter erreicht werden. Aufgrund der reduzierten lateralen Auflösung beim SPS, verglichen zum TPS, spielt dies eine entscheidende Rolle bzgl. der Praxistauglichkeit. Mit dem VDS können die Parameter erstmals unabhängig von den spezifischen Parametern für die Messaufgabe eingestellt werden, da der Shearwinkel entkoppelt ist. Die folgenden Betrachtungen sind eine physikalische Ergänzung zur mathematischen Herangehensweise von [104], s. auch ([79] Kapitel 7). Darüber hinaus werden sie für den VDS erweitert.

In einer Veröffentlichung des Autors et al. [105] wurde bereits aufgezeigt, dass für die höchste Messlichtintensität Spaltblenden und große Kamerapixel gegenüber Kreisblenden und kleinen Pixeln zu bevorzugen sind. Zudem kann mit FFT CF SPS bestenfalls 1/12 der lateralen Auflösung, verglichen zum TPS, erreicht werden. Dies bezieht sich auf die Auflösung in Richtung der Spaltbeugung, also orthogonal zur Spaltaperturhöhe. Die Auflösung in Richtung der Spaltaperturhöhe ist theoretisch gleich zum TPS. Insgesamt sind beim SPS jedoch Bildsensoren mit höherer Pixelanzahl zu bevorzugen, um der reduzierten lateralen Auflösung entgegenzuwirken.

Die Abmaße des Trägerspektrums im Fourier Amplitudenbild sind ein direktes Maß für die Ergebnisqualität der Phasenberechnung (s. Kapitel 3.2.d und Kapitel 3.3), experimentell auch gezeigt durch

([79] S. 190 ff.). Es gilt, diese zu maximieren. Die maximale räumliche Abtastfrequenz eines Kamerasensors wird durch Gleichung 4.5 beschrieben und ist in Abbildung 4.6 oben schematisch als Raumperiode auf dem Bildsensor angedeutet. Hierbei entspricht die höchste erfassbare Intensitätsmodulation dem Aufeinanderfolgen von hellen und dunklen⁸³ Pixeln. Für höherfrequente Signale tritt Aliasing (Unterabtastung) auf (s. auch Kapitel 4.2). Die Pixelbreite entspricht dem Digitalisierungsschritt zwischen den Stützstellen des Signals. Höherfrequente Signale können nur durch schmalere Pixel abgebildet werden, nicht durch eine höhere Anzahl an Pixeln.

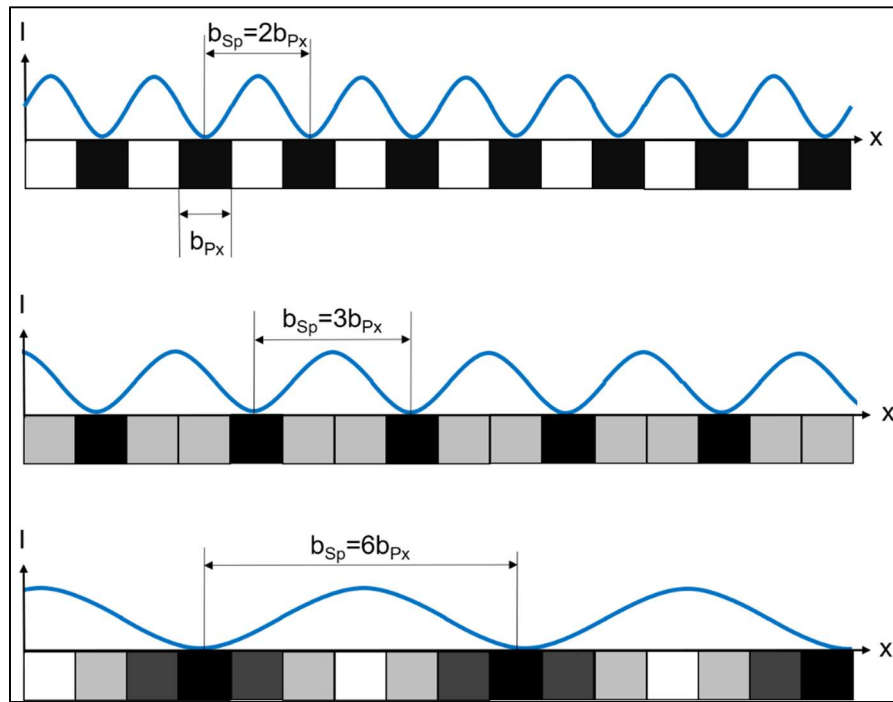


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung der erfassten Raumperioden (blau) durch einen Bildsensor (Pixelzeile mit Intensität als Grauwert je Pixel); die Raumperioden resultieren aus einem Specklemuster, hier mit homogener Specklebreite; (oben) maximal erfassbare Ortsfrequenz; (mittig) optimale Trägerfrequenz für FFT CF SPS; (unten) optimale Cut-off-Frequenz für FFT CF SPS

$$f_{\max} = \frac{1}{2b_{Px}} \quad (4.5.)$$

Mit

$f_{\max}$ = Maximale Abtastfrequenz

b_{Px} = Bildsensor Pixelbreite (Pixel sind typischerweise quadratisch)

Die Maximierung des Trägerspektrums erfolgt nun unter drei notwendigen Bedingungen:

- Die Breite des Trägerspektrums entspricht der Breite des Hintergrundspektrums, beschrieben durch den Wert der sog. Cut-off-Frequenz (s. [104], s. auch Kapitel 3.3.a).
- Das Trägerspektrum und das Hintergrundspektrum sollen sich nicht überlagern, einstellbar durch den Wert der Trägerfrequenz (s. [104], s. auch Kapitel 3.3.a).

⁸³ Intuitive Beschreibung; für „hell“ sind belichtete, für „dunkel“ unbelichtete Pixel gemeint bei maximaler Ausnutzung der Kamertiefenauflösung (s. Kapitel 2.6.a).

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

- Das Trägerspektrum darf nicht unterabgetastet werden (s. Kapitel 4.2), abgegrenzt durch den Wert der maximalen Abtastfrequenz.

Hieraus ergibt sich das optimale Trägerfrequenz-Spektrum S' beim FFT CF SPS nach Abbildung 4.7 mit den Werten für die Cut-off-Frequenz nach Gleichung 4.6 und für die Trägerfrequenz nach Gleichung 4.7. Die Gegebenheiten für die entsprechende Raumperiode auf dem Bildsensor sind in Abbildung 4.6 mittig bzw. unten schematisch angedeutet.

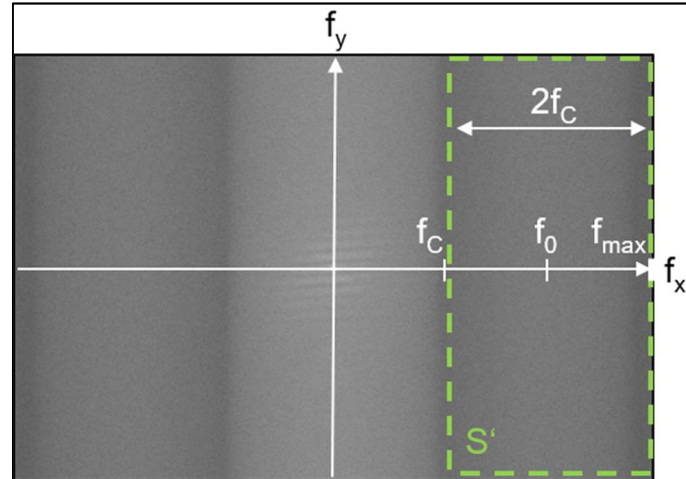


Abbildung 4.7: Optimales SPS Trägerfrequenzspektrum (grün markiert) mit den maximal einstellbaren Abmaßen im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung, unter Verwendung des VDS.

$$f_C = \frac{1}{3} f_{\max} = \frac{1}{6b_{Px}} \quad (4.6.)$$

$$f_0 = \frac{2}{3} f_{\max} = \frac{1}{3b_{Px}} \quad (4.7.)$$

Mit

f_C = Cut-off-Frequenz

Die Cut-off-Frequenz ergibt sich aus der Speckle-Beugung, also der Spaltbreite, s. Kapitel 2.2.c. Bei der optimalen Cut-off-Raumperiode⁸⁴ nach Gleichung 4.6 liegen Speckles mit einer minimalen Breite von 6-mal der Pixelbreite vor. Aufgrund der statistischen Verteilung der Specklegröße entspricht die mittlere Specklebreite dabei etwa dem doppelten Wert von 12-mal der Pixelbreite. Die mittlere räumliche Speckle-Frequenz ist demnach halb so groß. Mit der Gleichung für die mittlere Specklebreite bei einer Spaltbeugung (Kapitel 2.2.c, Gleichung 2.9) ergibt sich demnach Gleichung 4.8.

$$12b_{Px} = \frac{2}{f_C} = \bar{b}_{Sp} = 2 \frac{\lambda f}{b} \quad (4.8.)$$

⁸⁴ Kehrwert der Cut-off-Frequenz.

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

Mit

$\bar{b}_{Sp}$ = Mittlere Specklebreite

b = Breite der Spaltapertur

Durch Umstellen ergibt sich die optimale Spaltbreite beim SPS nach Gleichung 4.9.

$$b = \frac{\lambda f}{6b_{Px}} \quad (4.9.)$$

Der optimale Doppelspaltabstand des VDS ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung 4.7 in die umgestellte Gleichung 4.3 zu Gleichung 4.10.

$$a = \lambda f f_0 = \frac{\lambda f}{3b_{Px}} \quad (4.10.)$$

Beim Vergleich von Gleichung 4.9 und 4.10 ist einfach ersichtlich, dass zudem Gleichung 4.11 gilt.

$$a = 2b \quad (4.11.)$$

Das heißt die optimalen SPS-Parameter können durch den VDS eingestellt werden. Sobald die Laser-Wellenlänge, die Objektbrennweite und die Bildsensor Pixelbreite passend zur Messaufgabe gewählt wurden, wird mittels Gleichung 4.9 die Spaltbreite und mittels Gleichung 4.11 der VDS Doppelspaltabstand ermittelt. Abbildung 4.8 zeigt den optimalen VDS schematisch, wobei die Stegbreite zwischen den beiden Aperturen gleich der Spaltbreite ist.

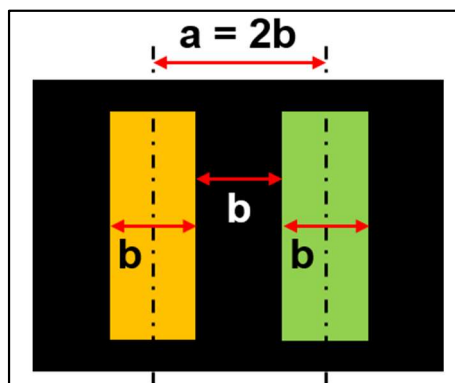


Abbildung 4.8: Optimal für SPS: VDS mit Doppelspaltabstand gleich der Spaltbreite für ein maximales Trägerspektrum im Fourier Amplitudenbild.

4.1.d. Vor- und Nachteile gegenüber MI FFT CF SPS oop ESPI

Im Folgenden werden, jeweils mit sinkender Priorität, die Vor- und Nachteile des neuen VDS MZ SPS Aufbaus aufgeführt, verglichen zum MI SPS Aufbau nach dem Stand der Forschung (s. Kapitel 3.3.a). Alle Vorteile des MI SPS, verglichen zum MI TPS, bleiben beim MZ SPS erhalten, während weitere Vorteile hinzukommen. Es besteht lediglich ein überschaubarer Nachteil des MZ Aufbaus gegenüber dem MI Aufbau, s. unten.

- + **Shearbetrag frei einstellbar:** Durch den VDS ist die Trägerfrequenz unabhängig vom Shearbetrag einstellbar. Dadurch kann er passend zur Messaufgabe eingestellt werden (s. auch Abbildung 4.3). Das SNR bei der Fehlstellendetektion ist auf diese Weise gesteigert, die Stör- und Dekorrelationsempfindlichkeit auf ein notwendiges Minimum reduziert. Die Deutung des Messergebnisses ist vereinfacht und die Verringerung der Messfläche an den Randbereichen des Messobjektes wird minimiert.
- + **Shearrichtung frei einstellbar:** Durch den VDS ist die Trägerfrequenz unabhängig von der Shearrichtung einstellbar. Dadurch kann sie passend zur Messaufgabe eingestellt werden (Bedeutung für ZfP s. auch Kapitel 4.3.b unten). Das SNR bei der Fehlstellendetektion ist auf diese Weise enorm gesteigert, die Stör- und Dekorrelationsempfindlichkeit auf ein notwendiges Minimum reduziert (s. auch Messversuchs des Autors et al. in [103]).
- + **Messlichtintensität verdoppelt:** Durch den Einsatz von Polarisationsoptiken wird die Messlichtintensität verdoppelt. Dies lässt eine gesteigerte Tiefenauflösung und eine schnellere, robustere Messung aufgrund kürzerer Belichtungszeiten zu (s. Kapitel 2.6.a). Dieser Vorteil wird durch die Entwicklung in Kapitel 4.2 unten stark ausgebaut.
- + **Bildabschattungen halbiert:** Im MZ sitzen die Blenden im Abstand von nur einer Strahlteilerwürfel-Kantenlänge vom Objektiv entfernt. Im MI durchlaufen die Wellenfronten den Strahlteiler zweifach auf ihrem Weg zum Objektiv (s. Kapitel 3 Abbildung 3.13). Das heißt der Abstand zwischen Objektiv und Blende ist doppelt so groß. Die sich für kurze Objektivbrennweiten einstellenden Bildabschattungen sind beim MZ demnach in etwa nur halb so groß, die Messfläche fast doppelt so groß. Als Referenz sei auf Kapitel 4.2 verwiesen, wo der Vorteil durch die dort beschriebene Entwicklung noch stark ausgebaut wird.
- + **Erweiterte Einsatzmöglichkeiten:** Durch optionale Erweiterungen des MZ Aufbaus sind ESPI, 3D ESPI, dual-shear ESPI und one-shot ESPI mit SPS möglich. Bezüglich der Vor- und Nachteile derer zum aktuellen Stand der Forschung sei auf die entsprechenden Unterkapitel in Kapitel 4.3 verwiesen.
- + **Laterale Auflösung verdoppelt:** Unter praktikablen Messeinstellungen für die shearografischen Prüfung können durch die entkoppelte Einstellung der Trägerfrequenz mittels VDS die SPS-Parameter optimal eingestellt werden. Dadurch resultiert eine ca. doppelt so hohe laterale Auflösung beim VDS MZ Aufbau. Die so erreichbare Praxistauglichkeit wird durch die Messungen in Kapitel 7 repräsentiert.
- **Größerer Aufbau:** Der MZ Aufbau beinhaltet zwei Strahlteiler, wodurch er größer als der MI Aufbau ist. Das Interferometer ist dadurch etwa doppelt so teuer. Der größere Aufbau macht die Messungen leicht störepfindlicher.

4.1.e. VDS MZ ESPI

Der neue Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau mit VDS bietet die Möglichkeit SPS ESPI zu betreiben. Hierzu wird einfach ein Diffusorglas⁸⁵ in einen Interferometerarm eingesetzt, wie Abbildung 4.9 links

⁸⁵ Auch *Groundglas* oder *Milchglas* genannt.

zeigt. Das Glas verursacht eine diffuse Verzerrung der Wellenfront, welche bei einer Messobjektverformung nahezu unverändert bleibt. Somit fungiert diese Wellenfront als Referenzfront (vgl. Kapitel 2.4.a). Das Messergebnis ist somit ein Hologramm entsprechend der oop Verformung. Abbildung 4.9 mittig und rechts zeigt dies für eine kreisrunde Fehlstelle bei der holografischen Prüfung.

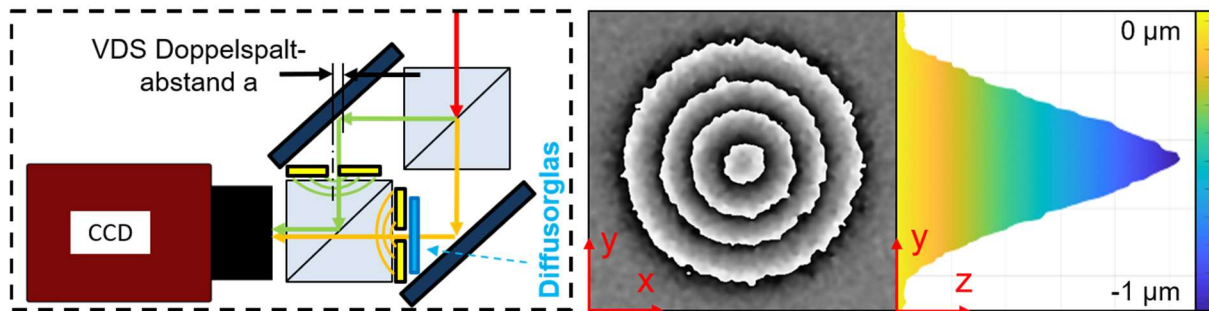


Abbildung 4.9: (Links) ESPI Messung mit dem neuen VDS MZ Aufbau durch Einsatz eines Diffusorglases; (mittig) das Hologramm (Bildausschnitt) zeigt das typische bullseye-Muster für eine kreisrunde Fehlstelle. (Rechts) mittels Demodulation wird die oop Verformung berechnet.

Verglichen zum aktuellen Stand der Forschung (vgl. Kapitel 3.3.d) ergeben sich folgende Vor- und Nachteile, jeweils mit sinkender Priorität:

- + **Geringe Kohärenzlänge:** Die Kohärenzlänge des eingesetzten Lasers muss lediglich ausreichend hoch sein, um die optische Pfaddifferenz innerhalb der beiden Interferometerarme auszugleichen. Dabei ist der Einsatz von günstigen, niederkohärenten Laserdioden möglich.
- + **Flexibel und robust:** Die Beleuchtung kann sensorextern realisiert werden, da es keine innere Strahlführung gibt. Die Störepfindlichkeit ist entsprechend gering und die Messrobustheit hoch. Dieser holografische Aufbau ist äußerst flexibel, da die Pfaddifferenz zwischen Messobjektwellenfront und Referenzwellenfront nicht vom Messobjektstand abhängt. Das heißt es gibt keine Phasenkontrastverluste bei variierenden Messsituationen.
- + **Klein und leicht justierbar:** Der Aufbau ist klein und der VDS leicht justierbar, was die Robustheit steigert und die Gerätekosten senkt.
- + **Gesteigerte laterale Auflösung:** Als Blenden kommen Spalte statt Kreisblenden zum Einsatz. Am VDS können so die optimalen Parameter für SPS eingestellt werden, s. Kapitel 4.1.c oben.
- + **Keine Bildabschattung:** Da keine Faser zur Einkopplung der Referenzwellenfront verwendet wird, ergeben sich keine inhomogenen Bildabschattungen aufgrund eines Objektes im optischen Pfad der Kamera.
- **Reduzierte Ergebnisqualität:** Die Verwendung des Diffusorglases, um eine unveränderliche Referenzwellenfront zu schaffen, erweist sich zwar als praktikabel, jedoch kann es Störungen⁸⁶ im Messergebnis verursachen. Die Art und Weise ist für praktische, robuste und schnelle Messungen entsprechend der Zielanforderung dieser Arbeit geeignet. Zur Ermittlung von hochgenauen Ergebnissen sei jedoch auf alternative Methoden verwiesen (vgl. Kapitel 3.3.d).

Abschließend werden ein weiterer Vorteil und ein Nachteil genannt, die sich auf andere interessante Forschungsaufbauten beziehen.

⁸⁶ Beispielsweise wurde Rauschen im Messergebnis beobachtet, das auf ein thermodynamisches Einschwingen des Diffusorglases vermuten lässt, gerade bei optisch-thermischer Messobjektanregung.

- + **Kein Referenzobjekt:** Für andere SPS ESPI Aufbauten ist ein Referenzobjekt zur Erzeugung der Referenzwellenfront notwendig, was zusätzlichen Aufbau- bzw. Geräteaufwand mit sich bringt, s. z. B. [76] und ([79] Kapitel 7.7).
- **Reduzierter Interferenzkontrast:** Durch das Diffusorglas wird die Amplitude der Referenzwellenfront, verglichen zur Objektwellenfront, nachweislich reduziert. Dadurch sinkt der Interferenzkontrast (s. Kapitel 2.2.b) und somit die erreichbare Tiefenauflösung. Eine Anpassung der Amplituden aufeinander erfordert zusätzlichen Geräteaufwand, was bei anderen SPS ESPI Aufbauten nicht nötig ist, s. z. B. ([79] Kapitel 7.7).

4.2. Gitterblenden

Die anfängliche Überlegung zur Erhöhung der Messlichtintensität bei der Verwendung der Blende für FFT CF SPS war es, die Apertur so groß wie möglich auszulegen. Wie oben in Kapitel 4.1.c gezeigt, gibt es eine notwendige Grenze, da es ansonsten zur Vermischung des Hintergrundspektrums mit dem Trägerspektrum kommt und die Interferenzphase nicht entkoppelt ausgewertet werden kann. Stattdessen kann jedoch die Anzahl an Aperturen in einer Blende erhöht werden, wie es im Folgenden erörtert wird. Für zwei Aperturen in einer Blende, also einen Doppelspalt, stellt sich eine Trägerfrequenz ein, wie bereits beim VDS gezeigt, s. Kapitel 4.1.b. Das so entstehende Trägerspektrum enthält nicht die notwendige Interferenzphaseninformation für die Interferometrie, da es an nur einer Blende, also nur durch eine Wellenfront, erzeugt wird. Je nach Trägerfrequenz überlagert es sich mit dem VDS-Trägerspektrum und macht SPS so unmöglich.

4.2.a. Ansatz und Auslegung

Die Idee ist nun, dieses Phänomen so auszulegen, dass es im Fourier Bild keinen störenden Einfluss auf die SPS Auswertung hat. Demnach ist es optimal, wenn die Trägerfrequenz sich mit dem sowieso nutzlosen Hintergrundspektrum überlagert. Dies ist der Fall, wenn die Trägerfrequenz gleich 0 ist, was für einen Doppelspalt ohne Spaltabstand eintritt. Aus geometrischer Sicht handelt es sich dann nicht um einen Doppelspalt, sondern einen Einfachspalt, was natürlich nicht zielführend bzgl. der Erhöhung der Messlichtintensität ist. Stattdessen kann die Trägerfrequenz so erhöht werden, dass sie durch den Bildsensor als frequenzlos wahrgenommen wird. Dies ist der Fall, wenn die Specklebreite gleich der Sensor-Pixelbreite eingestellt wird, wie Abbildung 4.10 zeigt. Hier tritt eine räumliche Unterabtastung, auch *Aliasing* genannt, ein. Die Specklefrequenz übersteigt die maximal erfassbare Frequenz des Bildsensors, vgl. auch Abbildung 4.6. Konkret wird die Specklefrequenz gleich der zweifachen maximalen Frequenz gewählt.

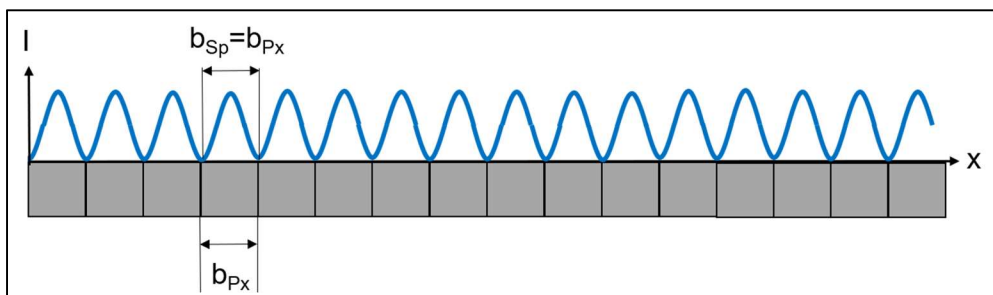


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung der erfassten Raumperiode (blau) durch einen Bildsensor (Pixelzeile mit Intensität als Grauwert je Pixel), resultierend aus einem Specklemuster mit homogener Specklebreite; hier dargestellt eine Raumperiode entsprechend der Pixelbreite, welche folglich als frequenzlos erfasst wird (ersichtlich am einheitlichen Pixel-Grauwert).

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

Die Gegebenheiten im Fourier Amplitudenbild bei Erhöhung der Trägerfrequenz zeigt Abbildung 4.11. (Die Breite des Trägerspektrums wurde aus Anschaulichkeitsgründen schmaler gewählt, als es optimal wäre.) Bei einer Erhöhung der Trägerfrequenz über die maximal erfassbare Frequenz hinaus kehrt sich das Trägerspektrum am Fourier Bildrand um und bewegt sich wieder auf die Bildmitte zu. Dies bedeutet, dass die Frequenz aufgrund der Unterabtastung zunehmend als niederfrequenter wahrgenommen wird.

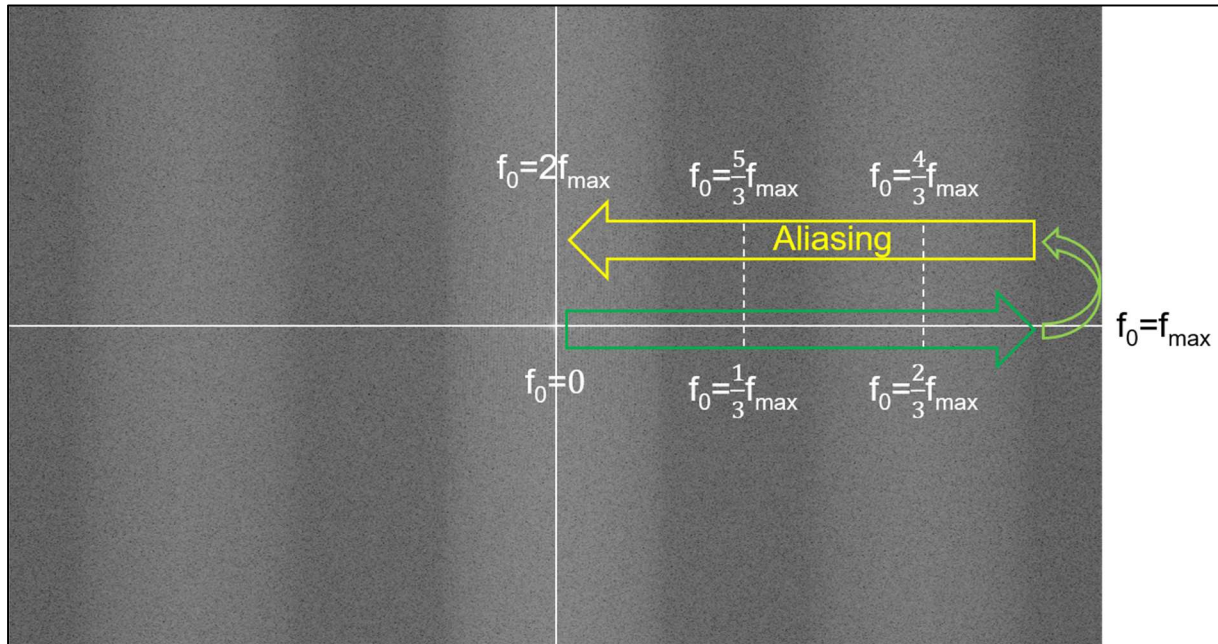


Abbildung 4.11: Auswirkung bei Erhöhung der Trägerfrequenz eines Spektrums im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung; bei Übersteigung der maximal erfassbaren Raumfrequenz tritt Unterabtastung (Aliasing) ein; bei weiterer Erhöhung der Trägerfrequenz wird das Spektrum am Fourier Bildrand „reflektiert“ und bewegt sich wieder zur Bildmitte hin; bei einer Trägerfrequenz doppelt so hoch wie die maximal erfassbare Frequenz liegt das Spektrum in der Bildmitte, was gleichzusetzen ist mit einem frequenzlosen Spektrum.

Es wird also ein Doppelspalt generiert, der aufgrund seines Spaltabstands ein Trägerspektrum erzeugt, welches sich mit dem Hintergrundspektrum überlagert. Diese Gegebenheit ist nicht auf zwei Spaltaperturen begrenzt. Von daher kann ein regelmäßiges Gitter mit entsprechender Gitterfrequenz ausgelegt werden. Diese Trägerfrequenzen werden als Gitterfrequenzen, bzw. Gitterspektren bezeichnet, der Spaltabstand als Gitterkonstante. Am Gitter entstehen eine Fülle an Gitterspektren, jeweils für eine Apertur mit jeder anderen Apertur der Gitterblende. Unter den oben genannten Gegebenheiten liegt jedes Gitterspektrum dabei immer in der Fourier Bildmitte. Bei nebeneinander liegenden Aperturen ist es einfach unterabgetastet, wie oben beschrieben. Bei weiter entfernten Aperturen ist es mehrfach unterabgetastet nach demselben Prinzip. Die Gitterkonstante kann über die erwähnte Bedingung nach Gleichung 4.12 gefunden werden.

$$f_g = 2f_{\max} = \frac{1}{b_{px}} \quad (4.12.)$$

Mit

f_g = Gitterfrequenz

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

Verglichen zur Beziehung für die optimale Spaltbreite beim VDS SPS nach Gleichung 4.9 oben ergibt sich die Gitterkonstante nach Gleichung 4.13.

$$g=6b$$

(4.13.)

Mit

g = Gitterkonstante

4.2.b. Anwendung

Abbildung 4.12 zeigt die im Technikum OGKB entwickelte, neue Gitterblende für FFT CF SPS.

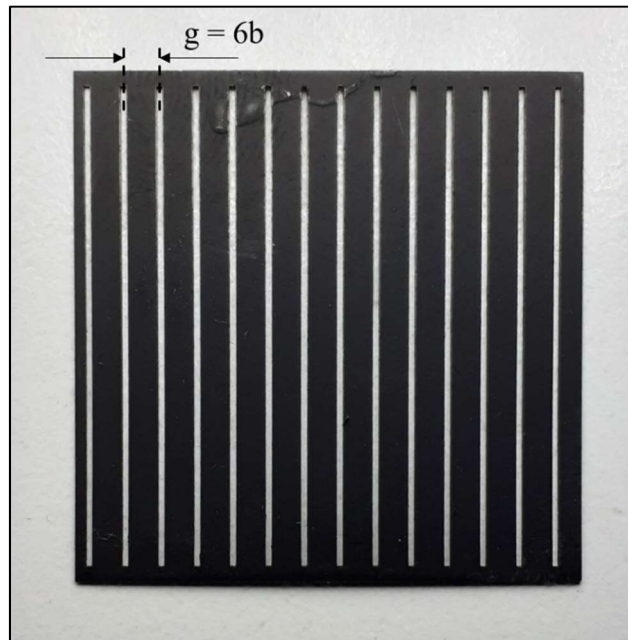


Abbildung 4.12: Im Technikum OGKB entwickelte Gitterblende für FFT CF SPS mit stark erhöhter Messlichtintensität; die Gitterfrequenz der Aperturen muss gleich der 6-fachen optimalen Spaltbreite sein, damit die Gitterspektren sich mit dem Hintergrundspektrum überlagern und die Trägerfrequenz-Auswertung nicht stören.

Durch die erhöhte Anzahl an Aperturen, verglichen zur bisher verwendeten Einfachapertur, wird die Messlichtintensität um einen entsprechenden Faktor gesteigert. Der Faktor ist abhängig von der Eingangsfläche des verwendeten Objektivs. Praktisch wird die Messlichtintensität um einen Faktor von bis zu 10 gesteigert. Verglichen zum TPS ohne Blende wird, entsprechend der Gitterkonstanten, immer $1/6$ der Messlichtintensität erreicht. Mit einer Einfachapertur liegt der Wert beim typischen Anwendungsfall nur bei etwa 1 %. Darüber hinaus werden auftretende Bildabschattungen bei der Verwendung der neuen Gitterblende nahezu vollständig eliminiert. Beispielsweise verdoppelt sich so die Messfläche unter der Verwendung eines typischen Objektivs mit einer Brennweite von 25 mm. Diese beiden genannten Vorteile wurden in der Originalveröffentlichung des Autors et al. experimentell bewiesen [106]. Abbildung 4.13 zeigt den Ergebnisvergleich mit Einfach- und mit neuer Gitterblende zusammengefasst.

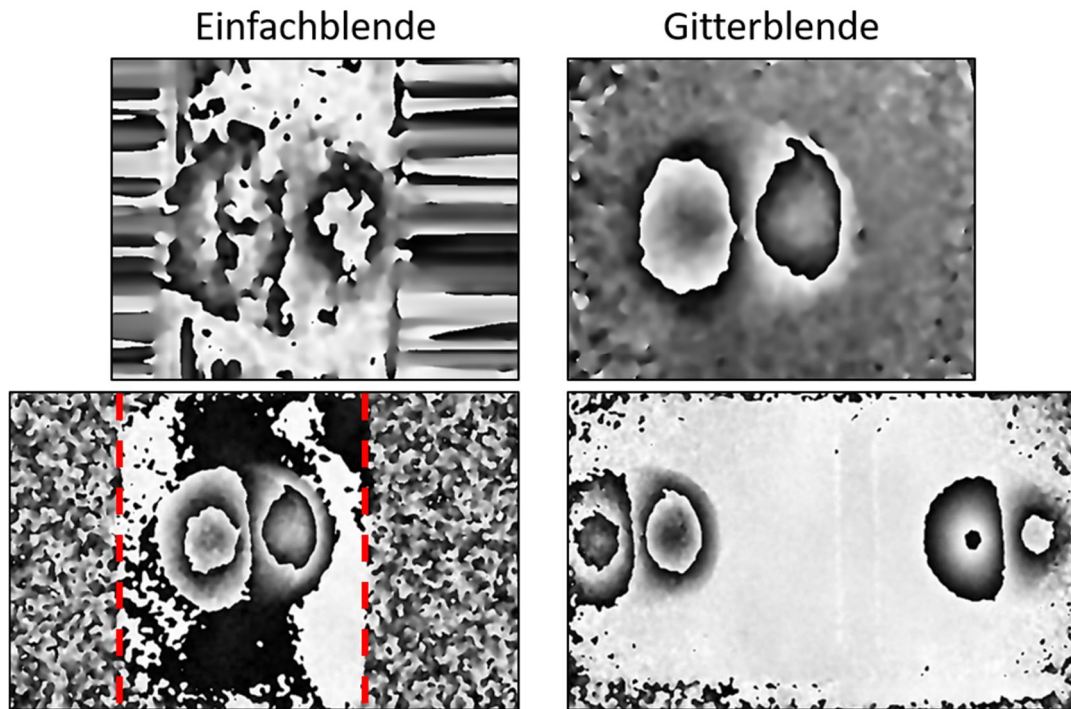


Abbildung 4.13: (Obere Zeile) Vergleich der Ergebnisqualität beim FFT CF SPS DS mit Einfachblende (links) und mit Gitterblende (rechts); die Versuchsbedingungen werden konstant gehalten. Die Belichtungszeit beträgt 3,5 ms. Bei der Verwendung der Einfachblende ist der Fehlstellenindikator im Shearogramm nur andeutungsweise erkennbar (links). Aufgrund des starken Rauschens durch die Unterbelichtung ist eine weitere Auswertung unmöglich. Die Bildränder sind nicht verwertbar. Bei der Verwendung der Gitterblende weist der Indikator einen hohen Phasenkontrast auf und kann weiterverarbeitet werden (rechts). Die Bildränder sind leicht verrauscht.

(Untere Zeile) Vergleich der Messflächen beim FFT CF SPS DS mit Einfachblende (links) und mit Gitterblende (rechts); als Messobjekte dienen einfache Prüfplatten mit rückseitiger, mechanischer Belastung, um die Indikatoren in den Shearogrammen zu erzeugen. Die Versuchsbedingungen werden konstant gehalten. Lediglich die Belichtungszeit wird für den Versuch jeweils angepasst. Es wird ein typisches Objektiv mit 25 mm Brennweite verwendet. Bei der Verwendung der Einfachblende kann aufgrund der Abschattungen in etwa nur die halbe Bildbreite zur Auswertung genutzt werden (links). Die Grenzen der Messfläche sind mit roten Linien markiert. Bei der Verwendung der Gitterblende steht eine Messfläche entsprechend der vollen Bildbreite zur Verfügung (rechts).

Die Vorteile durch die neue Gitterblende sind, neben dem MZ Aufbau mit VDS, ein entscheidender Schritt in Richtung der industriellen Nutzbarkeit der Shearografie unter schwierigen Umgebungsbedingungen (s. Kapitel 7 und 8). Es ergeben sich eine enorm gesteigerte Robustheit gegen Störeinflüsse, eine gesteigerte Messauflösung, eine kürzere Messzeit, eine erhöhte Lasersicherheit und geringere Messgerätekosten (s. Kapitel 2.6, 2.2.e und 2.2.d). Die Verwendung einer Gitterblende für FFT CF SPS ist nicht auf den Interferometer-Aufbau begrenzt. Sie kann beispielsweise ebenfalls für den MI Aufbau (s. Kapitel 3.3.a) verwendet werden. Beim VDS MZ Aufbau kommen zwei Gitterblenden zum Einsatz. Je Apertur-„Pärchen“ wird dabei ein VDS durch Verschieben der beiden Gitterblenden gegeneinander erzeugt, vgl. zu Abbildung 4.2. Streng genommen entsteht somit ein Gitter aus vielen virtuellen Doppelspalten, wie Abbildung 4.14 zeigt. Im folgenden Kapitel werden Erweiterungen des VDS MZ Aufbaus vorgestellt, welche ebenfalls erweiterte Gitterblenden verwenden. Die Gitterblenden werden in den Unterkapiteln dargestellt.

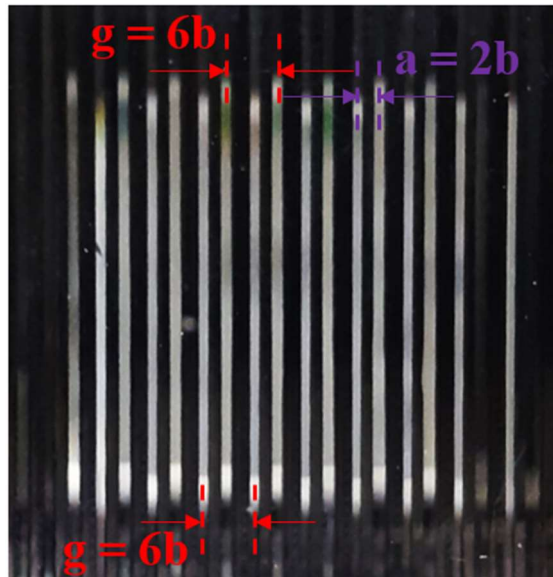


Abbildung 4.14: Foto der VDS Erzeugung mit zwei Gitterblenden unter Weißlicht; eine der beiden Blenden ist etwas nach oben verschoben und ihre Gitterkonstante oben aufgetragen. Dieselbe Gitterkonstante der zweiten Blende ist unten aufgetragen. Werden beide Gitter am Strahlteiler gegeneinander verschoben, entstehen je Apertur-„Pärchen“ virtuelle Doppelspalte mit dem oben rechts aufgetragenen Doppelspaltabstand.

4.3. Weiterentwicklungen des VDS MZ

Ziel der Weiterentwicklung des VDS MZ Aufbaus ist es, unter Beibehaltung aller oben genannten Vorteile weitere Messgrößen der Shearografie erfassbar zu machen (vgl. Kapitel 2.4.b). In den Unterkapiteln wird gezeigt, dass die unterschiedlichen Messgrößen je nach Messaufgabe entscheidend sind für ein hohes SNR bei der shearografischen Prüfung. Wie bereits beim Stand der Forschung als zielführend erörtert, wird hierbei der Einsatz einer einzigen Kamera vorausgesetzt (s. Kapitel 3.1). Zudem wird eine sequenzielle Erfassung der unterschiedlichen Messgrößen nicht in Betracht gezogen. Hierdurch würden sich Begrenzungen bei der dynamischen Messobjektanregung ergeben, die den Fehlstellenkontrast erheblich senken (s. Kapitel 6.2.c). Dementsprechend müssen im Bild mehrere unterscheidbare Spektren gleichzeitig erzeugt werden. Zur Unterscheidung wird hierbei die Trägerfrequenz, die Wellenlänge und die Polarisierung des Specklemusters ausgenutzt. Es sei angemerkt, dass die Messqualität, je nach Anzahl an Spektren im Bild, um einen entsprechenden Faktor abnimmt. Dies ist der steigenden Komplexität des Messaufbaus geschuldet.

Bei der im Folgenden beschriebenen 3D ESPSI und 3D ESPI werden drei Spektren unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt. Bei der dual-shear ESPSI entstehen zwei Spektren unterschiedlicher Polarisierung. Bei der one-shot ESPSI werden sechs Spektren durch drei Wellenlängen mit je zwei Polarisierungsrichtungen unterschiedlicher Trägerfrequenz erzeugt. Es gibt weitere Konstellationen der drei Unterscheidungskriterien, um die Aufgaben unten zu erfüllen. Sofern nicht anders angemerkt, wird jedoch die aus Sicht des Autors vielversprechendste Methode vorgestellt.

4.3.a. 3D ESPSI und 3D ESPI

In einer Veröffentlichung des Autors et al. wurde ein Aufbau vorgestellt, der erstmalig reine in-plane SPS ESPSI mit hoher Ergebnisqualität ermöglicht [105]. Dabei werden nicht nur ein in-plane (ip) Anteil, sondern gleich zwei ip Anteile parallel erfasst. Insgesamt können mit dem Aufbau drei der shearografischen Messgrößen in einer Shearrichtung gleichzeitig erfasst werden. Die Methode wird im Folgenden

auch als *3D ESPSI* bezeichnet. Für einen Shear in x-Richtung ergeben sich beispielsweise die ip Dehnung $\partial u/\partial x$, die ip Gleitung $\partial v/\partial x$ und die oop Neigung $\partial w/\partial x$. In der Veröffentlichung wurde der Aufbau mittels 3-Wellenlängen RGB Beleuchtung durch drei Laserdioden und RGB Farbkamera mit Bayer-Filtermaske realisiert. Als Interferometer wurde der MI Aufbau mit Einfachblende von Xie et al. verwendet, vgl. Kapitel 3.3.a. Durch die drei Laserdioden kann die sog. *3 out-of-plane Beleuchtungsmechanik* realisiert werden, welche die passende Mechanik im Messergebnis gewährleistet ([48] Kapitel 3.2.1). Die Mathematik in der Veröffentlichung des Autors et al. wurde für die 3-Wellenlängen Beleuchtung angepasst und sind weiter unten dargestellt.

Im Folgenden wird die Methode für den VDS MZ Aufbau mit Gitterblenden vorgestellt. Dabei sind einige anfängliche Beschreibungen gleich denen aus der Originalveröffentlichung. Für Details sei auf diese verwiesen. Die anschließend vorgestellten Besonderheiten am VDS MZ Aufbau sind die verwendeten Gitterblenden sowie die Anwendung der 3D ESPI.

Zur Durchführung der 3D ESPSI am VDS MZ mit Gitterblenden ergeben sich folgende Unterschiede verglichen zur Beschreibung in Kapitel 4.1 und 4.2: Verwendung von 3 Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge, Verwendung einer Farbkamera und Verwendung von 2 unterschiedlichen Gitterblenden mit RGB Filtern.

3 out-of-plane Mechanik mit RGB Beleuchtung

Bei orthogonaler Beobachtung eines Messobjektes aus Richtung der z-Achse ergibt sich für eine beliebige Beleuchtungsrichtung im Raum das shearografische Demodulationsergebnis nach Gleichung 4.14. Es ist abhängig von zwei Raumwinkeln der Beleuchtung und beinhaltet alle drei Messgrößen der gewählten Shearrichtung, hier mit Shear in x-Richtung (s. auch Kapitel 2.4.b Gleichung 2.17).

$$\Delta' = \frac{2\pi\delta_x}{\lambda} \left(|\sin(\Theta_{xz})| \cos(\Theta_{xy}) \frac{\partial u}{\partial x} + |\sin(\Theta_{xz})| \sin(\Theta_{xy}) \frac{\partial v}{\partial x} + (1 + \cos(\Theta_{xz})) \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (4.14.)$$

Mit

Δ' = Differenzphasenbild demoduliert

δ_x = Shearbetrag in x-Richtung

λ = Wellenlänge

Θ_{xz}, Θ_{xy} = Beleuchtungswinkel in der xz-Ebene, Beleuchtungswinkel in der xy-Ebene

$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial x}$ = ip Dehnungsanteil, ip Gleitungsanteil, oop Neigungsanteil

Werden zur Beleuchtung drei Laserquellen gewählt mit einem Winkelabstand von 120° auf der xy-Ebene, beginnend bei 0°, und wird der Beleuchtungswinkel in der xz-Ebene für alle 3 Quellen gleich eingestellt, ergibt sich das sog. *3 out-of-plane Beleuchtungsmechanik* Matrixsystem nach Gleichung 4.15, s. auch ([48] Kapitel 3.2.1). Das System wurde bereits für drei unterschiedliche Wellenlängen der Laserquellen, rot, grün und blau (RGB), modifiziert. Abbildung 4.15 verbildlicht diese Beleuchtungsbedingungen.

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

$$\frac{1}{2\pi\delta_x} \begin{pmatrix} \Delta'_R \lambda_R \\ \Delta'_B \lambda_B \\ \Delta'_G \lambda_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\sin(\Theta_{xz})| & 0 & (1+\cos(\Theta_{xz})) \\ -\frac{|\sin(\Theta_{xz})|}{2} & \frac{\sqrt{3}|\sin(\Theta_{xz})|}{2} & (1+\cos(\Theta_{xz})) \\ -\frac{|\sin(\Theta_{xz})|}{2} & -\frac{\sqrt{3}|\sin(\Theta_{xz})|}{2} & (1+\cos(\Theta_{xz})) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial u/\partial x \\ \partial v/\partial x \\ \partial w/\partial x \end{pmatrix} \quad (4.15.)$$

Mit

Index R, G, B = Indikator für einen Parameter bzgl. der roten, grünen oder blauen Laserquelle

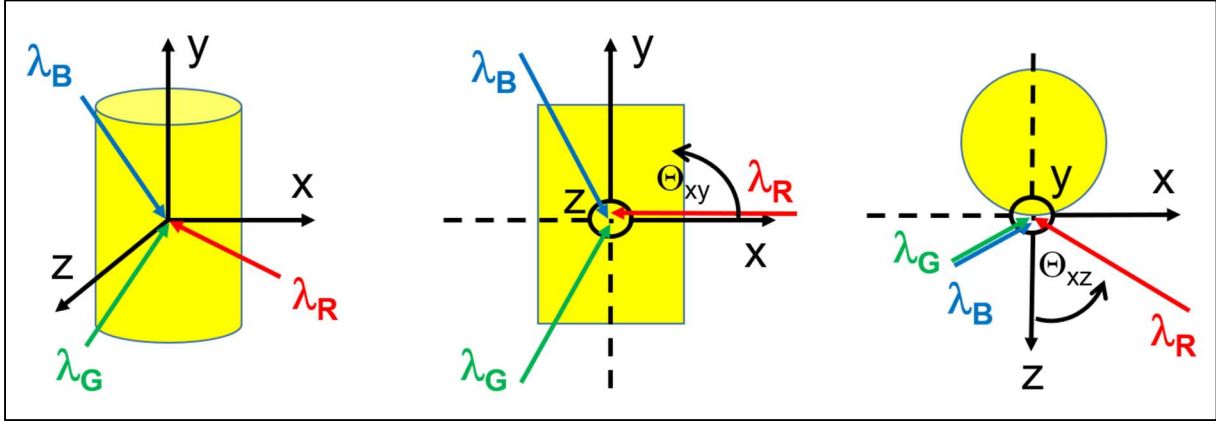


Abbildung 4.15: Schematische Darstellung der vektoriellen Beleuchtungsbedingungen bei der 3 out-of-plane Mechanik mit drei verschiedenen Wellenlängen, rot, grün und blau; axonometrische Ansicht links, Vorderansicht mittig und Draufsicht rechts; in der Draufsicht sind der grüne und der blaue Vektor aufgrund ihrer Projektionen in der xz-Ebene nur halb so lang wie der rote Vektor. Beträgsmäßig sind alle Vektoren gleich lang. Die z-Achse entspricht der Beobachtungsrichtung der Kamera.

Durch Umstellen des linearen Gleichungssystems 4.15 ergeben sich die drei mechanischen Messgrößen der Shearografie in eine Shearrichtung nach Gleichung 4.16 (reine oop Neigung), 4.17 (reine ip Dehnung) und 4.18 (reine ip Gleitung). Aufgrund der unterschiedlichen Wellenlängen der Laserquellen ergeben sich unterschiedliche Streifenordnungen in den einzelnen Shearogrammen. Somit ist zunächst auch das Demodulationsergebnis je Wellenlänge unterschiedlich. Dieses muss, wie in den Gleichungen erkennbar, jeweils mit der entsprechenden Wellenlänge gewichtet werden, bevor es mit den anderen Demodulationsergebnissen verrechnet werden kann.

$$\frac{\Delta'_R \lambda_R + \Delta'_B \lambda_B + \Delta'_G \lambda_G}{2\pi\delta_x * 3 (1+\cos(\Theta_{xz}))} = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (4.16.)$$

$$\frac{2\Delta'_R \lambda_R - \Delta'_B \lambda_B - \Delta'_G \lambda_G}{2\pi\delta_x * 3 \sin(\Theta_{xz})} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4.17.)$$

$$\frac{\Delta'_B \lambda_B - \Delta'_G \lambda_G}{2\pi\delta_x * \sqrt{3} \sin(\Theta_{xz})} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4.18.)$$

Auswertung mittels Farbkamera und Messversuch

Um die drei sich überlagernden Specklemuster je Laserwellenlänge separat zu erfassen, wird entsprechend der RGB Beleuchtung eine RGB Farbkamera verwendet. Es wird eine Bildaufnahme vor und nach

der Messobjektanregung erfasst. Das jeweilige Bild kann in die drei Farbkanäle zerlegt werden, s. Kapitel 2.3. Anschließend erfolgt je Kanal die Berechnung des Shearogramms nach der FFT CF SPS Methode. Abbildung 4.16 verbildlicht den Vorgang durch einen beispielhaften Messversuch.

Es sei angemerkt, dass bei der Generierung des grünen Kanals je Pixelpaket (RGGGB) immer nur einer der beiden grünen Pixel, dabei jeweils der gleiche, verwendet wird. Ein Versuch, beide grünen Pixel je Paket zur Verdopplung der Messlichtintensität aufzusummieren, resultierte in starkem Ergebnisrauschen. Die vertikale Specklehöhe bleibt durch die Spaltblende unverändert und entspricht durchschnittlich ca. der Höhe eines Pixels. Somit wird als Grund des Rauschens angenommen, dass beim Aufsummieren zwei verschiedene, lateral versetzte Speckles vermischt werden, wodurch die Phasenauswertung nicht eindeutig ist.

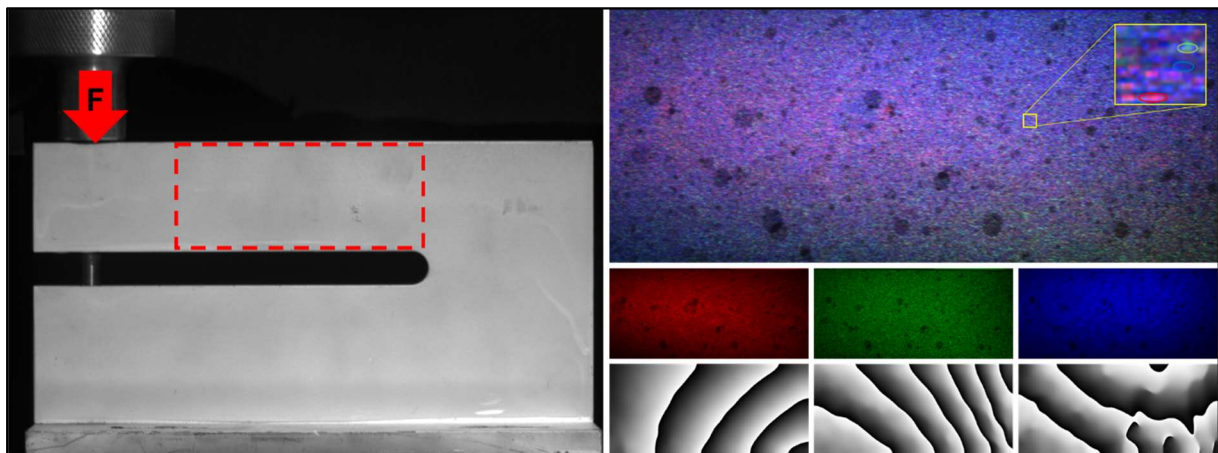


Abbildung 4.16: (Links) Kragbalken als Messobjekt mit Krafteinleitung mittels Zuganker (Pfeil) und markierter Messfläche (gestrichelter Rahmen); (rechts, obere Zeile) Farbbildaufnahme für RGB beleuchtetes Messobjekt mit Detailansicht zur Veranschaulichung der unterschiedlich farbigen Speckles; es sind zusätzlich schwarze Punkte auf dem Messobjekt sichtbar, die für DIC verwendet werden und hier ignoriert werden können. (Rechts, mittlere Zeile) die drei separaten RGB Farbkanäle zeigen das entsprechend farbige Specklemuster. (Rechts, untere Zeile) Shearogramm je Farbkanal nach Messobjektbelastung.

Das jeweilige Shearogramm wird demoduliert und die drei Ergebnisse miteinander verrechnet entsprechend der Gleichungen 4.16, 4.17 und 4.18 oben. In der Originalveröffentlichung des Autors et al. wurde eine Validierung dieser neuen Methode durchgeführt, verglichen zu einer TPS Messung nach dem Stand der Technik, wie in Abbildung 4.17 dargestellt [105]. Die Abweichungen lagen jeweils unterhalb von 15 %, was unter Berücksichtigung der Laborbedingungen bei dem Messversuch als zufriedenstellend angenommen werden konnte.

Es sei angemerkt, dass diese Methode mit Farbkamera und RGB Gitterblenden (s. unten) auch für nur zwei Laserwellenlängen, zur Auswertung des oop und nur eines ip Anteils, verwendet werden kann. Dabei wird die 2 out-of-plane Beleuchtungsmechanik eingestellt, wie in Kapitel 3.3.b für den Aufbau von Xie et al. beschrieben. Auf diese Weise kann eine Laserquelle eingespart und die Beleuchtungssituation vereinfacht werden, während alle unten genannten Vorteile des neuen Aufbaus gewährleistet bleiben.

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

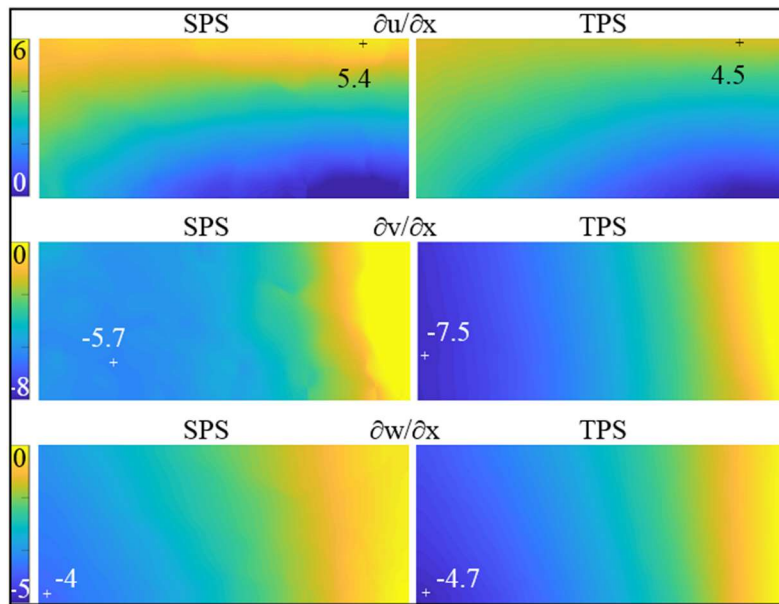


Abbildung 4.17: Vergleich der Messergebnisse aus dem Versuch nach Abbildung 4.16 für 3 out-of-plane RGB SPS ESPSI (linke Spalte) und sequenzielle TPS ESPSI (rechte Spalte) in der Einheit $[10^{-5} \text{ m/m}]$; in-plane Dehnungsanteil (obere Zeile), in-plane Gleitungsanteil (mittlere Zeile) und out-of-plane Neigungsanteil (untere Zeile); die Farbskala ist je Zeile angepasst. Die Stelle des Extremwerts je Ergebnis ist markiert und quantifiziert.

Optimale SPS-Parameter mittels RGB Gitterblenden

Um die Vorteile des VDS MZ Aufbaus und der Gitterblenden beim 3 out-of-plane RGB SPS nutzbar zu machen, müssen optimale Parameter im Fourier Raum eingestellt werden, vgl. Kapitel 4.1.c. Zunächst wird die optimale Apertur-Spaltbreite betrachtet. Beim Farbbild, erfasst durch eine Kamera mit Bayer-Filtermaske, gibt nur jeder zweite Pixel in der Bildmatrix die Intensität derselben Farbe wieder. Das heißt bei der Kanalzerlegung des Farbbildes in die drei Anteile R, G, und B muss der Abstand der Abtaststellen für eine Raumperiode, also die Pixelbreite, als doppelt so groß angenommen werden. Dieser Sachverhalt wird durch Gleichung 4.19 beschrieben und durch Abbildung 4.18 verbildlicht. Die Gleichung kann als angepasste Gleichung für die optimale Apertur-Spaltbreite für den Anwendungsfall mit RGB Kamera angesehen werden (vgl. zu Gleichung 4.9 oben). Entsprechend dem doppelten Abstand der Abtaststellen muss die Specklebreite ebenfalls doppelt so groß eingestellt werden. Dies wird durch eine stärkere Beugung realisiert. Dazu wird die Apertur-Spaltbreite halb so groß gewählt, verglichen zum Anwendungsfall mit bw Kamera.

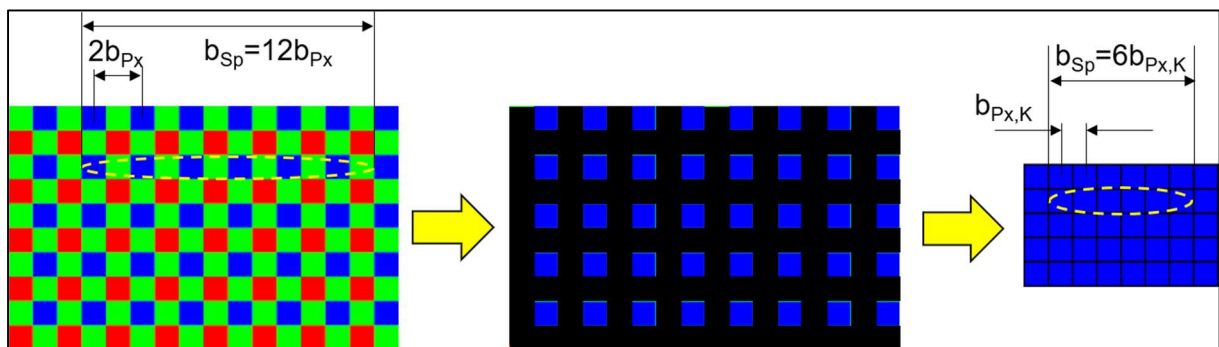


Abbildung 4.18: Ein Speckle (gelb gestrichelt umkreist), der auf einem Farbkamerachip mit einer Breite von 12 Pixelgrößen abgebildet wird (links), wird nach der Kanaltrennung (mittig und rechts) mit einer Breite von 6 Pixelgrößen der gleichen Farbe wahrgenommen.

$$b_{\text{RGB}} = \frac{\lambda_{\text{RGB}} f}{6b_{\text{Px,K}}} = \frac{\lambda_{\text{RGB}} f}{12b_{\text{Px}}} = \frac{b}{2} \quad (4.19.)$$

$$\text{mit } b_{\text{Px,K}} = 2b_{\text{Px}}$$

Mit

b_{RGB} = Optimale Spaltbreite beim RGB FFT CF SPS

λ_{RGB} = Wellenlänge(n) beim RGB FFT CF SPS

$b_{\text{Px,K}}$ = Angenommene Bildsensor Pixelbreite nach Kanalzerlegung (s. auch Kapitel 2.3)

Die optimale Spaltbreite ist je Laserwellenlänge unterschiedlich, da die Beugung wellenlängenabhängig ist. Kürzere Wellenlängen müssen stärker gebeugt werden und erfordern schmalere Spaltbreiten. Die Einstellung der optimalen Trägerfrequenz sowie der Gitterfrequenz erfolgt, analog zur Anwendung mit bw Kamera, nach Gleichung 4.20 und 4.21. Beugungsbedingt sind die optimalen Werte ebenfalls wellenlängenabhängig.

$$a_{\text{RGB}} = 2b_{\text{RGB}} \quad (4.20.)$$

$$g_{\text{RGB}} = 6b_{\text{RGB}} \quad (4.21.)$$

Mit

a_{RGB} = Optimaler VDS-Abstand beim RGB FFT CF SPS

g_{RGB} = Gitterkonstante beim RGB FFT CF SPS

An dieser Stelle sei abermals auf den Vorteil der Gitterblende hingedeutet. Dadurch, dass die Spaltbreite hier halb so groß gewählt werden muss (Gleichung 4.19), halbiert sich ebenfalls die Messlichtintensität, welche die Apertur durchläuft. Aufgrund der Abhängigkeit der Gitterkonstanten von der Spaltbreite (Gleichung 4.21), fällt diese jedoch ebenfalls halb so groß aus. Dadurch stehen nun für einen bestimmten Bereich doppelt so viele Aperturen zur Verfügung, wodurch sich die Gesamtmesslichtintensität nicht ändert.

Dieser Sachverhalt kann für die konstruktive Realisierung einer Gitterblende für 3D ESPSI jedoch nicht vollständig umgesetzt werden. Konkret wird eine Blende benötigt, die je RGB Wellenlänge unterschiedliche Spaltbreiten aufweist. Hierzu werden separate Spaltaperturen vorgesehen, die jeweils mit einer kostengünstigen, optischen Absorptionsfilterfolie versehen werden. Entsprechend der passierenden Wellenlänge wird ein hoher Transmissionsgrad⁸⁷ gewählt, für alle anderen Wellenlängen ein hoher Absorptionsgrad. Die Blende wird nun mit einem Gitter dieser wellenlängenabhängigen Aperturen versehen. Da die Gitterkonstante je Wellenlänge unterschiedlich ist, kommt es örtlich zu Überlagerungen mehrerer Aperturen, was optisch nicht ohne Weiteres abbildbar ist. Konstruktiv werden daher Unregelmäßigkeiten je Gitter vorgesehen, d. h. ein örtliches Auslassen von Aperturen. Dies erfolgt so, dass global gesehen eine möglichst gleichmäßige Verteilung der unterschiedlichen wellenlängenspezifischen Aperturen vorhanden ist. Auf diese Weise werden Bildabschattungen minimiert. Abbildung 4.19

⁸⁷ Typisch: rot ca. 90 %, grün ca. 50 %, blau ca. 40 %.

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

zeigt die im OGKB entwickelte RGB Gitterblende für 3D ESPSI am VDS MZ Aufbau, welche die Bedingungen erfüllt. Die Auslassungen im Gitter können durch eine variable Gitterkonstante nach der angepassten Gleichung 4.22 beschrieben werden.

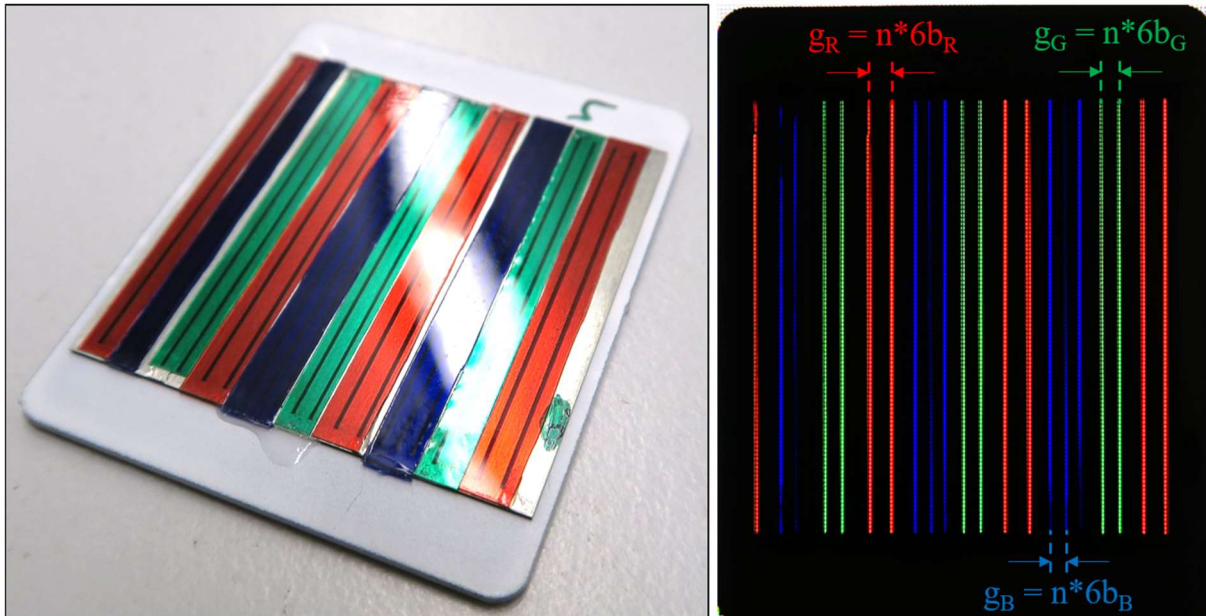


Abbildung 4.19: Im Technikum OGKB entwickelte RGB Gitterblende für 3D ESPSI am VDS MZ Aufbau; (links) das Foto zeigt die aufgetragenen Absorptionsfilterfolien, je für eine bestimmte Anzahl an Aperturen mit einer wellenlängenspezifischen Spaltbreite. Zur Minimierung von Bildabschattungen werden global gesehen mehrere Apertur-„Pakete“ einer bestimmten Farbe gleichmäßig verteilt. (Rechts) Foto der RGB Blende, mit Weißlicht rückseitig durchleuchtet; die notwendigen Auslassungen in den wellenlängenspezifischen Gittern folgen den angegebenen Gleichungen entsprechend einem Vielfachen der erforderlichen Gitterkonstanten. Aufgrund einer suboptimalen Weißlichtquelle weisen die Spalte eine Frequenz regelmäßiger schwarzer Punkte und teilweise dunkler Stellen auf, die es zu ignorieren gilt.

$$g_{\text{RGB}} = n \cdot 6b_{\text{RGB}} \quad (4.22.)$$

mit $n \in \mathbb{N}$

Mit

n = Zählwert

Zur Einstellung des VDS wird eine zweite RGB Gitterblende benötigt. Da der VDS-Abstand wellenlängenspezifisch ist (s. Gleichung 4.20), muss diese leicht modifiziert werden, denn es gilt:

$$a_B < a_G < a_R$$

Von daher müssen zwei der Gitter leicht verschoben zum dritten Gitter eingebracht werden, beispielsweise nach Gleichung 4.23 und 4.24.

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

$$u_G = 2b_G - 2b_B \quad (4.23.)$$

$$u_R = 2b_R - 2b_B \quad (4.24.)$$

Mit

u_G, u_R = Verschiebung des R bzw. G Gitters gegenüber dem B Gitter

Durch Verschieben der beiden Blenden gegeneinander um den blauen VDS-Abstand ergeben sich dann je Farbkanal optimale Bedingungen im Fourier Bild, wie Abbildung 4.20 zeigt. Am SPS MI Aufbau ist dies nicht erreichbar, da die Trägerfrequenz für alle Kanäle mittels Shearwinkel und von daher nicht wellenlängenspezifisch eingestellt wird.

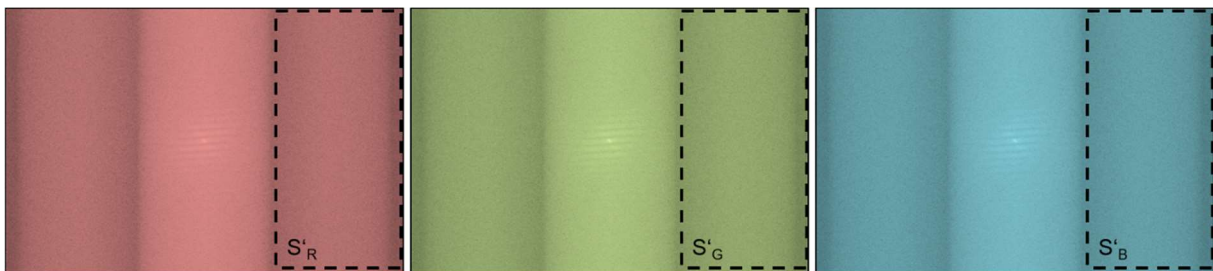


Abbildung 4.20: Optimale SPS Trägerfrequenzspektrale je RGB Farbkanal mit den maximal einstellbaren Abmaßen im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung, unter Verwendung der RGB Gitterblenden; die Bilder wurden zur besseren Visualisierung entsprechend des jeweiligen Farbkanals eingefärbt.

Vor- und Nachteile von VDS MZ 3D ESPI

Verglichen zu anderen FFT CF SPS ip ESPI Aufbauten nach dem aktuellen Stand der Forschung (vgl. Kapitel 3.3.b), ergeben sich durch den neuen Aufbau folgende Vor- und Nachteile mit jeweils sinkender Priorität:

- + **Praxisgerechte Ergebnisqualität:** Durch die Einstellung der optimalen SPS-Parameter ist die Ergebnisqualität erstmals hoch genug, um praxisgerecht ip Messungen im Videotakt der Kamera durchzuführen.
- + **Drei shearografische Messgrößen:** Der neue Aufbau liefert erstmals alle drei shearografischen Messgrößen in einer Shearrichtung in nur zwei Bildaufnahmen. Bei der TPS ESPI nach dem aktuellen Stand der Technik sind dazu 32 Bildaufnahmen notwendig.
- + **Hohe Messrobustheit:** Der neue Aufbau ist klein und ohne interne Strahlführung, wodurch die Störempfindlichkeit minimiert wird.
- + **Geringe Gerätekosten:** Da die laterale Auflösung bei der Kanaltrennung geviertelt wird, ist die Farbkamera mindestens doppelt so hochauflösend zu wählen, wie die bw Kamera bei der einfachen Anwendung des VDS MZ Aufbaus. Die Kosten verdoppeln sich entsprechend. Es müssen dreimal so viele Laserdioden (R, G, B) verwendet werden, welche jedoch verhältnismäßig günstig sind. Bei den Gitterblenden handelt es sich um Sonderanfertigungen. Die Materialkosten sind jedoch sehr gering. Verglichen zum Stand der Forschung sind die Gesamtkosten gering.
- 0 **Hinreichende Messlichtintensität:** Die Messlichtintensität wird durch die Absorptionsfilter der RGB Gitterblenden und die Bayer-Filtermaske der RGB Kamera herabgesetzt. Die mehreren Aperturen je Farbe kompensieren dies jedoch wieder, wodurch die praxisgerechte Ergebnisqualität gewährleistet werden kann.

- **Demodulation notwendig:** Die Ergebnisse der shearografischen Messgrößen liegen erst nach der Demodulation der drei Shearogramme und weiterer Verrechnung vor. Die Echtzeit-Analyse wird durch die höhere Rechenzeit begrenzt.
- **Störinterferenzen möglich:** Wie in der Originalveröffentlichung des Autors et al. dargestellt [105], können Störinterferenzen und damit Ergebnisfehler durch unzureichende Absorption an der RGB Gitterblende auftreten. Dies kann durch die Wahl geeigneter Laserquellen größtenteils kompensiert werden.
- **Erhöhter Einstellungsaufwand:** Die Einstellung der 3 out-of-plane Beleuchtungsmechanik ist mit höherem Aufwand verbunden. Dies kann durch eine konstruktive Lösung jedoch kompensiert werden, s. Kapitel 5.1.b.

Abschließend zur 3D ESPSI sei angemerkt, dass mit dem neuen Aufbau erstmals praxistaugliche ip Messungen mit transients Messobjektanregung realisierbar sind. Dies erlaubt nie dagewesene Auswertemöglichkeiten bei der Rissdetektion, die in der ZfP seither als problematischer Sonderfall gilt. Das Potential der Shearografie in dem Bereich (vgl. Kapitel 2.4.b) soll durch einige Messversuche mit dem neuen Aufbau weiter ausgearbeitet werden, s. Kapitel 7.3.c. Darüber hinaus wird ein systematischer Vergleich der Verwendung von ip Shearografie gegenüber der klassischen oop Shearografie vom Autor empfohlen.

3D ESPI

Durch den zusätzlichen Einsatz des Diffusorglases (s. Kapitel 4.1.e) in den beschriebenen RGB VDS MZ Aufbau (s. Kapitel 4.3.a), kann 3D ESPI betrieben werden. Auf diese Weise können alle drei holografischen Messgrößen im Videotakt der Kamera erfasst werden (s. auch Kapitel 2.4.a). Die Messgrößen entsprechend der 3 out-of-plane Beleuchtungsmechanik ergeben sich, analog zur ESPSI (s. Gleichung 4.16, 4.17 und 4.18 oben), nach Gleichung 4.25, 4.26 und 4.27.

$$\frac{\Delta_R \lambda_R + \Delta'_B \lambda_B + \Delta'_G \lambda_G}{2\pi \cdot 3 (1 + \cos(\Theta_{xz}))} = W \quad (4.25.)$$

$$\frac{2\Delta_R \lambda_R - \Delta'_B \lambda_B - \Delta'_G \lambda_G}{2\pi \cdot 3 \sin(\Theta_{xz})} = U \quad (4.26.)$$

$$\frac{\Delta'_B \lambda_B - \Delta'_G \lambda_G}{2\pi \cdot \sqrt{3} \sin(\Theta_{xz})} = V \quad (4.27.)$$

Abbildung 4.21 zeigt den holografischen Fehlstellenindikator für eine einfache Prüfplatte (vgl. Kapitel 2.4.a) bei der oop Messung⁸⁸ durch die 3 Farbkanäle. Es wird deutlich, dass kürzere Wellenlängen eine höhere Phasenstreifenordnung hervorrufen.

Verglichen zu anderen SPS 3D ESPI Aufbauten nach dem aktuellen Stand der Forschung (vgl. Kapitel 3.3.d), ergeben sich vergleichbare Vorteile wie oben bereits für die 3D ESPSI, sowie für die einfache VDS MZ ESPI (s. Kapitel 4.1.e) genannt. Dennoch seien hier nochmals die wichtigsten Aspekte kurz aufgeführt:

⁸⁸ Hier zur Veranschaulichung mit einfacher, orthogonaler Objektbeleuchtung ohne 3 out-of-plane Mechanik.

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

- + Hohe Messrobustheit
- + Klein, flexibel und leicht justierbar
- + Gesteigerte laterale Auflösung
- + Geringe Gerätekosten
- Reduzierte Ergebnisqualität

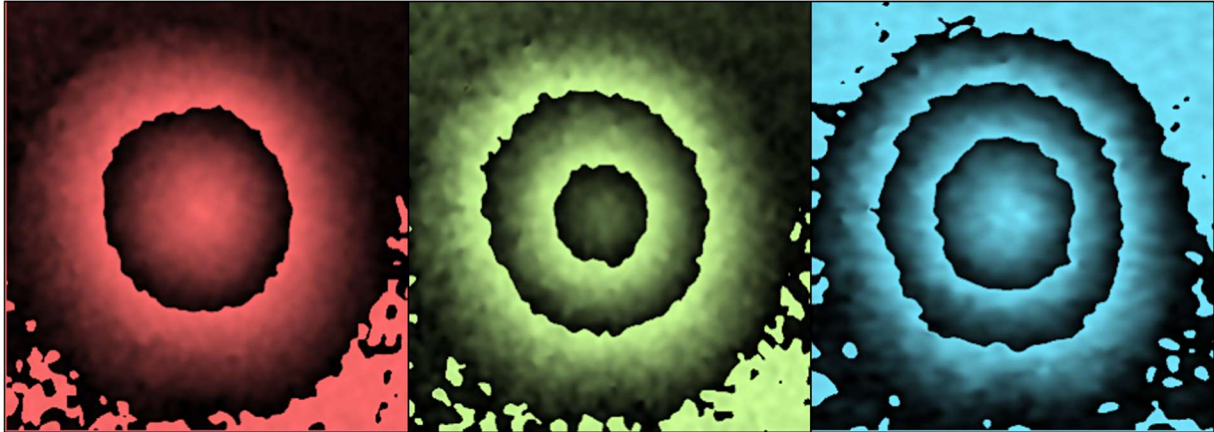


Abbildung 4.21: Holografischer Fehlstellenindikator für eine einfache Prüfplatte bei der oop Messung mit orthogonaler RGB Messobjektbeleuchtung; die Hologramme der parabelförmigen Verformung werden separat durch die drei Kanäle der Farbkamera ermittelt. Kürzere Wellenlängen rufen eine höhere Phasenstreifenordnung hervor. Die Bilder wurden zur besseren Visualisierung entsprechend des jeweiligen Farbkanals eingefärbt.

4.3.b. Dual-shear ESPSI

Im Folgenden wird die Erweiterung des VDS MZ Aufbaus mit Gitterblenden vorgestellt, mit der dual-shear ESPSI möglich ist. Mit dem Aufbau können die beiden shearografischen Messgrößen der Neigung in beide Shearrichtungen gleichzeitig erfasst werden (s. auch Kapitel 2.4.b), während der Shearbetrag je Shearrichtung variabel einstellbar ist. Zur Durchführung ergeben sich folgende Unterschiede, verglichen zur Beschreibung in Kapitel 4.1 und 4.2: Verwendung einer Polarisationskamera, Verwendung von zwei zusätzlichen, polarisierenden Halbspiegeln, Verwendung von nicht-polarisationsabhängigen Strahlteilerwürfeln und keine Verwendung des Depolarisators.

Dual-shear VDS MZ Aufbau

Abbildung 4.22 links zeigt den Interferometer Aufbau für FFT CF SPS dual-shear ESPSI am VDS MZ. Das vom Messobjekt reflektierte, unpolarisierte Laserlicht wird beim Eintritt in den Sensor am ersten, kamerafernen Strahlteiler in zwei Wellenfronten in die beiden Interferometerarme aufgeteilt. In einem der Arme trifft die Wellenfront anschließend auf einen polarisierenden Halbspiegel. Dort wird der senkrecht-polarisierte Lichtanteil vollständig reflektiert, während durch den leicht verkippten Halbspiegel ein Shearwinkel in x-Richtung eingeleitet wird. Der übrige, parallel-polarisierte Anteil passiert den Halbspiegel, wird am dahinter liegenden Spiegel reflektiert und passiert den Halbspiegel nochmals. Abbildung 4.22 rechts verdeutlicht dies schematisch. Die beiden orthogonal zueinander polarisierten Lichtanteile passieren nun die Spaltblende und werden im zweiten, kameranahen Strahlteilerwürfel in Richtung der Polarisationskamera abgelenkt. In dem zweiten Interferometerarm läuft eine analoge Aufteilung der Wellenfront in zwei orthogonal zueinander polarisierte Lichtanteile ab. Hierbei wird durch den leicht verkippten Spiegel ein Shearwinkel in y-Richtung in den parallel-polarisierten

Lichtanteil eingeleitet. Die beiden Lichtanteile passieren die Spaltblende und werden auf die gemeinsame optische Achse mit den beiden Anteilen des ersten Interferometerarms in Richtung der Polarisationskamera gebracht. Auf dem Bildsensor der Kamera ergeben sich zwei überlagerte Specklemuster, eines aus den beiden senkrecht-polarisierten Lichtanteilen mit Shear in x-Richtung, eines aus den beiden parallel-polarisierten Lichtanteilen mit Shear in y-Richtung. Beide Muster weisen durch den sich einstellenden VDS dieselbe Trägerfrequenz auf.

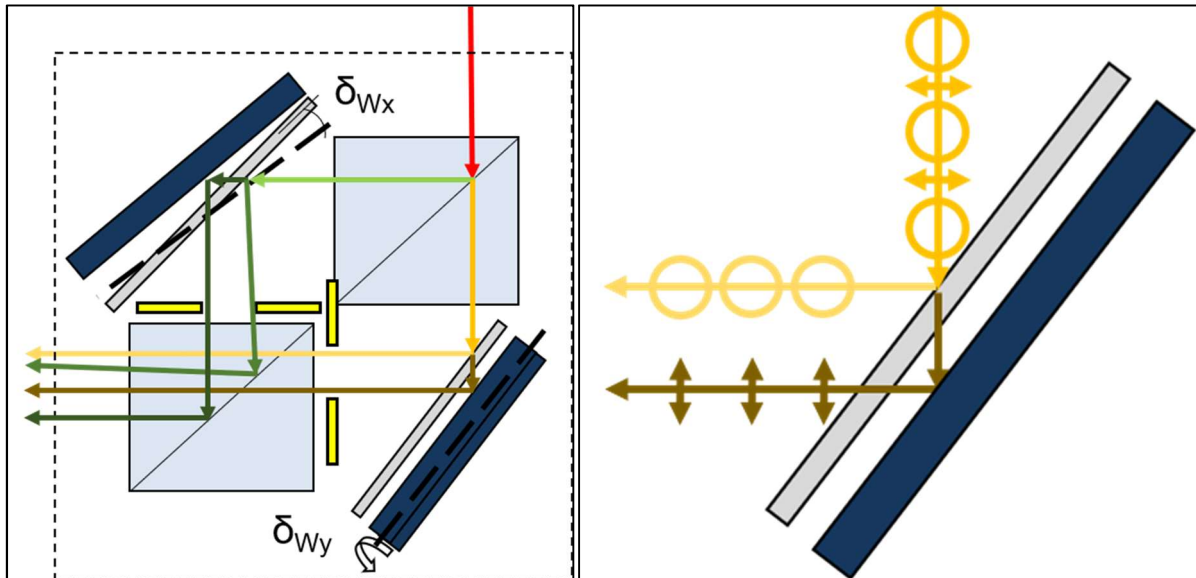


Abbildung 4.22: (Links) erweitertes Interferometer des VDS MZ Aufbaus für dual-shear ESPSI mit zwei zusätzlichen, polarisierenden Halbspiegeln je Interferometerarm, vgl. zu Abbildung 4.2; die unpolarisierte Eingangswellenfront je Interferometerarm wird mittels Halbspiegel nochmals aufgeteilt in einen senkrecht-polarisierten und einen parallel-polarisierten Lichtanteil, s. rechts. Alle vier Lichtanteile werden auf den Bildsensor einer Polarisationskamera geleitet. Auf diese Weise liegen dort zwei unabhängige Specklemuster vor, welche durch den VDS dieselbe Trägerfrequenz aufweisen. Mittels Halbspiegel- bzw. Spiegelverkipfung weist das senkrecht-polarisierte Specklemuster einen Shear in x-Richtung, das parallel-polarisierte Specklemuster einen Shear in y-Richtung auf.

Es sei angemerkt, dass bei diesem MZ dual-shear Aufbau keine polarisationsabhängigen Strahlteilerwürfel verwendet werden können, um die Messlichtintensität zu verdoppeln (vgl. Kapitel 4.1.a). 50 % des Messlichts werden am zweiten, kameranahen Strahlteilerwürfel nicht in Richtung der Kamera geleitet (in Abbildung 4.22: nach unten) und müssen möglichst absorbiert werden, um keine Störinterferenzen zu verursachen. Darüber hinaus kann der dual-shear Aufbau ebenfalls mit nur einem polarisierenden Halbspiegel realisiert werden. Dabei müssen beide Shearwinkel im Interferometerarm des Halbspiegels eingestellt werden. Die erforderliche Kohärenzlänge muss in dem Fall jedoch größer sein entsprechend der optischen Pfaddifferenz von Halbspiegel und Spiegel.

Optimale SPS-Parameter

Um die beiden orthogonal zueinander polarisierten Specklemuster gleicher Trägerfrequenz separat auswerten zu können, kommt beim FFT CF SPS dual-shear ESPSI am VDS MZ eine Polarisationskamera zum Einsatz (vgl. Kapitel 2.3). Nach einer Kanaltrennung, analog zur 3D ESPSI mit Farbkamera (Kapitel 4.3.a), werden zwei der vier Kanäle weiterverarbeitet. Analog zur Bezeichnung RGB FFT CF SPS bzgl. der Wellenlängenunterscheidung wird an dieser Stelle der Begriff pol FFT CF SPS eingeführt bzgl. der

Polarisationsunterscheidung. Die optimalen SPS-Parameter im Fourier Raum ergeben sich nach Gleichung 4.28, 4.29 und 4.30 für den Anwendungsfall mit Polarisationskamera. Die Apertur-Spaltbreite wird halb so groß gewählt, verglichen zum Anwendungsfall mit bw Kamera (Gleichung 4.9 oben). Der VDS-Abstand und die Gitterkonstante werden analog zur bw Kamera gewählt (Gleichung 4.11 und 4.13).

$$b_{\text{pol}} = \frac{\lambda f}{6b_{\text{P}_{X,K}}} = \frac{\lambda f}{12b_{\text{P}_X}} = \frac{b}{2} \quad (4.28.)$$

$$\text{mit } b_{\text{P}_{X,K}} = 2b_{\text{P}_X}$$

$$a_{\text{pol}} = 2b_{\text{pol}} \quad (4.29.)$$

$$g_{\text{pol}} = 6b_{\text{pol}} \quad (4.30.)$$

Mit

b_{pol} = Optimale Spaltbreite beim pol FFT CF SPS

a_{pol} = Optimaler VDS-Abstand beim pol FFT CF SPS

g_{pol} = Gitterkonstante beim pol FFT CF SPS

Als Blenden kommen einfache Gitterblenden mit angepasster Aperturbreite zum Einsatz, wie bereits in Abbildung 4.12 S. 109 gezeigt. Je Polarisationskanal ergeben sich optimale Bedingungen im Fourier Bild, wie Abbildung 4.23 zeigt. Mit dem Gitter kann 1/6 der Messlichtintensität genutzt werden, verglichen zu einer entsprechenden TPS Anwendung ohne Blenden. Diese Intensität teilt sich für die beiden unabhängigen Specklemuster auf. Am SPS MI Aufbau ist dies nicht erreichbar, da die Trägerfrequenz von der Shearrichtung abhängig ist. Der Lichtanteil mit Shear in x-Richtung erfordert vertikale Spalte, der in y-Richtung horizontale Spalte. Als notwendige Folge käme nur eine Rechteck-Gitterblende in Frage (vgl. Kapitel 3.3.c), welche jedoch verglichen zum TPS nur 1/36 der Messlichtintensität liefern würde. An dieser Stelle sei noch eine junge Veröffentlichung von Zhong et al. von Anfang 2020 erwähnt [108]. Diese nutzt einen modifizierten VDS MZ, während dual-shear mittels bw Kamera durchgeführt wird. Problematisch dabei ist jedoch der lange optische Pfad, die Anzahl an optischen Bauteilen sowie der Messlichtverlust durch die 4 Strahlteilerwürfel.

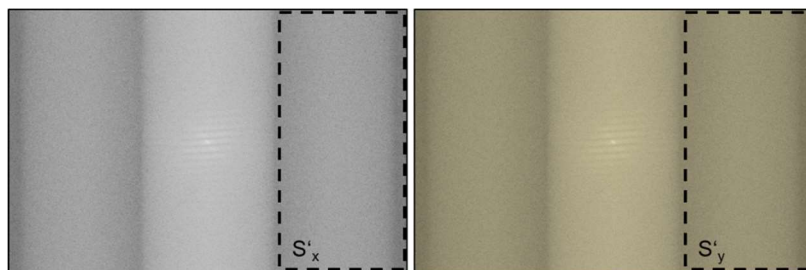


Abbildung 4.23: Optimale SPS Trägerfrequenzspektren je Polarisationskanal mit den maximal einstellbaren Abmaßen im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung, unter Verwendung von einfachen Gitterblenden; die Bilder wurden zur besseren Visualisierung eingefärbt.

Messversuch

Die Notwendigkeit der dual-shear ESPSI wird an folgendem Beispiel veranschaulicht. Wie bereits Schuth ([36] S. 127) gezeigt hat, ist die Detektion von gerichteten Fehlstellen problematisch, wenn diese in Shearrichtung verlaufen. Bei der shearografischen ZfP müssen von daher typischerweise zumindest zwei analoge Messungen durchgeführt werden, wobei die Shearrichtung um 90° rotiert wird. Abbildung 4.24, erste Zeile, zeigt die Shearogramme einer mittels Halogenstrahler angeregten Kunststoff-Prüfplatte⁸⁹ mit einer rückseitig eingebrachten Plansenkung und Nuten mit derselben Restwandstärke. Die Plansenkung oben links dient der Orientierung, da der typische shearografische Fehlstellenindikator sichtbar wird. Darüber hinaus repräsentieren die vier Nuten gerichtete Fehlstellen gleicher Abmaße mit einem Winkelabstand von jeweils 45° zueinander. Die erste Spalte von Abbildung 4.24 beinhaltet Ergebnisse mit einem Shear in x-Richtung⁹⁰, die zweite Spalte mit einem Shear in y-Richtung. Bei einem Shear in x-Richtung weist das Schmetterlingsmuster eine vertikale, beim Shear in y-Richtung eine horizontale Spiegelebene auf. Die Nuten mit 45° und 135° Orientierung zeigen sich in beiden Shearogrammen durch einen einfachen Phasensprung. Bei einem Shear in x-Richtung weist die Nut mit 90° Orientierung, somit orthogonal zur Shearrichtung, annähernd einen zweiten Phasensprung auf. Bei einem Shear in y-Richtung gilt gleiches für die Nut mit 0° Orientierung. Stattdessen ist der Indikator für die 0° Nut bei einem Shear in x-Richtung, sowie der Indikator für die 90° Nut bei einem Shear in y-Richtung, also jeweils in Shearrichtung, nicht eindeutig. Es gibt jeweils einen Phasensprung, jedoch lokal begrenzt auf den Bereich der Nutenden. Dieses Phänomen ist durch die Messmechanik bei der Shearografie begründet. Die Shearografie misst die Verzerrung aufgrund von Steifigkeitssprüngen in Shearrichtung. An den beiden problematischen Stellen werden zwei Bereiche derselben Nut überlagert. Somit existiert hier in Shearrichtung kein Steifigkeitssprung, sondern dieselbe, verminderte Steifigkeit. Diese resultiert bei Anregung in eine örtlich gleichhohe Verformung. Es existiert somit keine Verformungsdifferenz für die beiden vershearten Bereiche, aufgrund dessen die Shearografie keinen Messausschlag zeigt.

Abbildung 4.24, zweite Zeile, zeigt die demodulierten oop Verformungsergebnisse der beiden Shearogramme mit Shear in x- bzw. y-Richtung als Grauwertbild. Das SNR je Indikator ist in Gelb angegeben (vgl. Kapitel 2.5.f). Die problematischen Stellen sind rot umkreist, das SNR wird dort aufgrund der uneindeutigen lokalen Zuordnung nicht definiert. Die große Plansenkung weist für beide Shearrichtungen ein sehr hohes SNR von 15 auf. Die jeweilige Nut orthogonal zur Shearrichtung weist aufgrund ihrer asymmetrischen Abmaße ein reduziertes SNR von 8 auf. Durch den 45° Winkel zur Shearrichtung weisen die anderen beiden Nuten ein SNR von nur 5 in beiden Shearogrammen auf. Abbildung 4.24, dritte Zeile, zeigt die demodulierten Verformungsergebnisse als farbcodiertes Bild. Der Maßstab für die beiden Verformungsergebnisse ist in der Einheit [Mikrostrain].

Gerade bei transientscher Anregung ist es für den Fehlstellenkontrast bzw. das SNR von großer Bedeutung, Messungen in Echtzeit durchzuführen zu können (s. Kapitel 6). Die Messung nach Abbildung 4.24 wurde bereits mit dem neuen VDS MZ dual-shear Aufbau erfasst. Wären die Messungen in beide Shearrichtungen sequenziell erfolgt, hätten die beiden Ergebnisse bzgl. dem Messobjektverformungszustand mit synchronisierter Anregung und Bilderfassung erfolgen müssen. Andernfalls wäre nicht sichergestellt, dass die Ergebnisse quantitativ vergleichbar sind, da ggf. eine höhere oder tiefere Verformung in einer Messung erfasst worden wäre. Darüber hinaus müssten die Randbedingungen für die zweite Messung gleich denen bei der ersten Messung sein. Das bedeutet konkret, dass das Messobjekt ausreichend lange abkühlen muss und die Umgebungstemperatur sich nicht ändern darf. Dies alles ist für die hochgenaue shearografische Messtechnik ohne dual-shear Aufbau nur mit großem Zeit- und Kostenaufwand realisierbar.

⁸⁹ Bild des Messobjektes s. Kapitel 2.5.d auf S. 45.

⁹⁰ Hier negativ, für die Erörterung der Problematik jedoch irrelevant.

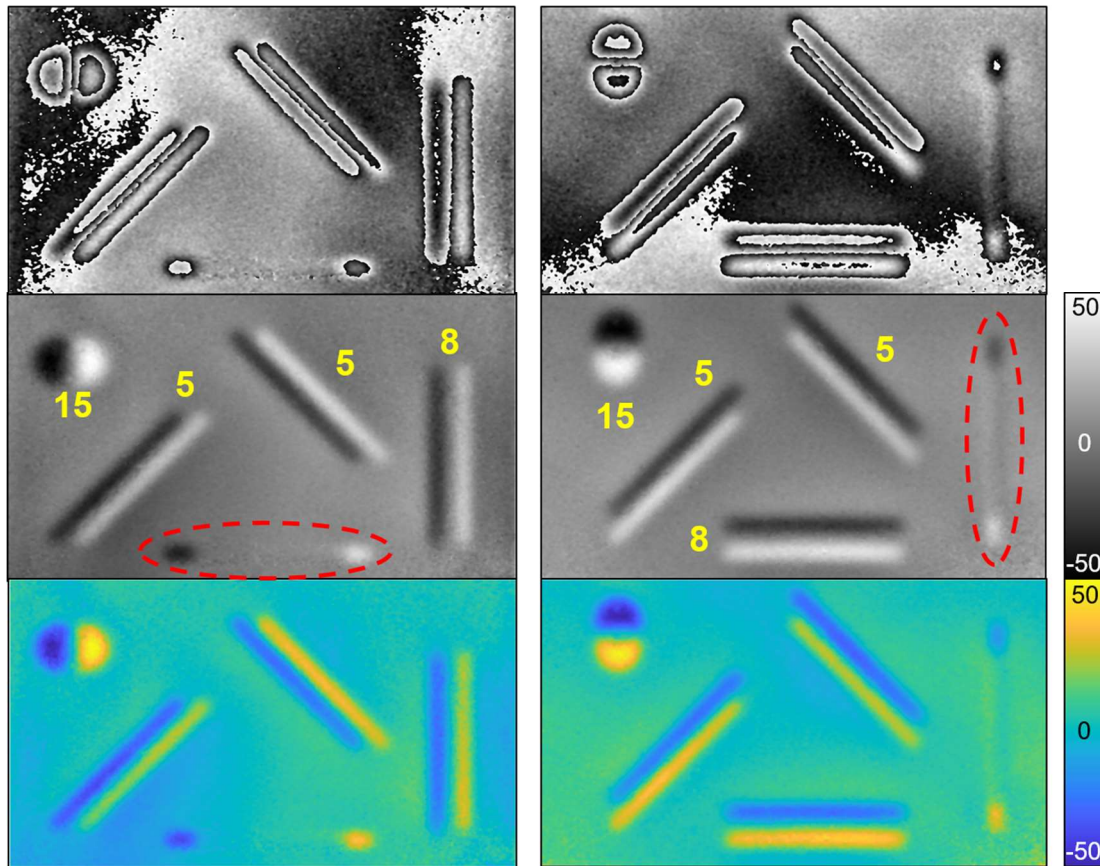


Abbildung 4.24: (Erste Zeile) Shearogramme einer Kunststoff-Prüfplatte (s. Abbildung 2.31 auf S. 5449) mit künstlichen Fehlstellen unter optisch-thermischer Anregung bei einem Shear in x-Richtung (erste Spalte) und y-Richtung (zweite Spalte); rückseitig wurde eine Plansenkung oben links und vier Nuten gleicher Abmaße mit einem Winkelabstand von jeweils 45° eingebracht, jeweils mit derselben Restwandstärke. (Zweite Zeile) demoduliertes oop Verformungsergebnis als Grauwertbild mit SNR-Wert in Gelb für die Fehlstellenindikatoren und roten Ellipsen für problematische Bereiche; es fällt auf, dass gerichtete Fehlstellen in Shearrichtung unzureichend angezeigt werden. (Dritte Zeile) demoduliertes oop Verformungsergebnis als farbcodiertes Bild; Maßstab jeweils in [Mikrostrain].

Ergebnisüberlagerung

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden dual-shear Messergebnisse z. T. in kombinierter Weise für beide Shearrichtungen in einem Bild dargestellt, ab sofort *dual-shear Bild* genannt. Von einer sog. Datenfusion⁹¹ sei dabei noch nicht gesprochen. Stattdessen erfolgt eine Ergebnisüberlagerung, welche den Informationsgehalt bzgl. der Fehlstellenindikatoren aus beiden Shearogrammen kombiniert. Wie bereits durch Schuth ([36] S. 128) gezeigt, ist eine unmittelbare Verrechnung zweier Shearogramme mit unterschiedlichem Shear nicht zielführend. Stattdessen werden die demodulierten Verformungsergebnisse verarbeitet. Abbildung 4.25 zeigt die Addition der beiden Ergebnisse aus Abbildung 4.24 als farbcodiertes Bild.

Die Farbskala wurde dabei nicht an die verdoppelten Extremwerte angepasst⁹², sodass die überlagerten, etwas schwächeren Verformungen der Nuten besser zur Geltung kommen. Auf diese Weise sind die Indikatoren für alle Fehlstellen in nur einem Bild gut sichtbar. Die Indikatoren weichen jedoch z. T. von der typischen Gestalt bei der Shearografie ab, vgl. Kapitel 2.5.d. Da von einem gemeinsamen, unversheararten Bild für die beiden Shearogramme ausgegangen wurde, überlagern sich im dual-shear Bild

⁹¹ Engl.: data fusion.

⁹² Der positive Anteil der Plansenkung überschreitet dabei auf einer kleinen Kreisfläche das Maximum der Farb-anzeige, wodurch der Bereich gleichfarbig hellgelb angezeigt wird.

alle positiven Verformungsanteile am jeweils selben Ort. Die negativen Anteile liegen teilweise separat, teilweise angrenzend oder sind zum Großteil örtlich überlagert. Ein SNR für diese Art der shearografischen Ergebnisdarstellung ist nicht definiert, vgl. Kapitel 2.5.f. An dieser Stelle sei lediglich eine einfache Empfehlung ausgesprochen, die sich an den Gegebenheiten bei der automatischen Evaluation orientiert (s. Kapitel 8.1.b). Da bei der Addition der beiden Ergebnisse ebenfalls Rauschen aufsummiert wird, wird sich auf diese Weise kein höheres SNR für das dual-shear Bild ergeben. Hingegen werden bei der automatischen Evaluation beide Ergebnisse zunächst separat berechnet. Eine Berechnung der SNR-Werte für jedes Ergebnis ist dabei kein besonderer Aufwand. Wird ein Indikator im ersten Ergebnis durch einen Indikator im zweiten Ergebnis bestätigt, kann eine Fehlstelle mit doppelter Sicherheit angenommen werden. Aus diesem Grund sollten die SNR-Werte der beiden Bilder im dual-shear Bild ebenfalls aufsummiert werden. Dies wird durch die schwarzen Zahlen im Bild ausgedrückt. Für alle vier Nuten ergibt sich so ein nahezu einheitlicher SNR-Wert, was bzgl. deren selben geometrischen Abmaßen logisch erscheint.

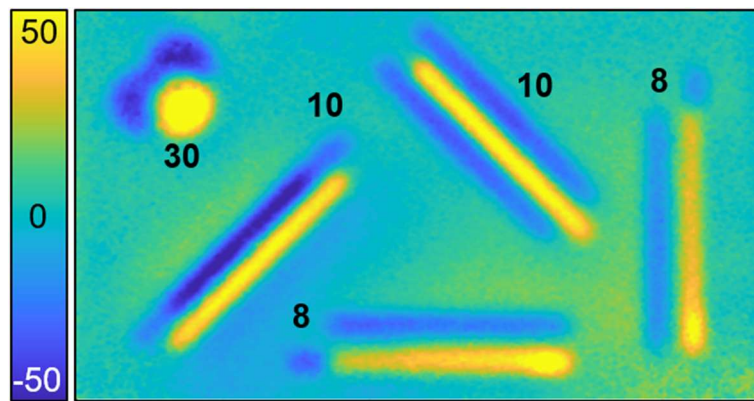


Abbildung 4.25: Farbcodiertes dual-shear Ergebnisbild als Addition der Verformungen in den beiden Shearrichtungen nach Abbildung 4.24; alle Fehlstellenindikatoren für die gerichteten Fehlstellen sind in einem einzigen Bild sichtbar, wenn deren Gestalt z. T. auch untypisch erscheint. Die Extremwerte des Maßstabs in [Mikrostrain] wurden nicht verdoppelt, wodurch die Indikatoren der Nuten besser visualisiert werden. Die schwarzen Zahlen entsprechen vereinfachten SNR-Werten für die Indikatoren, die aus der jeweiligen Summe der SNR-Werte aus den beiden separaten Verformungsbildern gebildet wurden. Die Werte für die 4 Nuten sind annähernd gleich hoch.

Eine zweite Möglichkeit der Visualisierung als Grauwertbild zeigt Abbildung 4.26. Die Grauwertskala wird abermals nicht an die verdoppelten Extremwerte angepasst. Das Bild zeigt die Addition der beiden Ergebnisse aus Abbildung 4.24 sowie dem Betrag der Addition, wie Gleichung 4.31 beschreibt.

$$\Delta' = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} + \left| \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \right| \quad (4.31.)$$

Auf diese Weise werden annähernd nur die sich örtlich überlagernden positiven Anteile desselben, unvershearten Bildes beider Verformungsanteile dargestellt. Die negativen Anteile ergeben sich zu null und werden schwarz angezeigt, die positiven Anteile entsprechend ihrer Gesamthöhe hellgrau bis weiß. Im theoretischen Fall, dass sich Bereiche ohne Fehlstellen nicht verformen, werden diese Bereiche ebenfalls gänzlich schwarz angezeigt. So ergibt sich ein dual-shear Bild, welches ausschließlich alle fehlstellenbehafteten Bereiche darstellt, hier inklusive der Abmaße aller Fehlstellen⁹³. Der globale

⁹³ Bei der lateralen Bemaßung von Fehlstellen im Shearogramm muss der Shearvektor berücksichtigt werden.

Grauwert ist somit nicht mehr grau (vgl. Abbildung 4.24 zweite Zeile), sondern schwarz, analog zu einem holografischen Verformungsergebnis (vgl. Kapitel 2.5.d Abbildung 2.28). Das intuitive Verständnis der shearografischen Fehlstellenanzeige ist damit vereinfacht (vgl. auch Kapitel 2.5.d Abbildung 2.31).

Weitere Analysen zu einer anwendungstauglichen dual-shear Bilddarstellung wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht geführt. Stattdessen werden die beiden oben vorgestellten Methoden zur kombinierten Ergebnisdarstellung in Kapitel 7 verwendet.

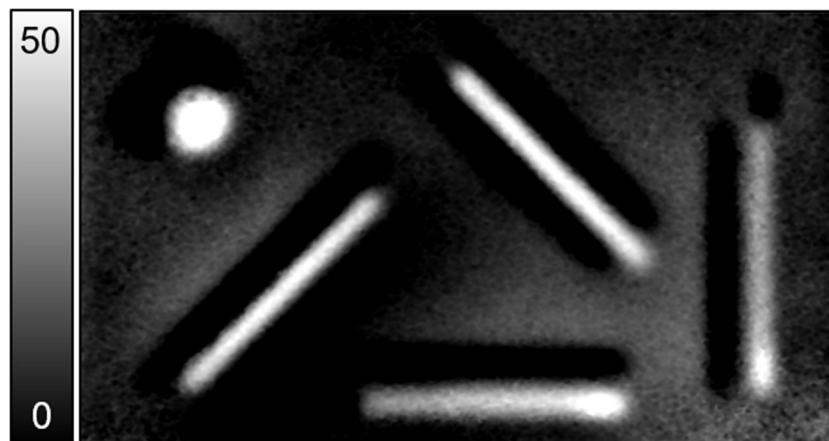


Abbildung 4.26: Dual-shear Grauwert-Ergebnisbild der Verformungen nach Gleichung 4.31 in den beiden Shearrichtungen nach Abbildung 4.24; alle Fehlstellenindikatoren für die gerichteten Fehlstellen sind in einem einzigen Bild sichtbar. Die Fehlstellen werden nahezu ausschließlich inkl. deren geometrischer Abmaße angezeigt. Alle anderen Bereiche sind dunkel, teilweise schwarz. Die shearografische Ergebnisinterpretation ist auf diese Weise vereinfacht. Die Extremwerte des Maßstabs in [Mikrostrain] wurden nicht verdoppelt, wodurch die Indikatoren der Nuten besser visualisiert werden.

Vor- und Nachteile von VDS MZ dual-shear ESPSI

Verglichen zu anderen FFT CF SPS dual-shear ESPSI Aufbauten nach dem aktuellen Stand der Forschung (vgl. Kapitel 3.3.c) ergeben sich durch den neuen Aufbau folgende Vor- und Nachteile mit jeweils sinkender Priorität:

- + **Praxisgerechte Ergebnisqualität:** Durch die Einstellung der optimalen SPS-Parameter ist die Ergebnisqualität erstmals hoch genug, um praxisgerechte dual-shear Messungen im Videotakt der Kamera durchzuführen.
- + **Variabler Shear:** Der variabel einstellbare Shear ist ein Vorteil, der aus dem VDS MZ Aufbau resultiert (s. Kapitel 4.1 oben). Dennoch sei er hier nochmals erwähnt, da er erstmals in der SPS dual-shear Anwendung nutzbar wird.
- + **Hohe Messlichtintensität:** Durch den Einsatz der einfachen Gitterblende ist die Messlichtintensität sehr hoch verglichen zum Stand der Forschung. Dies lässt eine gesteigerte Tiefenauflösung und eine schnellere, robustere Messung aufgrund kürzerer Belichtungszeiten zu (s. Kapitel 2.6.a).
- + **Hohe Messrobustheit:** Der neue Aufbau ist klein, wodurch die Störempfindlichkeit minimiert wird.
- 0 **Eine Laserquelle:** Wie auch bei anderen wird bei dem neuen Aufbau nur eine Laserquelle eingesetzt, was den Geräte- und Messaufwand reduziert.
- **Höhere Gerätekosten:** Polarisationskameras sind noch nicht lange am Markt verfügbar, weshalb sich ihre Kosten auf das ca. vierfache von entsprechenden bw Kameras belaufen. Da die

laterale Auflösung bei der Kanaltrennung geviertelt wird, ist die Polarisationskamera mindestens doppelt so hochauflösend zu wählen, wie die bw Kamera bei der einfachen Anwendung des VDS MZ Aufbaus. Zudem kostet einer der zusätzlichen Halbspiegel ca. doppelt so viel wie ein Strahlteilerwürfel.

- **Erhöhter Einstellungsaufwand:** Die Einstellung der beiden zusätzlichen polarisierenden Halbspiegel ist mit höherem konstruktivem Aufwand verbunden. Zudem sind die Halbspiegel oberflächenbeschichtet, was eine vorsichtige Handhabung voraussetzt.

Abschließend zur dual-shear ESPSI sei angemerkt, dass mit dem neuen Aufbau erstmals praxistaugliche Messungen mit transienter Messobjektanregung realisierbar sind. Dies erlaubt nie dagewesene Auswerte- und Evaluationsmöglichkeiten. Als besondere Art der gerichteten Fehlstelle sei abermals der Riss genannt, welcher in der ZfP seither als problematisch gilt. Das Potential der Shearografie in dem Bereich (vgl. Kapitel 2.4.b) soll durch die Messversuche in Kapitel 7.3.d ausgearbeitet werden. Weitere Forschungsarbeiten zur dual-shear ESPSI und entsprechender Datenfusion, sowie ein systematischer Vergleich zur praktischen Anwendung der 3D ESPSI (s. Kapitel 4.3.a oben), werden vom Autor empfohlen.

4.3.c. One-shot ESPSI

Die schwierigste Disziplin bei der ESPSI ist es, alle sechs Messgrößen desselben Objektverformungszustandes zu erfassen (vgl. Kapitel 2.4.b). In der Vergangenheit wurden dazu aufwändige Geräte und Verfahren entwickelt, welche die 64 Bildaufnahmen beim TPS möglichst schnell erfassen, wie beispielsweise in [109] gezeigt. Aufgrund der hohen Messzeit muss der Verformungszustand konstant gehalten und Umgebungsstöreinflüsse eliminiert werden, um Messfehler zu vermeiden. Im Folgenden wird die Erweiterung des VDS MZ Aufbaus mit Gitterblenden vorgestellt, mit der die Erfassung aller sechs shearografischen Messgrößen bei variablem Shear im Videotakt der Kamera möglich ist. Dies wird im Rahmen der Arbeit als *one-shot*⁹⁴ ESPSI bezeichnet. Mit der one-shot ESPSI sind nur zwei Bildaufnahmen zur Auswertung erforderlich, wodurch erstmals eine dynamische Anregung verwendet werden kann. Veröffentlichungen zu dieser Thematik wurden für SPS nicht gefunden. Es sei angemerkt, dass es sich im Folgenden um einen Forschungsansatz handelt, der nicht praxisgerecht einsatztauglich ist und weiterentwickelt werden muss.

Zur Durchführung wird der RGB FFT CF SPS (Kapitel 4.3.a) und der pol FFT CF SPS (Kapitel 4.3.b) Aufbau kombiniert. Das Verfahren wird als RGB pol FFT CF SPS bezeichnet. Dabei existieren folgende Unterschiede verglichen zur VDS MZ Beschreibung in Kapitel 4.1 und 4.2: Verwendung von drei Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge, Verwendung einer Farbkamera, Verwendung einer RGB Gitterblende und einer RGB pol Gitterblende (s. unten), Verwendung von zwei zusätzlichen, polarisierenden Halbspiegeln, Verwendung von nicht-polarisationsabhängigen Strahlteilerwürfeln und keine Verwendung des Depolarisators. Abbildung 4.27 zeigt den Gesamtaufbau schematisch.

⁹⁴ In der Literatur gibt es keine eindeutige Bezeichnung.

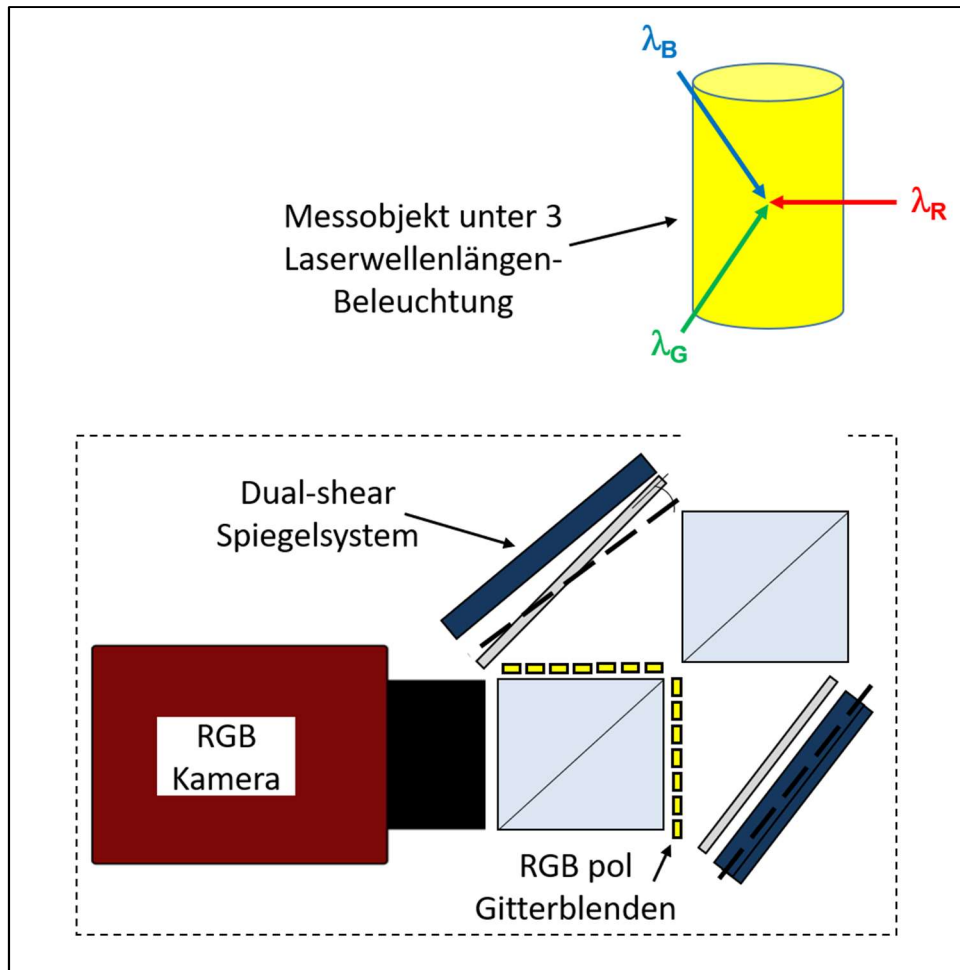


Abbildung 4.27: Schematischer one-shot ESPI Aufbau als Kombination der 3D ESPI (Kapitel 4.3.a) und der dual-shear ESPI (Kapitel 4.3.b). Dabei kommen die beiden speziellen RGB pol Gitterblenden zum Einsatz, s. Abbildung 4.29.

Optimale SPS-Parameter

Mit der 3 out-of-plane RGB Beleuchtungsmechanik können die drei shearografischen Messgrößen in einer Shearrichtung ermittelt werden. Diese werden mittels RGB Kamera Kanaltrennung durch drei überlagerte Specklemuster unterschiedlicher Wellenlänge und gleicher Trägerfrequenz erfasst. Durch den dual-shear Aufbau können beide Shearrichtungen für eine einzige Wellenlänge abgebildet werden, da zwei orthogonal zueinander polarisierte, nicht interferenzfähige Specklemuster vorliegen. Da beim hier vorgestellten one-shot ESPI Aufbau eine Farbkamera verwendet wird, kann die Unterscheidung der polarisierten Specklemuster nicht mittels Kanaltrennung wie bei der Polarisationskamera erfolgen. Stattdessen wird als Unterscheidungskriterium eine unterschiedliche Trägerfrequenz angestrebt. Je Farbkanal sollen auf diese Weise zwei separate Trägerspektren vorliegen. In Summe liegen demnach sechs überlagerte Specklemuster mit drei unterschiedlichen Wellenlängen und jeweils zwei Polarisationsrichtungen unterschiedlicher Trägerfrequenz vor. Abbildung 4.28 zeigt den entsprechenden Zustand im Fourier Bild. Auf Basis dessen können die optimalen SPS-Parameter nach den Gleichungen 4.32 bis 4.35 beschrieben werden.

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

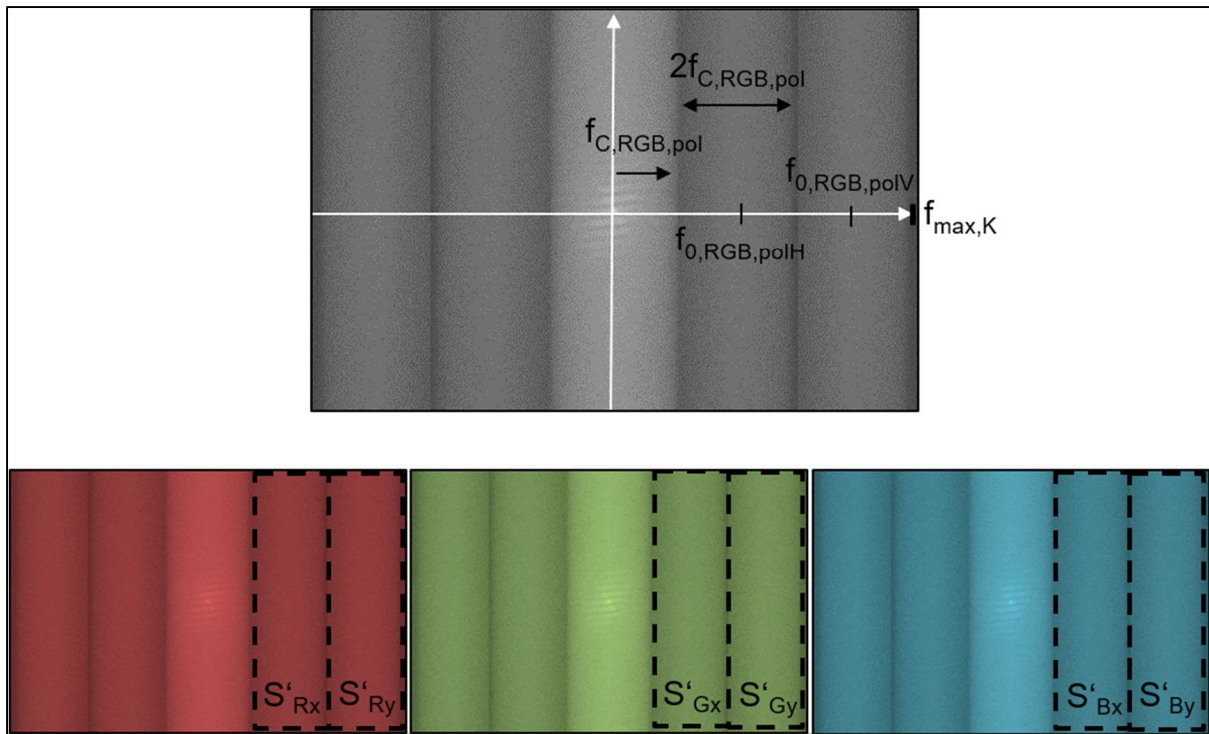


Abbildung 4.28: (Oben) optimale SPS Abmaße für zwei Spektren unterschiedlicher Trägerfrequenz im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung, hier für RGB pol FFT CF SPS; (unten) die zwei orthogonal zueinander polarisierten Trägerspektren je Farbkanal beinhalten die Interferenzphaseninformation für die beiden Shearrichtungen. Die Bilder wurden zur besseren Visualisierung entsprechend des jeweiligen Farbkanals eingefärbt. Durch die sechs Spektren können alle sechs shearografischen Messgrößen ermittelt werden.

$$f_{C,RGB,pol} = \frac{1}{5} f_{max,K} \quad (4.32.)$$

$$\text{mit } f_{max,K} = \frac{f_{max}}{2}$$

$$f_{0,RGB,polH} = \frac{2}{5} f_{max,K} \quad (4.33.)$$

$$f_{0,RGB,polV} = \frac{4}{5} f_{max,K} \quad (4.34.)$$

$$f_{g,RGB,pol} = 2 f_{max,K} \quad (4.35.)$$

Mit

$f_{C,RGB,pol}$ = Optimale Cut-off-Frequenz beim RGB pol FFT CF SPS

$f_{max,K}$ = Maximale Abtastfrequenz nach Kanalzerlegung (s. auch Kapitel 2.3)

$f_{0,RGB,polH}$ = Optimale RGB pol FFT CF SPS Trägerfrequenz, horizontal-polarisierter Lichtanteil

$f_{0,RGB,polV}$ = Optimale RGB pol FFT CF SPS Trägerfrequenz, vertikal-polarisierter Lichtanteil

$f_{g,RGB,pol}$ = Gitterfrequenz beim RGB pol FFT CF SPS

Durch jeweiliges Einsetzen der SPS-Parameter in die Gleichungen 4.8, 4.10 und 4.12 (Kapitel 4.3.a und Kapitel 4.3.b) und durch Umstellen ergeben sich die Gleichungen 4.36 bis 4.39. Sie beschreiben die geometrischen Parameter für die zu konstruierenden Gitterblenden, welche den optimalen Zustand

4. Weiterentwicklungen zur FFT CF SPS Speckle-Interferometrie

im Fourier Bild liefern. Es fällt auf, dass eine einzelne Spaltapertur weniger als ein Drittel der Breite einer Apertur bei der einfachen Anwendung mit bw Kamera hat. Praktisch führt dies zur leichten Bildverzerrung durch die starke Lichtbeugung unter typischen Messbedingungen.

$$b_{\text{RGB,pol}} = \frac{\lambda_{\text{RGBf}}}{10b_{\text{Px,K}}} = \frac{\lambda_{\text{RGBf}}}{20b_{\text{Px}}} < \frac{b}{3} \quad (4.36.)$$

$$\text{mit } b_{\text{Px,K}} = 2b_{\text{Px}}$$

$$a_{\text{RGB,polH}} = 2b_{\text{RGB,pol}} \quad (4.37.)$$

$$a_{\text{RGB,polV}} = 4b_{\text{RGB,pol}} \quad (4.38.)$$

$$g_{\text{RGB,pol}} = 10b_{\text{RGB,pol}} \quad (4.39.)$$

Mit

$b_{\text{RGB,pol}}$ = Optimale Spaltbreite beim RGB pol FFT CF SPS

$a_{\text{RGB,polH}}$ = Optimaler VDS-Abstand beim RGB FFT pol CF SPS, horizontal-polarisierter Lichtanteil

$a_{\text{RGB,polV}}$ = Optimaler VDS-Abstand beim RGB pol FFT CF SPS, vertikal-polarisierter Lichtanteil

$g_{\text{RGB,pol}}$ = Gitterkonstante beim RGB pol FFT CF SPS

Abbildung 4.29 zeigt die beiden entsprechenden Gitterblenden für RGB pol FFT CF SPS. Die erste Blende (oben mittig) besitzt vorderseitig Polarisationsfilterfolien und rückseitig (nicht dargestellt) Farbfilterfolien. Beim Durchleuchten mit polarisiertem Weißlicht werden je nach Polarisationsrichtung unterschiedliche RGB Aperturen sichtbar. Die zweite Blende (unten mittig) besitzt lediglich Farbfilterfolien. Bei Verwendung der beiden Blenden im MZ stellt sich so je Polarisation und je Wellenlänge ein VDS ein, wie in der linken und rechten Spalte angedeutet. Alle weiteren Informationen sind der Bildunterschrift zu entnehmen. Aufgrund der sechs notwendigen Gitter können durchschnittlich etwa nur zwei Aperturen je Polarisationsrichtung und je Wellenlänge eingebracht werden (s. auch Bildunterschrift Abbildung 4.19).

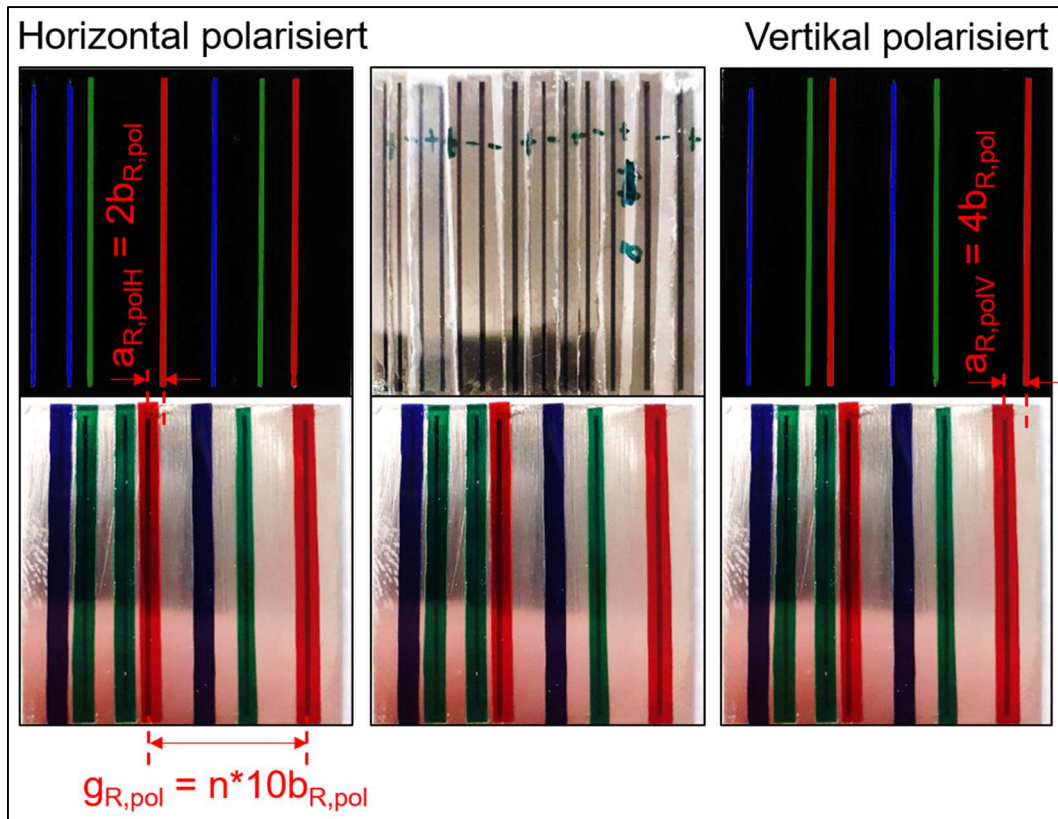


Abbildung 4.29: Die im Technikum OGKB entwickelten zwei RGB pol Gitterblenden für one-shot ESPSI am VDS MZ Aufbau; das Foto oben mittig zeigt die erste Blende mit vorderseitig aufgebrachten Polarisationsfilterfolien. Die Folienstreifen sind je für eine bestimmte Anzahl an Aperturen und je im Wechsel bzgl. der passierenden Polarisationsrichtung aufgebracht. Rückseitig (nicht dargestellt) ist die Blende mit Farbfilterfolien versehen. Der so erzielbare Effekt wird beim rückseitigen Durchleuchten der Blende mit polarisiertem Weißlicht deutlich. Je nach Polarisationsrichtung werden unterschiedliche RGB Aperturen sichtbar, wie die Fotos oben links und oben rechts zeigen. Das Foto unten mittig zeigt die zweite Blende mit aufgebrachten Farbfilterfolien. Auf der Rückseite der Blende befinden sich keine Polarisationsfilter. Werden beide Blenden im MZ eingesetzt, stellen sich je Polarisationsrichtung und je Apertur-„Farbe“ virtuelle Doppelspalte ein, wobei sich zwei verschiedene VDS-Abstände je Farbe ergeben, wie in der linken und rechten Spalte für rot (R) veranschaulicht. Die Gitterkonstante je Polarisationsrichtung und je Apertur-„Farbe“ ist immer ein Vielfaches der zehnfachen Spaltbreite.

Messversuch

Abbildung 4.30 zeigt die sechs Shearogramme mit Fehlstellenindikator für eine einfache Prüfplatte (vgl. Kapitel 2.4.b) bei der one-shot ESPSI Messung. Zum Zeitpunkt der Messung konnte je Wellenlänge nur eine einzige LD verwendet werden. Dabei führt die Unterbelichtung aufgrund der reduzierten Messlichtintensität durch die verwendeten Gitterblenden im grünen Kanal zu örtlichem Rauschen. Eine weitere Ergebnisauswertung ist somit nicht möglich.

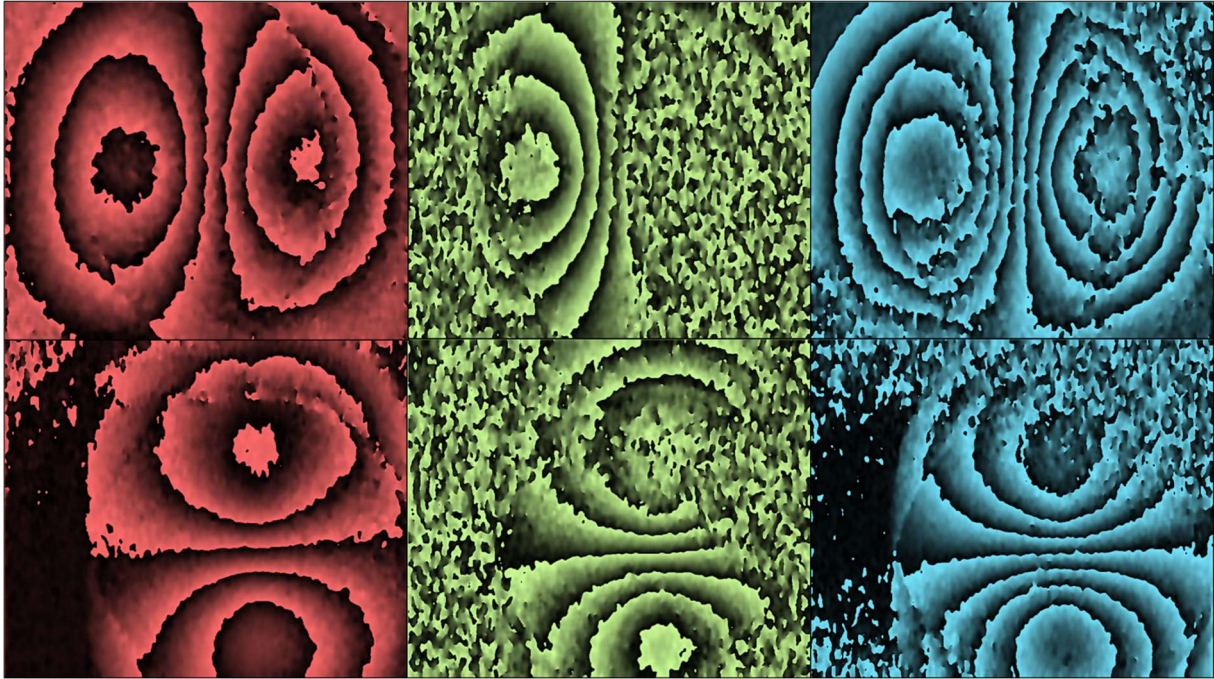


Abbildung 4.30: Shearografischer Fehlstellenindikator für eine einfache Prüfplatte bei der one-shot ESPSI Messung; je Farbkanal (links, mittig, rechts) werden zwei Shearrichtungen (oben, unten) erfasst. Die Bilder wurden zur besseren Visualisierung entsprechend des jeweiligen Farbkanals eingefärbt. Vor allem die grüne Beleuchtung ist aufgrund der reduzierten Messlichtintensität durch die notwendigen Blenden örtlich unzureichend, wodurch es zum Rauschen kommt. Eine fehlerfreie Demodulation ist hier nicht möglich, wodurch die weitere Auswertung der sechs shearografischen Messgrößen nicht durchgeführt werden kann.

Ausblick zur one-shot ESPSI

Der vorgestellte Ansatz der one-shot ESPSI sollte weiterverfolgt werden. Er ist der Schlüssel für die einfache, praxistaugliche Echtzeit-Messung aller shearografischen Messgrößen. Auf diese Weise kann erstmals eine dynamische Anregung genutzt und dadurch nie dagewesene Auswerte- und Evaluationsmöglichkeiten erreicht werden. Die ip und dual-shear Ergebnisse bieten ein hohes Potential für die shearografische Rissdetektion, wie bereits am Kapitelende 4.3.a und 4.3.b diskutiert.

Konkret sollte die Einsatztauglichkeit eines Aufbaus mit Polarisationskamera statt mit Farbkamera untersucht werden. Je Polarisationskanal müssten drei Spektren unterschiedlicher Trägerfrequenz für die RGB Wellenlängen erzeugt werden. Die zu entwerfenden Gitterblenden müssten dann lediglich mit Farbfilterfolien versehen werden, was die Messlichtintensität und Messrobustheit steigert.

Sollte zukünftig ein Bildsensor am Markt verfügbar sein, welcher gleichzeitig farb- und polarisationsunterscheidend arbeitet, ergeben sich weitere vielversprechende Möglichkeiten für RGB pol FFT CF SPS.

5. Messgeräte, Steuerung und Software

In diesem Kapitel werden die Messgeräte vorgestellt, welche für die Versuche in Kapitel 7 eingesetzt werden. Es handelt sich um das neue Mach-Zehnder Messgerät sowie das weiterentwickelte Interferoskop und Mikroferoskop. Sie arbeiten nach der in Kapitel 4 beschriebenen, neuen FFT CF SPS VDS MZ Methode. Darüber hinaus wird das dazugehörige, neu entwickelte Steuergerät vorgestellt. Dieses wird zur digitalen Ansteuerung der Anregungseinheiten und der Laserlichtquellen an den Messgeräten verwendet. Programmiert wird das Steuergerät durch die neu entwickelte Software OPTIS 4. Mit ihr wird ebenfalls die zeitliche Synchronisation zwischen dem Messgerät und der Messobjektanregung sichergestellt.

5.1. Mach-Zehnder Messgerät

Abbildung 5.1 zeigt das entwickelte Mach-Zehnder (MZ) Messgerät. Durch Umrüstung der entsprechenden optischen Elemente nach einem Steckkastensystem im Geräteinneren können SPS oop ESPSI und ESPI sowie dual-shear ESPSI betrieben werden (s. Kapitel 4.1.a, 4.1.e und 4.3.b). Die Gitterblenden werden bei der Einrichtung einer Messmethode einmalig stufenlos gegeneinander verschoben. Dabei wird unter Laserbeleuchtung eines Objektes das FFT Amplitudenbild der Kamera verfolgt, um den korrekten VDS Abstand einzustellen (s. Kapitel 4.1.c). Der Shear wird stufenlos in zwei Richtungen eingestellt. Dies erfolgt manuell über zwei seitlich angebrachte Schrauben. Der Shear für die dual-shear Halbspiegel wird manuell über eine Schraube an der Geräteunterseite stufenlos in eine Richtung eingestellt.

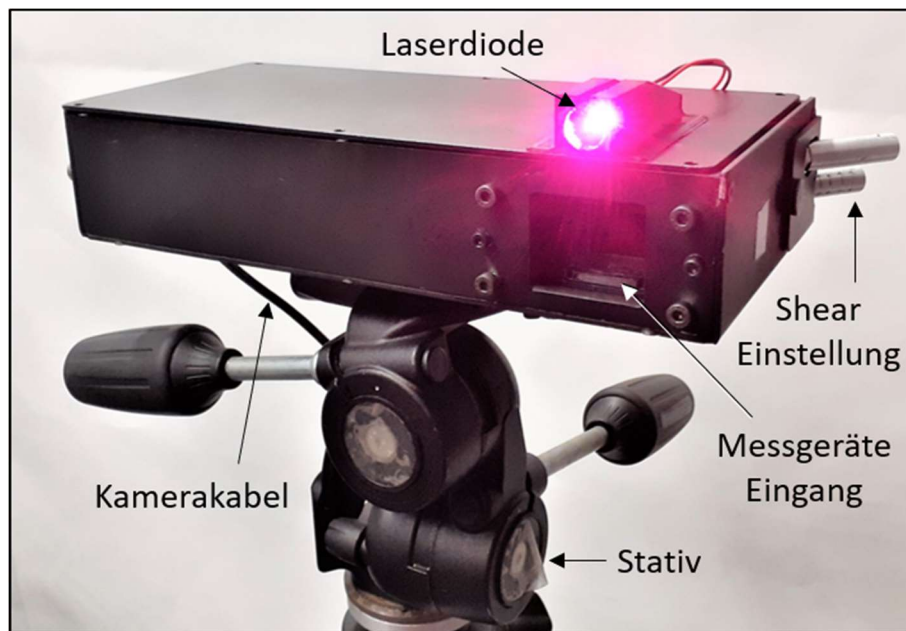


Abbildung 5.1: Mach-Zehnder (MZ) Messgerät mit roter Laserdiode beim flexiblen Einsatz auf einem Stativ.

Die maximal einsetzbare Objektbrennweite beträgt ca. 25 mm. Bei einem Messabstand von 500 mm ist somit eine Messfläche von ca. 275 mm x 170 mm erreichbar, wie Abbildung 5.2 zeigt. Bei kleineren Brennweiten bzw. größeren Objektiv-Öffnungswinkeln kommt es zu Bildabschattungen aufgrund des Interferometer-Aufbaus vor der Kamera. Größere Messflächen werden mit dem 4f Modul erreicht, s.

unten. Das Messgerät ist lediglich durch ein USB3 Kamerakabel mit einem PC bzw. Laptop verbunden. Als Laserquelle kommt ein batteriebetriebenes Laserdiodenmodul zum Einsatz. Die Messrobustheit mit SPS und den Gitterblenden ist ausreichend hoch, um das Gerät auf einem Stativ am Messort zu positionieren. Dabei reicht eine einfache Lagerung des Messobjektes aus, z. B. durch Anlehnen an eine Wand.

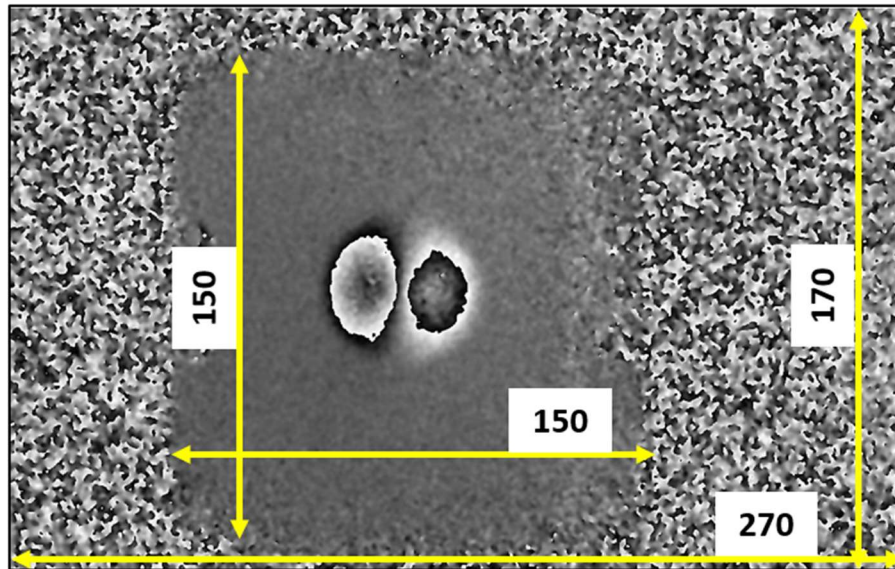


Abbildung 5.2: Erreichbare Messfläche mit dem MZ Messgerät bei einer Brennweite von 25 mm und einem Messabstand von 500 mm; Maße eines beispielhaften Messobjektes mit Fehlstellenindikator.

5.1.a. 4f Modul

Das entwickelte 4f Modul wird verwendet, um die Messfläche des MZ Messgeräts zu erhöhen und dessen Einsatz flexibler zu gestalten. Das Modul besteht aus einem angeschraubten Zoom-Objektiv und einer weiteren Linse in seinem Gehäuse, s. Abbildung 5.3 links. Es wird an den Grundkörper des MZ Messgerätes am Sensoreingang angebracht, wie s. Abbildung 5.3 rechts zeigt. Dabei stellt sich ein sog. 4f System ein, wie in Abbildung 5.4 schematisch dargestellt. Das System „führt“ das Licht durch das Interferometer. Die Fläche, in der Bildinformationen vorliegen, wird durch die Lichtbrechung an den Linsen klein gehalten. Auf diese Weise entstehen keine Bildabschattungen. Bezüglich weiterführender Informationen sei auf [110] verwiesen. Die Brennweite der bikonvexen Linsen⁹⁵ ist beidseitig gleich groß und richtet sich nach der optischen Pfadlänge des Interferometers. Die Brennweite im MZ Messgerät mit 4f Modul beträgt 50 mm. Das Interferenzphänomen der SPS Trägerfrequenz am Doppelspalt⁹⁶ richtet sich ausschließlich⁹⁷ nach der Brennweite der kameranahen Linse. Das heißt bei festen Geometrien der Gitterblenden verursacht eine Änderung der Brennweite des kamerafernen Objektivs am 4f Modul keine Änderung der SPS-Parameter im Fourierbild (s. Kapitel 4.1.c Gleichung 4.9 ff.). Aus diesem Grund kann ein Zoom-Objektiv am 4f Modul angebracht werden, wodurch die Messfläche flexibel zur Messaufgabe und geräteextern einstellbar ist.

⁹⁵ Als kameranahe Linse dient hierbei das im MZ Grundkörper installierte Kameraobjektiv mit Festbrennweite.

⁹⁶ Siehe Abbildung 4.4, Kapitel 4.1.b.

⁹⁷ Im Fernfeld, siehe auch Kapitel 2.2.c.

5. Messgeräte, Steuerung und Software

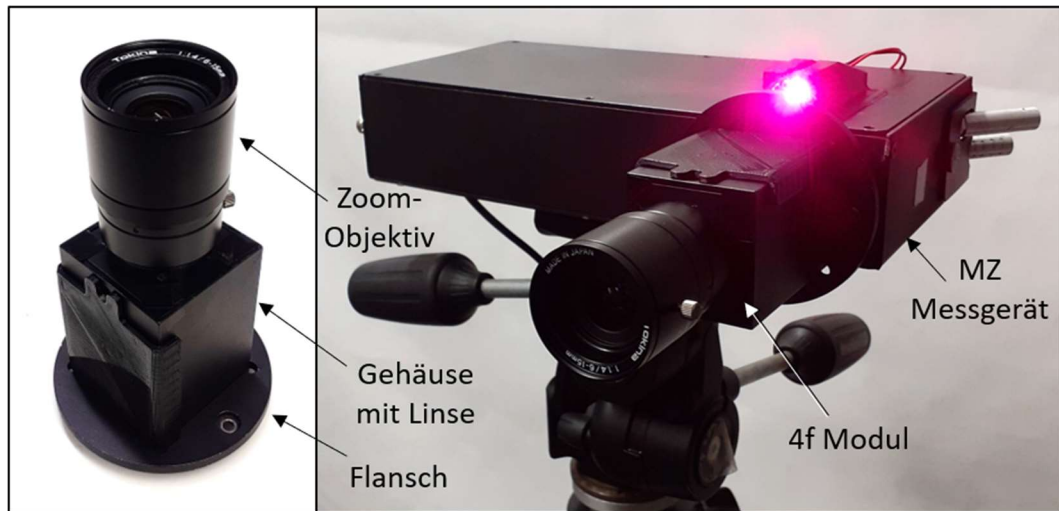


Abbildung 5.3: (Links) 4f Modul mit Zoom-Objektiv und weiterer Linse im Gehäuse; (rechts) angeflanscht am MZ Messgerät kann die Messfläche direkt über das Zoom-Objektiv eingestellt werden, ohne weitere Einstellungen im MZ Grundkörper vornehmen zu müssen.

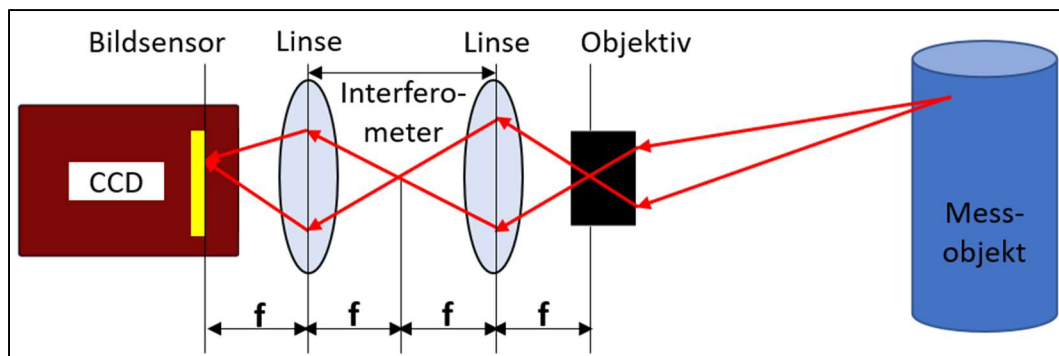


Abbildung 5.4: Prinzip des 4f Systems über die Trennung von Kamera und Objektiv und die Einbringung von zwei bikonvexen Linsen gleicher Brennweite; zwischen den beiden Linsen kann ein Interferometer angeordnet werden. Mithilfe der mehrmaligen Strahlbrechung an den Linsen wird die Lichtfläche klein gehalten, wodurch es keine Informationsverluste (Bildabschattungen) gibt.

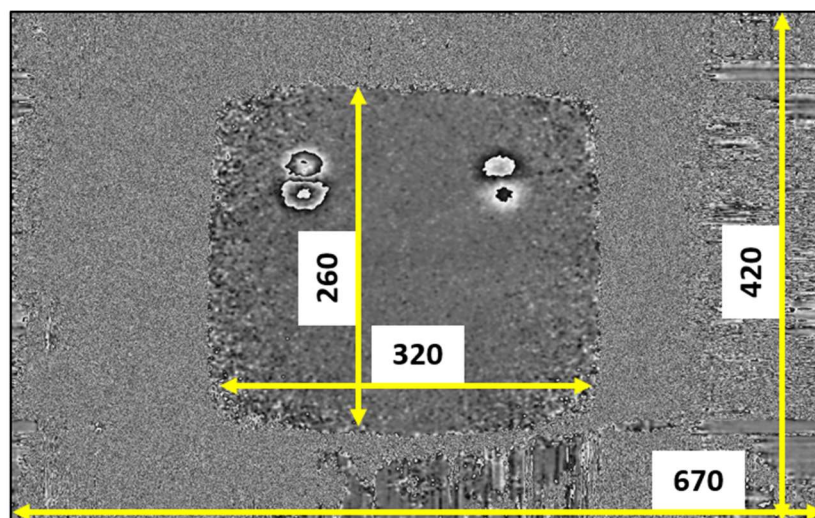


Abbildung 5.5: Erreichbare Messfläche mit dem MZ Messgerät mit 4f Modul bei einer Brennweite von 10 mm und einem Messabstand von 500 mm; Maße eines beispielhaften Messobjektes mit zwei Fehlstellenindikatoren.

Abbildung 5.5 zeigt das Shearogramm einer 320 mm x 260 mm Prüfplatte mit zwei Fehlstellenindikatoren bei einer Messfläche von ca. 670 mm x 420 mm in einem Messabstand von 500 mm. Die Brennweite beträgt 10 mm. Bei der praktischen Anwendung ist zum Erreichen der maximalen Messfläche eine entsprechende Laseraufweitung mit höherer optischer Leistung erforderlich. Hierbei sind erhöhte Lasersicherheitsbedingungen zu beachten (s. Kapitel 2.2.e). Gegebenenfalls wird mit vom Sensor entkoppelten Lasern gearbeitet, um optimale Beleuchtungsbedingungen einzurichten.

5.1.b. RGB Beleuchtungsmodul

Das entwickelte RGB Beleuchtungsmodul wird u. a. verwendet, um 3D ESPSI, 3D ESPI und one-shot ESPSI am MZ Messgerät zu betreiben. Das Modul umfasst bis zu drei Beleuchtungsarme, die jeweils mit bis zu drei Laserquellen bestückt werden, s. Abbildung 5.6. Die Laserquellen werden radial verschoben, um optimale Beleuchtungs- und Sensitivitätsbedingungen entsprechend der Messaufgabe einzurichten, vgl. Kapitel 4.3.a. Das Modul wird an den Grundkörper des MZ Messgerätes am Sensoreingang angebracht, s. Abbildung 5.7 links. Weitere rotatorische Einstellungen für spezielle Sensitivitätsanpassungen sind möglich⁹⁸, s. Abbildung 5.7 rechts. Das Beleuchtungsmodul kann mit zwei unterschiedlichen Armlängen, 150 mm und 340 mm, bestückt werden, je nachdem, welche Sensitivität für die ip Messungen nötig ist, s. Abbildung 5.8 links. In einem Messabstand von 500 mm wird so ein Beleuchtungswinkel von ca. 35° erreicht. Darüber hinaus wird es verwendet, um eine flexiblere Beleuchtungseinstellung mit mehreren Laserquellen für Messmethoden ohne RGB Beleuchtung zu gewährleisten. Das 4f Modul (s. oben) kann unabhängig davon angebracht werden, s. Abbildung 5.8 rechts.

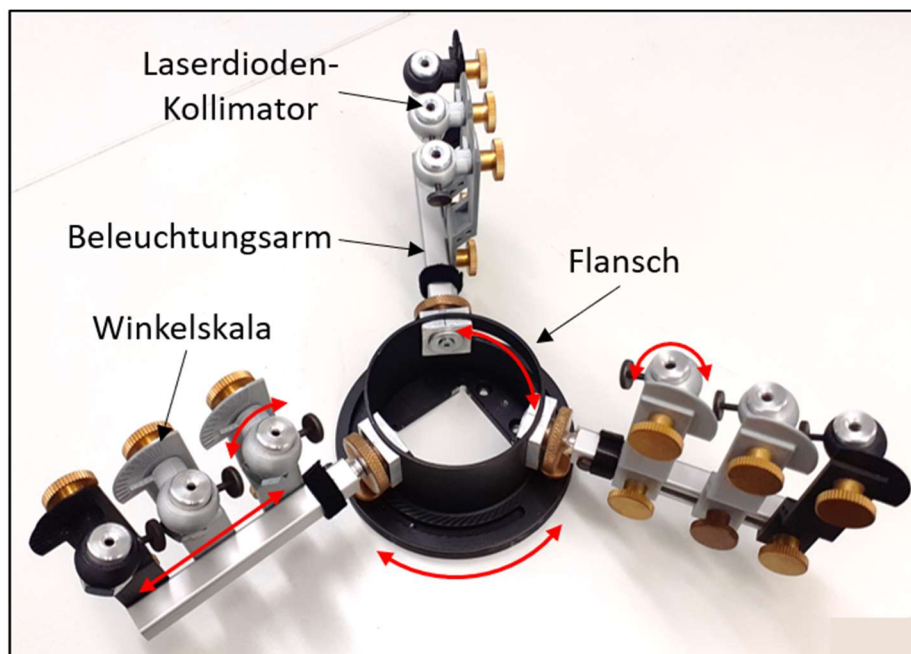


Abbildung 5.6: RGB Beleuchtungsmodul mit drei Beleuchtungsarmen am Flansch; die Arme sind hier jeweils mit drei LD-Kollimatoren ausgerüstet. Die Einstellmöglichkeiten für den Beleuchtungswinkel sind durch die roten Pfeile gekennzeichnet.

⁹⁸ Nicht weiter dargestellt; die entsprechenden Gleichungen können analog zum Gleichungssystem 4.15 entwickelt werden.



Abbildung 5.7: (Links) angeflanshtes RGB Beleuchtungsmodul am MZ Messgerät mit einer Laserquelle je Beleuchtungsarm in der Konfiguration für die 3 out-of-plane Mechanik; (rechts) rotierte zwei-Arm Konfiguration für eine maximale Sensitivität in vertikaler Richtung (nicht weiter ausgeführt, s. Texthinweis).

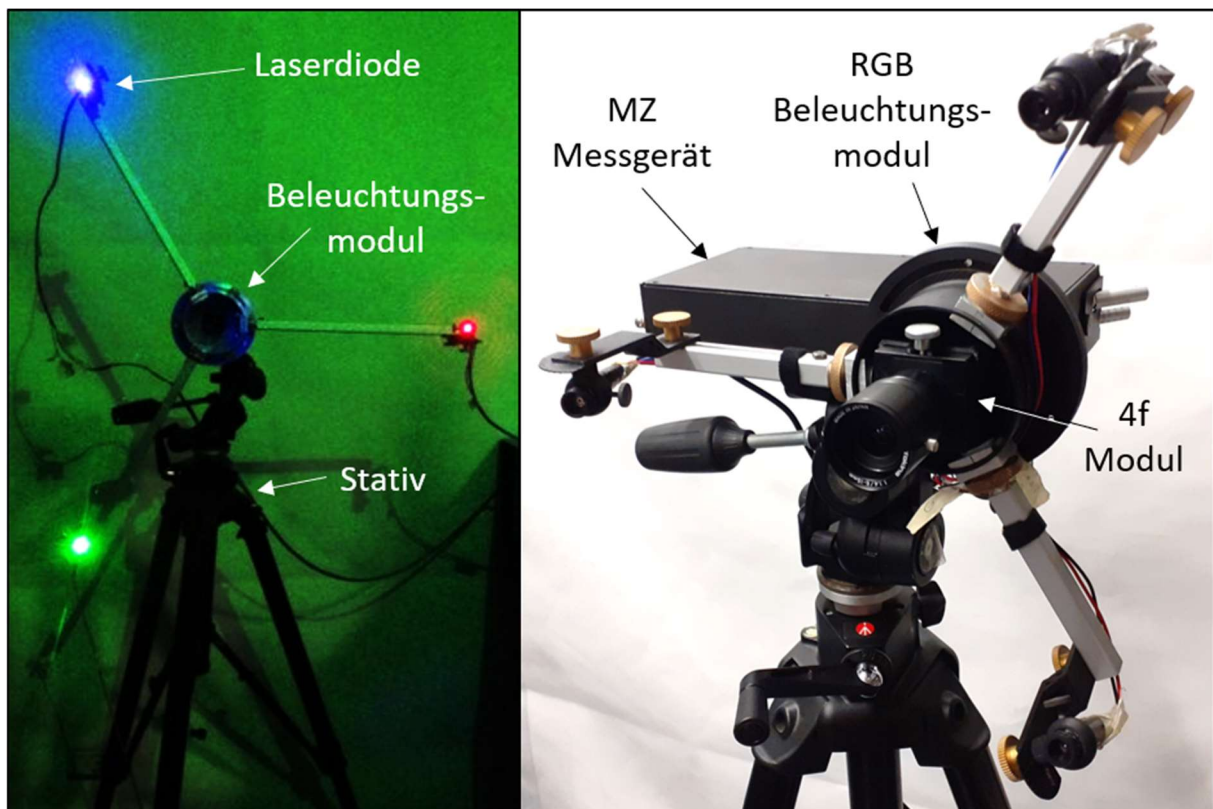


Abbildung 5.8: (Links) RGB Beleuchtungsmodul mit 340 mm Armlänge als Ausführung für hohe ip Sensitivitäten; auf diese Weise werden bei einem Messabstand von 500 mm Beleuchtungswinkel von 35° erreicht. (Rechts) MZ Messgerät mit gleichzeitig angeflanshtem 4f Modul und RGB Beleuchtungsmodul.

5.1.c. Technische Daten

Tabelle 5.1 enthält die technischen Daten des entwickelten MZ Messgeräts inkl. der oben beschriebenen Zusatzmodule. Bezüglich weiterer Informationen zur Messauflösung, zum Messbereich und zu Messabweichungen sei auf Kapitel 2.6 verwiesen.

Tabelle 5.1: Technische Daten des entwickelten MZ Messgeräts mit Unterscheidung der verschiedenen Messmethoden, die eingerichtet werden können.

Mach-Zehnder Messgerät				
	oop ESPSI, oop ESPI	3D ESPSI, 3D ESPI	Dual-shear ESPSI	One-shot ESPSI
Kastenmaße [mm³]	260x130x70 + ggf. 50x50x130 (4f System)	260x130x70 + ggf. 50x50x130 (4f System) + 360x360x60 (RGB Beleuch- tungsmodul,150 mm Armlänge)	260x130x70 + ggf. 50x50x130 (4f System)	260x130x70 + 360x360x60 (RGB Beleuch- tungsmodul,150 mm Armlänge)
Gewicht [g]	1400 + ggf. 300 (4f System)	1400 + ggf. 300 (4f Sys- tem) + 700 (RGB Be- leuchtungsmodul)	1400 + ggf. 300 (4f Sys- tem)	1400 + 700 (RGB Be- leuchtungsmodul)
Optische Leistung Laser [mW]	50	3x50	50	3x50
Laserwellenlänge [nm]	685 (R)	685 (R), 520 (G), 450 (B)	685 (R)	685 (R), 520 (G), 450 (B)
Laterale Auflösung der Kamera [Me- gapixel]	2,3	5		
Tiefenauflösung der Kamera	8 Bit			
Maximale Messwi- derholrate* [Hz]	40 bis 100	20 bis 40		5 bis 10
Objektiv-Brenn- weite [mm]	75 bis 25, ggf. bis 10 (4f System)			75 bis 50
Messfläche [mm²] im Messabstand von 500 mm	80x50 bis 270x170, ggf. bis 670x420 (4f System)			80x50 bis 130x75
Messabstand** [mm]	100 bis 3000			

* unter der angegebenen Leistung des Lasers zur Erzielung einer hohen Ergebnisqualität für typische Messaufgaben

** nicht begrenzt durch die Optik, sondern durch die Messphysik, s. Kapitel 2.6.d und 2.6.e

5.2. Interferoskop

Im Folgenden wird das Messgerät *Interferoskop* (IFK) vorgestellt. Mit ihm ist endoskopische Shearografie möglich. Auf die kurzen Ausführungen zum Stand der Technik und Forschung folgt die Historie der Entwicklung des Interferoskops. Anschließend werden das weiterentwickelte IFK Version 5, erstmals mit SPS, und das damit einhergehende Messsystem vorgestellt. Die entsprechenden technischen Daten werden zum Schluss des Kapitels aufgeführt.

5.2.a. Endoskopische Interferometrie

Seit mehr als zwei Jahrzehnten gibt es Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet der endoskopischen ZfP. Nach dem aktuellen Stand der Technik kommen digital gestützte, visuelle Verfahren zum Einsatz. Mittels Video-Endoskop wird beispielsweise das Innere von Turbinen analysiert. Ein Video-Endoskop besteht aus einer Miniatur-Kamera mit LED Beleuchtung an der Spitze einer flexiblen Daten- und Führungsleitung. Das Echtzeit-Video wird am Bildschirm eines handgeführten Bedienfelds angezeigt.

Mit optischer Laserinterferometrie werden auch Fehlstellenarten gefunden, die nicht anhand der Oberflächenform detektierbar sind. Die NASA entwickelte 1997 ein Messgerät mit endoskopischer Beobachtung und separater endoskopischer Beleuchtung zur shearografischen Prüfung von Druckbehältern [111]. Kemper stellte 2001 ein Messgerät zur holografischen Messung von technischen wie auch medizinischen Innenflächen vor [112]. Beide Messgeräte entsprechen nicht mehr dem heutigen Stand der Technik. Schnars et al. stellte 2010 ein weiteres Messgerät zur holografischen Innenmessung vor ([28] S. 111 ff.). Macedo et al. zeigte 2018 ein Messgerät zur shearografischen Innenprüfung von Rohrleitungen [113]. Für diesen speziellen Einsatzfall sind die Messergebnisse aussagekräftig. Darüber hinaus ist das Gerät jedoch nicht flexibel und durch seine Funktionsweise mit TPS anfällig gegenüber Umgebungsstörungen.

Das Technikum OGKB der Hochschule Trier verfolgt seit ca. 2005 die Entwicklung eines Messgeräts für die endoskopische Shearografie, welches eine hohe Flexibilität bei der Anwendung gewährleistet. Dieses sog. *Interferoskop* hat bereits mehrere Entwicklungsstufen bzgl. des optischen Aufbaus und des Gehäuseaufbaus durchlaufen, s. Abbildung 5.9. Es sei auf die wichtigsten Veröffentlichungen verwiesen ([114], [115], [116], [117]). Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wurde das IFK auf Basis der Version 4 ([35] Kapitel 4.2.1) weiterentwickelt.

5.2.b. Interferoskop 5 und Messsystem

Das Interferoskop wurde im Rahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit zur Version 5 weiterentwickelt. Dabei wurde erstmals räumliches Phasenschieben implementiert, wie vom Autor et al. in [58] gezeigt. Der optische Aufbau war bei dieser ersten SPS Version 5.0 weiterhin ein Michelson-Interferometer, vgl. Kapitel 3.3.a. Dabei wurde ein zusätzliches Blendenmodul zwischen Grundkörper und Endoskop geschaltet (vgl. auch Abbildung 5.9). Mit dem Gerät wurden Messungen mit transientscher Anregung an Turbinenschaufeln durchgeführt und erstmals die allgemeine Machbarkeit von handgeführten shearografischen Messungen experimentell bewiesen, wie vom Autor et al. in [119] vorgestellt. In das Interferoskop wurde anschließend, in der Version 5.1, der neue optische MZ VDS Aufbau implementiert. Dabei wurde durch 3D gedruckte Bauteile in Integralbauweise ein Kleinst-Interferometer Aufbau realisiert. Auf diese Weise wurde das Gewicht des Gerätes reduziert. Zudem blieb die optische Pfadlänge im Interferometer verglichen zum vorherigen MI Aufbau gleich. Bildabschattungen durch das Endoskop wurden so vermieden.

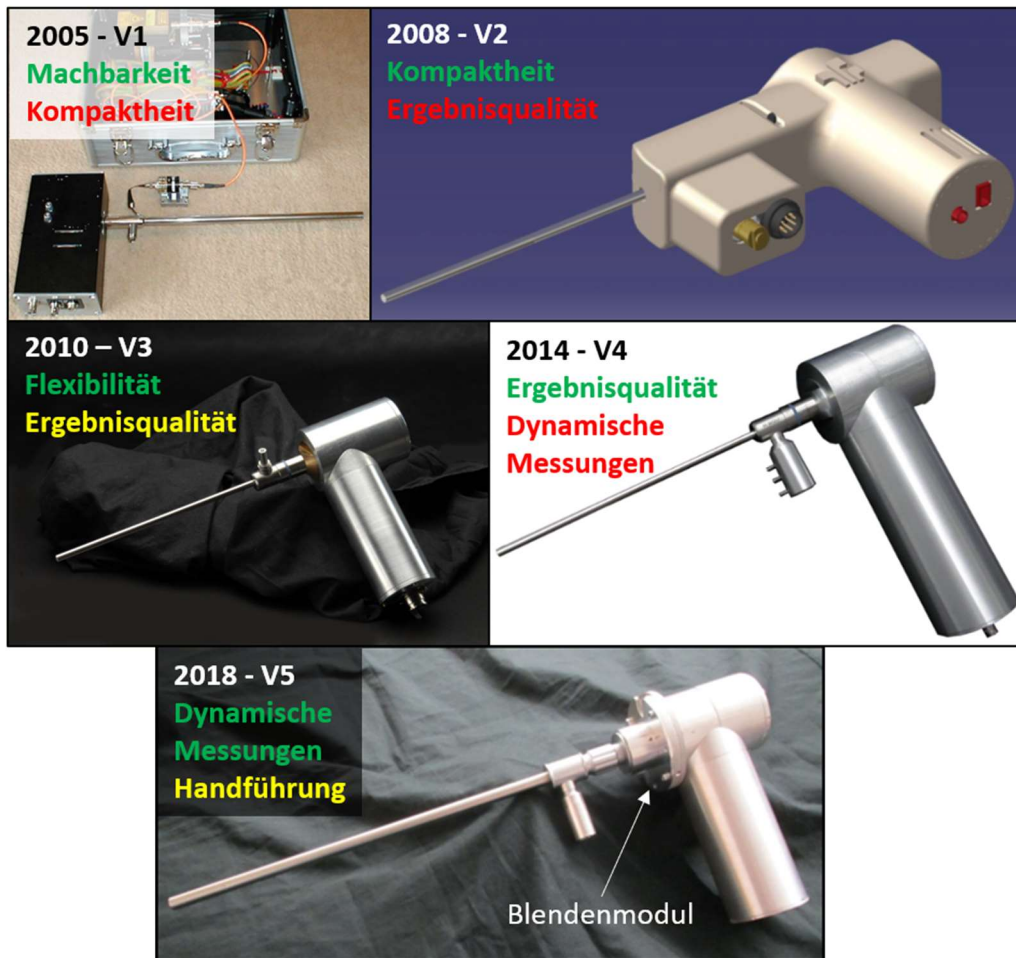


Abbildung 5.9: Entwicklungsstufen des endoskopisch-shearografischen Messgerätes Interferoskop des Technikums OGKB der Hochschule Trier; mit der Version 1 oben links wurde die Machbarkeit bewiesen. Daraufhin gab es mehrere Änderungen des optischen Aufbaus sowie des Gehäuseaufbaus, um die jeweilige Zieleigenschaft zu erreichen (Begriff in grüner Schriftfarbe). Der jeweilige Kernnachteil ist in gelber Schriftfarbe (problematisch) oder in roter Schriftfarbe (unzureichend) aufgeführt. Version 5 arbeitet erstmals nach der Methode des räumlichen Phasenschiebens.

Im Folgenden wird die neueste Version des Interferoskops vorgestellt, das IFK 5.2. Bei der Weiterentwicklung wurde der optische Aufbau konstruktiv optimiert. Er wurde robuster gestaltet und die Möglichkeit für Holografie⁹⁹ eingespart, da hochempfindliche holografische Handmessungen zum jetzigen Zeitpunkt unrealistisch erscheinen. Die optische Pfadlänge konnte weiter verkürzt werden auf nur knapp 38 mm vom Endoskop-Ausgang zum Objektiv-Eingang. Darüber hinaus besitzt das IFK 5.2 nun eine autarke Laserquelle im Akkubetrieb. Ebenfalls neu ist die entwickelte und implementierte erste endoskopische Anregungseinheit für Interferometrie. Hierbei handelt es sich um ein sog. Wirbelrohr, welches durch strömungstechnische Effekte einen Eingangsluftstrom in einen warmen und einen kalten Ausgangsluftstrom (Anregungsluftstrom und Abluft) umwandelt. Nähere Hinweise zu dieser Anregung finden sich in Kapitel 6.2.b. Das LD-Akkupack sowie die Anregungseinheit wurden mit einer einfachen, klemmbaren 3D-Druck-Halterung an dem IFK angebracht.

Abbildung 5.10 zeigt das neue IFK 5.2. Das LD-Akkupack im Halter ist rechts am Grundkörper angebracht, die Anregungseinheit links. Das Gerät kann unterhalb des Halters handgeführt werden. Die Anregung erfolgt wahlweise durch Warmluft als auch durch Kaltluft. Für typische shearografische Prüfungen ist jedoch lediglich die Temperaturdifferenz zur Umgebung relevant. Der Luftstrom wird durch

⁹⁹ Siehe Kapitel 4.1.e.

das Anregungsrohr entlang des Endoskops geführt. Das Anregungsrohr ist mit Schaumstoff umwickelt, sodass die Temperaturverluste an der Manteloberfläche möglichst gering sind. Das Endoskop ist ebenfalls mit Schaumstoff umwickelt, da die interferometrische Messung sensibel auf Temperaturänderungen an der Endoskop-Mantelfläche reagiert. Beide Rohre sind aktuell mit zwei einfachen Gummibändern verbunden. Auf diese Weise wird eine schwimmende Lagerung realisiert. Diese verhindert, dass sich das Anregungsrohr am Endoskop abstützt. Andernfalls führt die Wärmedehnung des Anregungsrohrs zur Biegung des Endoskops, was bei der Messung wie Verformungsdekorrelation wirkt.

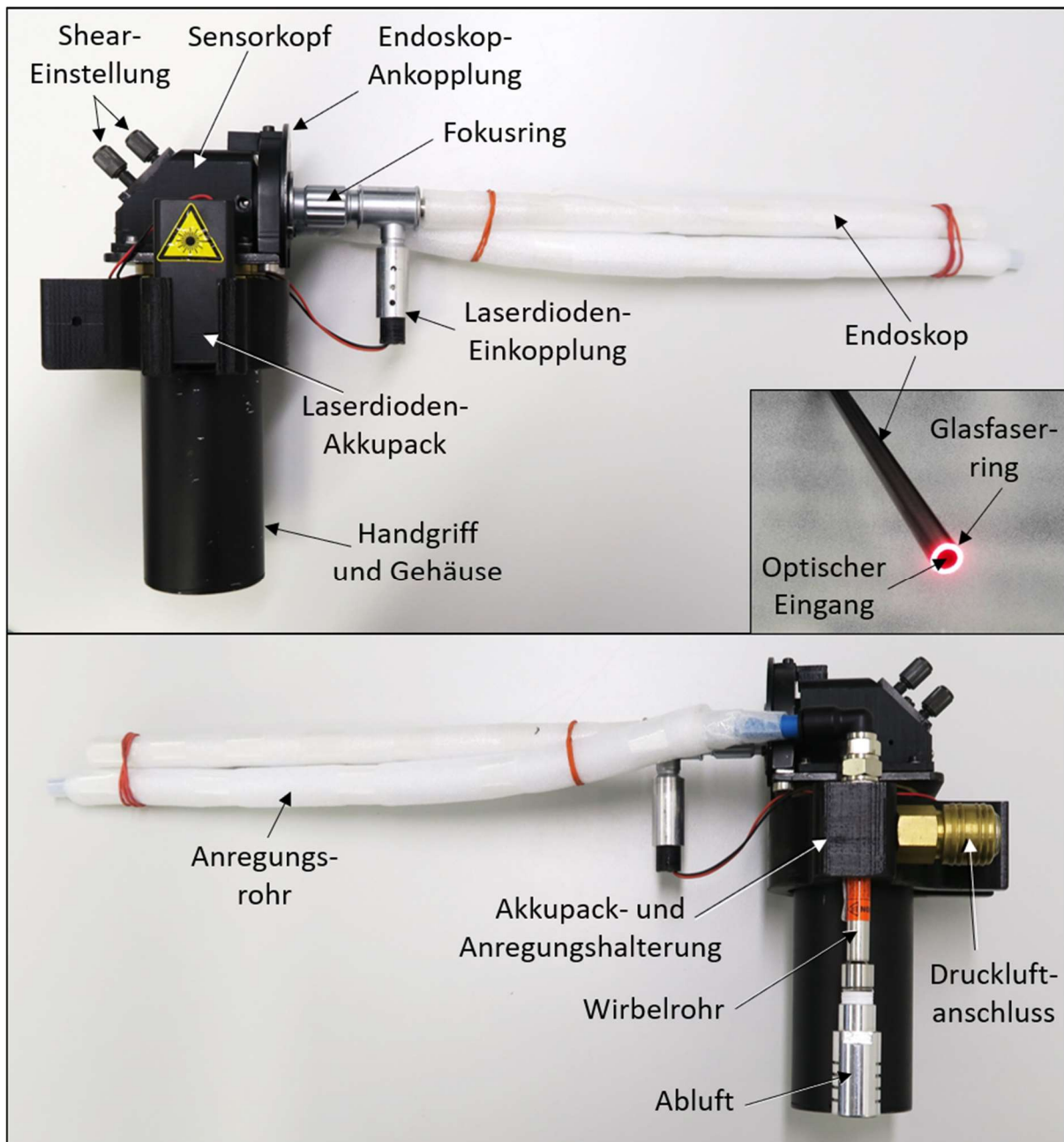


Abbildung 5.10: Interferoskop 5.2 mit VDS MZ Aufbau im Sensorkopf, erstmals mit endoskopischer Anregung und Laserdiode mit autarker Akkuversorgung.

Als Endoskope stehen sowohl ein 0° als auch ein 90° Winkelendoskop zur Verfügung. Dabei wird die Beleuchtung mittels Glasfasern im Endoskop geführt und tritt achsparallel zum optischen Endoskop-

Eingang aus. Das Anregungsrohr wird entsprechend des Endoskop-Winkels angepasst. Das Endoskop ist ein Kaufteil und kann mittels Klemmverbindung an den IFK-Grundkörper angekoppelt werden. Grundsätzlich sind weitere Endoskop-Ausführungen verwendbar. Die Fokusanpassung am Endoskop ermöglicht sehr kleine sowie große Messabstände und führt zu entsprechenden Messflächen, s. Kapitel 5.2.c. Die entsprechende Aufweitung der Beleuchtung wird durch das Endoskop gewährleistet.

Mit der endoskopischen Anregungseinheit als Bestandteil des IFKs wird erstmals ein mobiles Messsystem zusammengestellt, welches Abbildung 5.11 zeigt. Dazu werden lediglich ein Laptop mit Messsoftware, das IFK und ein Druckluft-Kompressor benötigt. Das IFK wird mittels Kamerakabel mit dem Laptop verbunden. Ein Kompressor mit Schlauch versorgt die Anregungseinheit des IFKs mit Druckluft. Der Kompressor kann vor dem Messeinsatz durch Anschließen ans Stromnetz befüllt werden und dient anschließend als mobiler Energiespeicher.

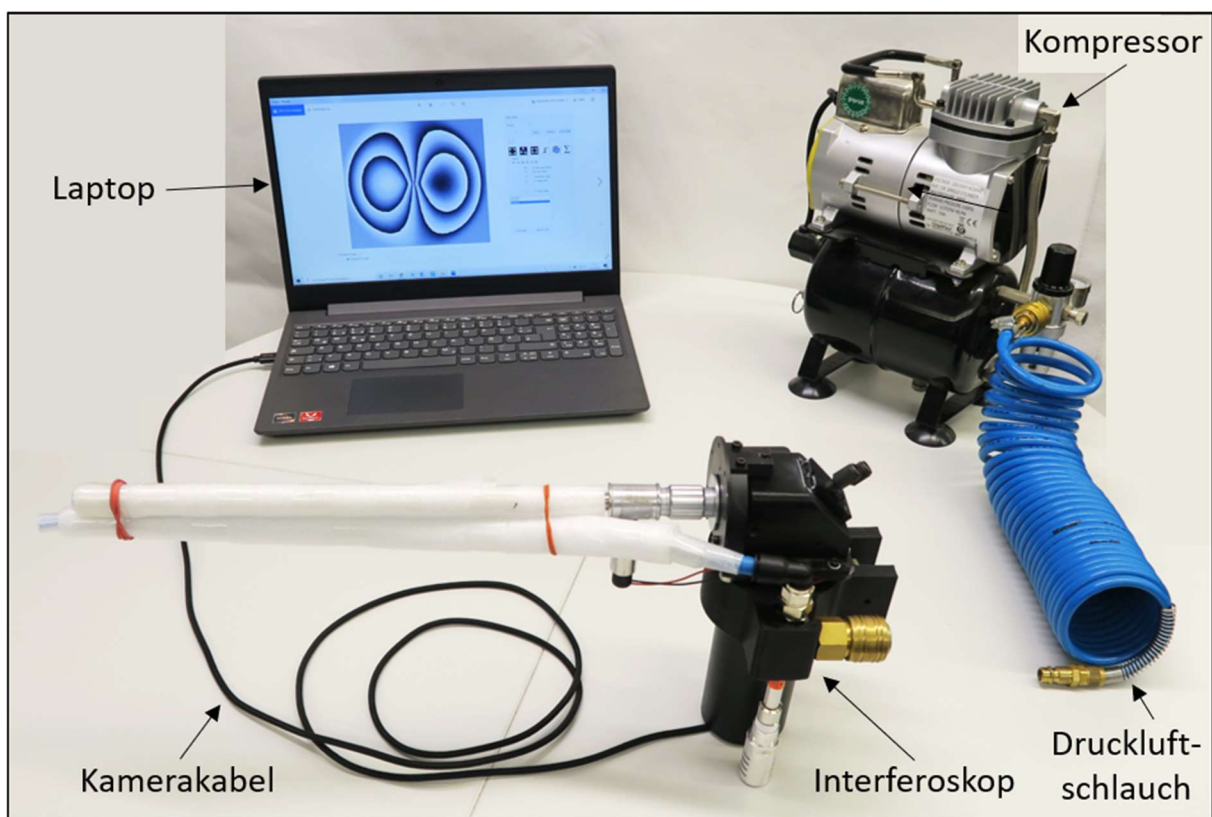


Abbildung 5.11: Entwickeltes Interferoskop-Messsystem, bestehend aus dem Messgerät, einer Kamerverbindung zum Laptop und einem elektrisch angetriebenen Kompressor als Druckspeicher, mittels Schlauch an das Messgerät angeschlossen.

Es sei angemerkt, dass es sich bei dem IFK 5.2 weiterhin um einen Forschungsprototypen handelt, dessen praktische Einsatztauglichkeit weiter verbessert werden sollte. Das IFK besitzt ein hohes Potential für die angewandte ZfP, was durch die Messversuche in Kapitel 7 und 8 unter Beweis gestellt wird. Schwerpunkte weiterer Entwicklungen sind die händische Bedienbarkeit, eine Steigerung der Anregungseffizienz sowie eine Verbesserung der Messrobustheit und der Verfahrenspraxis. Bezüglich letzterem bietet eine automatische Datenevaluation ein enormes Potential, s. Dekorrelationserkennung Kapitel 8.1.b. Wie in der Veröffentlichung [119] des Autors et al. erörtert, könnte innerhalb kürzester Zeit eine Serie aus Messbildern erfasst und für einen Prüfer vorselektiert werden. Dekorrelationseffekte durch die Handführung des Gerätes können auf diese Weise stark minimiert werden, wodurch das Gerät äußerst flexibel einsetzbar wird.

5.2.c. Technische Daten

Tabelle 5.2 enthält die technischen Daten des weiterentwickelten IFK 5.2. Bezüglich weiterer Informationen zur Messauflösung, zum Messbereich und zu Messabweichungen sei auf Kapitel 2.6 verwiesen.

Tabelle 5.2: Technische Daten des weiterentwickelten IFK 5.2.

Interferoskop	
	oop ESPI
Kastenmaße Grundkörper ohne Endoskop und ohne Anregung [mm ³]	130x75x220
Maße Endoskop [mm]	Gesamtlänge 380 Einführbare Länge 320 Einführbarer Durchmesser exkl. Anregung 10 Einführbarer Durchmesser inkl. Anregung 30
Gesamtgewicht IFK [g]	1500
Optische Leistung Laser [mW]	50
Laserwellenlänge [nm]	685 (R)
Laterale Auflösung der Kamera [Megapixel]	2,3
Tiefenauflösung der Kamera	8 Bit
Maximale Messwiederholrate* [Hz]	40 bis 100
Beleuchtungswinkel [°]	0
Endoskop Bild-Öffnungswinkel [°]	70
Messfläche [mm ²], abhängig vom Messabstand	14x8 bis 700x400
Messabstand [mm]	10 bis 500

* unter der angegebenen Leistung des Lasers zur Erzielung einer hohen Ergebnisqualität für typische Messaufgaben

5.3. Mikroferoskop

Im Folgenden wird das Messgerät *Mikroferoskop* (MFK) vorgestellt. Mit ihm ist mikroskopische ESPI möglich. Auf die kurzen Ausführungen zum Stand der Technik und Forschung folgt die Historie der Entwicklung des Mikroferoskops. Anschließend werden die beiden Module des weiterentwickelten MFK Version 2, erstmals mit SPS, vorgestellt. Die entsprechenden technischen Daten werden zum Schluss des Kapitels aufgeführt.

5.3.a. Mikroskopische Interferometrie

Die mikroskopische Interferometrie ist so alt wie die holografische Interferometrie selbst, da Interferenzerscheinungen erstmals zur Bewertung von kleinen, glatten Oberflächen verwendet wurden. Es sei auf Kapitel 2.2.c und 2.4.a verwiesen. Dabei gibt es einen fließenden Übergang bzgl. der Auswertung der Interferenzphase (Objektform) und der Differenzphase (Objektverformung), welche von der Messfläche und der Oberflächenrauheit abhängt, s. Kapitel 2.5.b. Die Fülle an wissenschaftlichen Veröffentlichungen sowie an einsatztauglichen Geräten am Markt ist entsprechend groß und wird hier nicht weiter aufgeführt. Stattdessen wird das einzigartige, im Technikum OGKB der Hochschule Trier

entwickelte Messgerät *Mikroferoskop* (MFK) beschrieben, welches im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit weiterentwickelt wurde.

Das Mikroferoskop ist die Kombination aus einem handelsüblichen Mikroskop mit einem selbstentwickelten Zusatzmodul. Die Erfindung wurde 2010 beim deutschen Patent- und Markenamt eingereicht, 2020 wurde das deutsche Patent erteilt [120]. Die Besonderheit des MFK ist der Einsatz des Zusatzmoduls als Steckbauteil in ein Mikroskop. Auf diese Weise wird durch einen einfachen Umbau neben der visuellen Betrachtung mikroskopische ESPI möglich. Abbildung 5.12 zeigt das MFK.

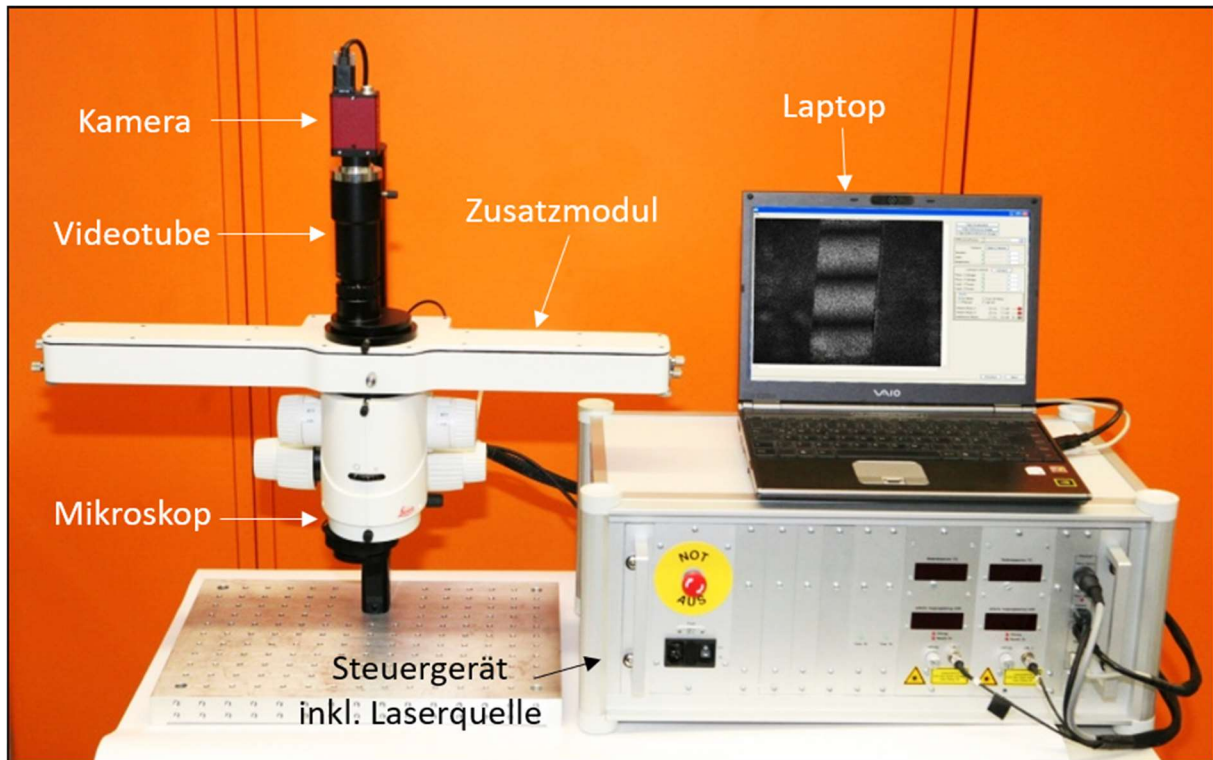


Abbildung 5.12: Das patentierte Mikroferoskop, bestehend aus einem handelsüblichen Mikroskop mit eingestecktem Zusatzmodul, wodurch holografische ESPI möglich wird; zum Messgerät gehört ein Steuergerät, welches die glasfasergekoppelte Laserquelle enthält und zudem u. a. die Piezosteuerung durchführt. Letztere dient der zeitlichen Phasenschiebung, gesteuert durch die Messsoftware am Laptop [121].

Das Laserlicht aus dem Steuergerät wird rückseitig mittels Glasfaser eingekoppelt und durch das Innere des Messgerätes geleitet. Je nach Stellung interner Abschattungsvorrichtungen wird ein interner Referenzstrahl, ein Objektstrahl mit Austritt am Ende des linken Modularms oder am Ende des rechten Modularms erzeugt. Auf diese Weise ist entweder eine oop Messung oder eine ip Messung in einer Richtung durchführbar. Das Zusatzmodul weist ein Gewicht von über 3 kg auf. Zudem besitzt es eine Gesamtlänge von 630 mm, wodurch die Objektbeleuchtung unter einem Winkel von ca. 45° erfolgt. Das Steuergerät dient ebenfalls zur Speisung des modulintegrierten Piezoelements für die TPS Messung. Mit dem Mikroferoskop sind hochqualitative Messungen mit statischer Messobjektanregung möglich. Durch die verstellbare Mikroskopbrennweite in 13 Stufen von 35,5 mm bis 575 mm können Flächen von 40 mm x 25 mm bis 2,5 mm x 2 mm vermessen werden. Die interessantesten Ergebnisse mit dem neuartigen Gerät sind in ([122], [121], [35] Kapitel 4.2.2) zu finden.

Nach dem Stand der Technik kommen zur Lösung von mikroskopischen Verformungsmessaufgaben DIC Systeme zum Einsatz, s. z. B. 8 [10] S. 4709. Für kleine Messflächen ist mit ihnen eine ähnliche

Auflösung wie mit dem MFK erreichbar. Ihre Sensitivität für ip Verformungen ist besonders hoch, die für oop Anteile am Mikroskop jedoch stark beschränkt. Zudem ist zur Durchführung von DIC immer eine besondere Probenbeschichtung notwendig. Die Vermessung von Prototypen ist typisch, eine automatisierte Serienüberwachung jedoch nicht. Im Folgenden werden die Weiterentwicklungen des MFK vorgestellt, die im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit durchgeführt wurden. Das Ziel ist die Steigerung der Messrobustheit zum Einsatz des MFK unter rauen Umgebungsbedingungen. Neben der Implementierung von SPS statt TPS soll der Beleuchtungswinkel von 45° für oop Messungen reduziert werden. Zudem sollen beide ip Verformungsanteile messbar gemacht werden. Darüber hinaus ist das Zusatzmodul infolge seiner Größe störepfindlich, schwer und teuer. Aufgrund seiner Position oben am Mikroskop ergeben sich Abschattungen bei der Objektbeleuchtung. Gleichzeitig stört die Position die Handhabung beim Bedienen des Mikroskops. Dabei sind die Lasersicherheitsanforderungen durch den Eingriff in den Laserbereich erhöht.

5.3.b. Mikroferoskop 2

Das MFK wurde weiterentwickelt zum MFK 2 mit FFT CF SPS, wobei kein zusätzliches Steuergerät für die Messung nötig ist. Bei dem Interferometer Aufbau wird der Grundgedanke des MZ VDS übernommen, konkret weicht der Aufbau jedoch vom Mach-Zehnder-Interferometer ab. Dies wird nicht weiter beschrieben, stattdessen sei auf die zukünftigen Arbeiten des Technikums OGKB der Hochschule Trier verwiesen. Da die oben aufgeführten Anforderungen zur Verbesserung nicht in einem Gerät vereinigt werden konnten, wurden zwei Module für das MFK 2 entwickelt. Das oop Modul zielt auf eine optimale oop Messung, während das 3D Modul 3D ESPI Messungen ermöglicht.

Grundsätzlich ist auch die Durchführung von shearografischen Messungen mit den Modulen möglich. Dies ist jedoch aufgrund der geringeren Verfahrenssensitivität problematisch, s. Kapitel 2.6. Für kleine Messflächen werden sich lediglich geringfügige oop Verformungen zeigen, während die hohe laterale Auflösung durch die Mikroskopvergrößerung schnell zur Verformungsdekorrelation führt.

Die Einstellung der Messfläche ist bei den MFK 2 Modulen eingeschränkt. Ausschlaggebend ist hierbei die Brennweite bei der Vergrößerung, die unmittelbar in die Gleichungen für die Spaltbreite, den Doppelspaltabstand und die Gitterkonstante eingeht, s. Kapitel 4.1.c. auf S. 101. Das heißt für optimale SPS-Parameter müsste die Blendengeometrie jeweils angepasst werden. Dies ist beim Mikroskop ebenfalls eingeschränkt. Bei kleinen Brennweiten müssen die Spaltbreite und damit auch die Gitterkonstante klein ausfallen. Aufgrund des langen optischen Pfads von der Kamera durch das Mikroskop bis zur Blende (s. Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14) ergeben sich dennoch Bildabschattungen, da die Gitterkonstante nicht klein genug ist¹⁰⁰. Eine Gitterblende im MFK ist somit nutzlos. Stattdessen muss sich an einer ausreichend großen Spaltbreite und am Doppelspaltabstand orientiert werden. Die kleinste Brennweite ohne Bildabschattungen beträgt 200 mm bei einer Messfläche von 7 mm x 4,5 mm. Für große Brennweiten muss die Spaltbreite für optimale SPS-Parameter groß ausfallen. Ab einem bestimmten Wert übersteigt der Doppelspaltabstand jedoch die Breite der Fläche, durch die das Mikroskop Licht sammelt und es entstehen Bildabschattungen. Die größte Brennweite ohne Bildabschattungen beträgt 250 mm und liegt lediglich eine Brennweiten-Stufe neben der für die kleinste zulässige Brennweite. Die Blendengeometrie für optimale SPS-Parameter wird in den Modulen daher auf eine Brennweite von 200 mm festgelegt. Für höhere Brennweiten fallen die Trägerspektren im Fourier Bild schmäler aus, als es optimal wäre. Ausreichend qualitative Messungen sind so jedoch ohne Bildabschattungen bis zu der höchsten Brennweite von 575 mm bei einer Messfläche von 2,5 mm x 2 mm durchführbar.

¹⁰⁰ Siehe auch Information zum 4f System in Kapitel 5.1.a.

Durch eine Modulposition oberhalb am Mikroskop, vergleichbar zum ursprünglichen MFK (Abbildung 5.12), werden die SPS-Parameter von der Mikroskopbrennweite entkoppelt. Weitere Untersuchungen wurden jedoch unterbrochen, da Störphänomene bei der Beugung und der Einstellung der Trägerfrequenz auftreten. Als Grund wird die Ungültigkeit der angenommenen Fernfeldbedingung vermutet (s. Kapitel 2.2.b). Darüber hinaus ergibt sich eine unzureichende Interferenzmodulation bei der Messobjektverformung. Womöglich wird dies durch die unzureichende Umwandlung der Objektwellenfront zur Referenzwellenfront durch das Diffusorglas hervorgerufen (s. Kapitel 4.1.e).

Als weiterer Punkt zum MFK sei angemerkt, dass kleine Messflächen eine geringere Menge an Photonen abstrahlen. Das heißt für eine ausreichende Belichtung muss genügend Licht auf die Messfläche gebündelt werden. Beim MFK 2 besteht die Problematik, dass bei einer Bündelung des Laserlichts selbst bei hoher Kohärenzlänge fehlerhafte Erscheinungen im Hologramm auftreten. Als Grund wird ebenfalls die oben genannte Problematik am Diffusorglas vermutet. Weitere Untersuchungen werden vom Autor empfohlen.

Oop Modul

Abbildung 5.13 zeigt das neue MFK 2 mit oop Modul. Das Modul wird am unteren Teil des Mikroskops eingesteckt und erhöht den Aufbau lediglich um 35 mm. Die derzeit noch externe Laser-Einkopplung erfolgt rechtsseitig. Das Modul besteht aus mehreren, ineinandergesteckten Gehäusebauteilen, welche die optischen Elemente des Interferometers halten. Aufgrund der Fertigung aus Kunststoff mittels 3D Drucker weist es eine Gesamtmasse von lediglich 150 Gramm auf. Das Laserlicht wird im Inneren des Moduls mit nahezu 100 % der Intensität achsparallel in die Beobachtungsachse eingekoppelt und verlässt das Mikroskop über die untere Linse. Auf diese Weise wird die Mechanik für eine hochsensible, reine oop Messung durch den 0° Beleuchtungswinkel gewährleistet. Darüber hinaus sind die Beleuchtungsbedingungen des Messobjektes durch den orthogonalen Lichteinfall optimal bzgl. der Lichtreflexion und ohne Abschattungen. Der eingegrenzte Laserbereich unterhalb des Mikroskops bei dem vorgegebenen Messabstand von 110 mm erhöht die Sicherheit beim Umgang mit dem Gerät. Erste Messergebnisse für die Prüfung von Gummi-Dichtringen unter transientser Anregung mit einer blauen Laserdioden wurden vom Autor et al. bereits veröffentlicht ([123], [124], [125]).



Abbildung 5.13: (links) Mikroferoskop 2 mit oop Modul als Steckeseinsatz in ein handelsübliches Mikroskop; das Modul wurde mittels 3D Kunststoffdruck in Steckbauweise gefertigt und wiegt inkl. der optischen Elemente des Interferometers nur 150 Gramm. (Oben rechts) als Beleuchtungsquelle wird aktuell noch ein externer Laser eingekoppelt. Der Einbau einer Laserdiode mit autarker Versorgung ins Gehäuse des Moduls ist geplant. (Unten rechts) die Laserbeleuchtung des Messobjektes erfolgt koaxial mit der Messobjektbeobachtung, wodurch Schattenbildung vermieden wird.

3D Modul

Abbildung 5.14 zeigt das neue MFK 2 mit 3D Modul. Das Modul wird mithilfe der Klemmverbindung beim Einschrauben der unteren Mikroskoplinse in das Mikroskop fixiert. Das Gehäuse besteht aus mehreren 3D gedruckten Kunststoffbauteilen, die ineinandergesteckt oder miteinander verklebt sind. Je Arm ist eine der RGB Laserdioden enthalten, zudem Optiken zur Strahlumlenkung. Das Modul weist eine Gesamtmasse von lediglich 400 Gramm auf. Die geometrische Anordnung der drei Arme liefert

die Bedingungen für die 3 out-of-plane Beleuchtungsmechanik (s. Kapitel 4.3.a). Auf diese Weise ist 3D ESPI möglich, d. h. sowohl der oop als auch beide ip Verformungsanteile werden gemessen. Aufgrund der Positionierung des Moduls am unteren Teil des Mikroskops wird bei geringen Armlängen von nur 180 mm (MFK 1: 300 mm) ein ip Beleuchtungswinkel von knapp 60° (MFK 1: 45°) erreicht. Dies gewährleistet hochsensible ip Messungen. Der verminderte Laserbereich unterhalb des Mikroskops erhöht die Sicherheit beim Umgang mit dem Gerät. Zudem werden Abschattungen durch den Mikroskopkörper vermieden. Die Inbetriebnahme des 3D Moduls am MFK 2 ist derzeit noch nicht abgeschlossen. Von daher können im Rahmen dieser Arbeit keine Messergebnisse vorgestellt werden.

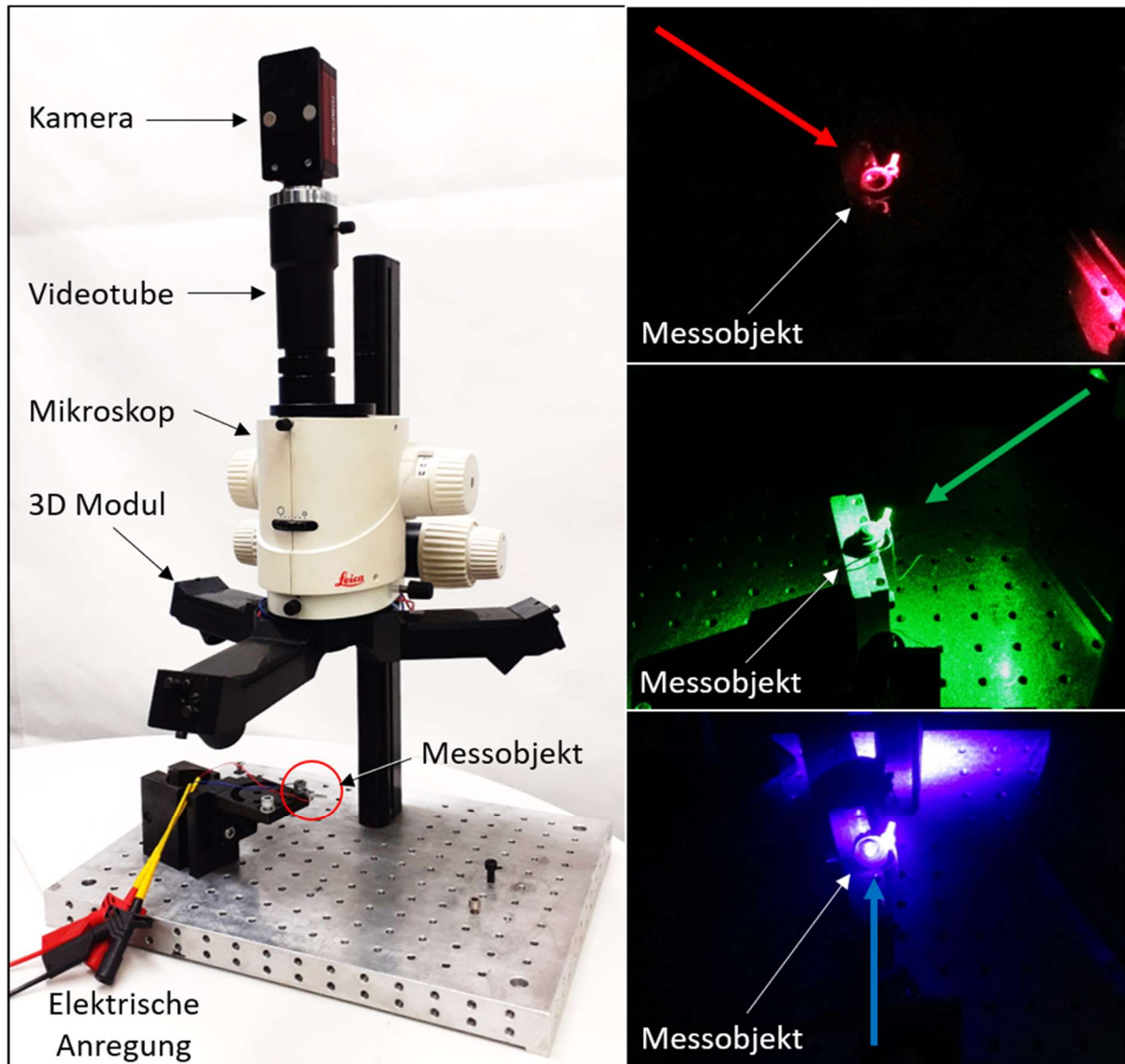


Abbildung 5.14: (links) Mikroferoskop 2 mit 3D Modul als Steck einsatz in ein handelsübliches Mikroskop; das Modul wurde mittels 3D Kunststoffdruck in Steckbauweise gefertigt und wiegt inkl. der optischen Elemente nur 400 Gramm. Es wurde aufgrund des begrenzten Druckervolumens in 4 Teilen gedruckt (drei Arme, Grundkörper) und anschließend verklebt. (Rechts) in jedem Beleuchtungsarm befindet sich eine Laserdiode mit R-, G- oder B-Wellenlänge, sodass das Messobjekt nach der 3 out-of-plane Mechanik in einem 60° Winkel beleuchtet wird (Strahlengang angedeutet durch die Pfeile).

5.3.c. Technische Daten

Tabelle 5.3 enthält die technischen Daten des weiterentwickelten MFK 2 für die oben beschriebenen Module. Bezüglich weiterer Informationen zur Messauflösung, zum Messbereich und zu Messabweichungen sei auf Kapitel 2.6 verwiesen.

Tabelle 5.3: Technische Daten des weiterentwickelten MFK 2 mit Unterscheidung der verschiedenen Messmethoden, die eingerichtet werden können.

Mikroferoskop		
	oop ESPI	3D ESPI
Kastenmaße [mm ³]	120x90x35*	360x310x60
Gewicht Modul [g]	150	400
Optische Leistung Laser [mW]	50	3x50
Laserwellenlänge [nm]	532 (G)	685 (R), 520 (G), 450 (B)
Laterale Auflösung der Kamera [Megapixel]	2,3	5
Tiefenauflösung der Kamera	8 Bit	
Maximale Messwiderholrate** [Hz]	20 bis 50	5 bis 10
Beleuchtungswinkel [°]	0	60
Brennweite [mm]	200 bis 575	
Messfläche [mm ²]	7x4,5 bis 2,5x2	
Messabstand [mm]	110	

* 35 mm Höhe eingebaut, sonst 55 mm

** unter der angegebenen Leistung des Lasers zur Erzielung einer hohen Ergebnisqualität für typische Messaufgaben

5.4. Digitale Anregungs- und Beleuchtungssteuerung

Gerade bei der Verformungsmessung mit transients Anregung ist der Zeitpunkt der Datenerfassung des unbelasteten und des belasteten Messobjektzustands¹⁰¹ von großer Bedeutung für den Fehlstellenkontrast, s. Kapitel 6.1. Aus diesem Grund wurde ein Steuerprogramm zur Software OPTIS 4 (s. Kapitel 5.5 unten) entwickelt, welches eine zeitliche Synchronisation zwischen Anregung und Datenerfassung gewährleistet. Die Datenerfassung durch die Kamera im Messgerät wird mittels OPTIS 4 gesteuert, während das Steuerprogramm eine übergeordnete Rolle einnimmt. Es löst zum einen OPTIS 4 aus, zum anderen spricht es einen Microcontroller in einem neu entwickelten Steuergerät an. Das Steuergerät dient der Versorgung von Anregungseinheiten. Darüber hinaus ist das Steuergerät in der Lage, bis zu neun Laserdioden (jeweils drei pro Farbe) für das RGB Beleuchtungsmodul (s. Kapitel 5.1.b oben) zu versorgen. Die Gegebenheiten werden schematisch in Abbildung 5.15 dargestellt.

¹⁰¹ Beziehungsweise des Ausgangszustandes und des angeregten Messobjektzustandes.

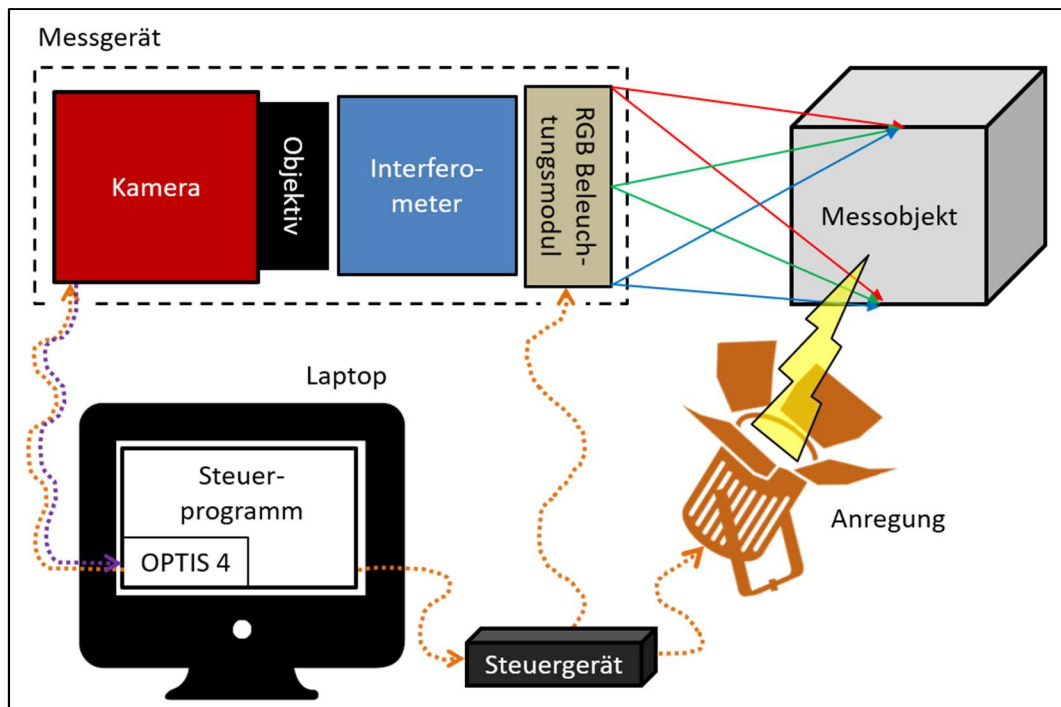


Abbildung 5.15: Darstellung der Kommunikation des übergeordneten Steuerprogramms zur zeitlichen Synchronisation der Datenerfassung durch OPTIS 4 sowie der Beleuchtung und Anregung durch das Steuergerät; die gestrichelten Linien stellen die Verbindungskabel dar, die Pfeilrichtung zeigt den Befehlsablauf. Einzig die Kommunikation zwischen OPTIS 4 und der Kamera im Messgerät läuft in zwei Richtungen ab (gestrichelte Linie in braun und in lila, entspricht einem einzigen Kamera-kabel). OPTIS 4 löst die Kamera zur Bildaufnahme aus, anschließend sendet die Kamera das Bild zurück an den Laptop.

5.4.a. Steuerprogramm

Die maximal einstellbare Gesamtzeit für einen Messvorgang, eingerichtet mit dem neuen Steuerprogramm, beträgt 10 Minuten bei einer Aktualisierungsrate von 0,1 Sekunden. Die Datenerfassung, die Beleuchtung sowie die Anregung werden zeitlich abhängig voneinander gestartet.

Die Datenerfassung durch OPTIS 4 wird mit einer Verzögerungszeit zum Beginn des Messvorgangs ausgelöst. In OPTIS 4 werden dadurch entweder Bildaufnahmen nach einem *time interval* oder einem *frame interval* eingeleitet (s. Kapitel 5.5 unten). Alle anderen Parameter zur Datenerfassung werden vorab in OPTIS 4 eingerichtet.

Die Beleuchtung wird über die Gesamtzeit des Messvorgangs eingeschaltet. Das Zusatzprogramm erlaubt es, den Versorgungsstrom je LD unabhängig voneinander in 0,02 mA Schritten einzustellen. Diese Anpassung wird vorgenommen, um Fabrikations- und Einbauunterschiede zu kompensieren und die höchstmögliche Kohärenz je LD zu erreichen (s. Kapitel 2.2.d, thermodynamisches Gleichgewicht). Mittels manuellem Einschalten jeder LD durch das Programm und Beleuchtung eines Validierungsobjektes wird die Anpassung anhand der Qualität des Interferogramms bewertet.

Für die Anregung werden drei Zeitsektionen von Beginn bis zum Ende des Messvorgangs definiert. Auf diese Weise kann neben einfachen Verläufen auch ein *dual-burst*¹⁰² Anregungsverlauf beschrieben werden. Als Signalform stehen Konstant-, Sägezahn-, Dreieck-, Rechteck- und Sinusverlauf zur Verfügung, deren Höhe in 0,4 % Schritten anpassbar ist. Eine Modulation mit Phasenverschiebung wird für Periodendauern von 100 Sekunden bis 1 Sekunde eingestellt mit einer zeitlichen Auflösung von 180

¹⁰² Siehe Kapitel 6.2.c.

Schritten pro Periode. Auf diese Weise wird ein Anregungsverlauf für *lock-in*¹⁰² Auswertungen beschrieben. Kürzere Periodendauern sind aufgrund der Dynamik der versorgten Anregungseinheiten unzureichend. Konkret können höhere Anregungsfrequenzen mit den Einheiten nicht in das Messobjekt eingeleitet werden. Hier kommen speziellere, hochdynamische Anregungseinheiten zum Einsatz, welche typischerweise mittels spezieller Steuergeräte versorgt werden¹⁰².

Das Zusatzprogramm gibt visuelle Rückmeldungen zum Ablauf des Messvorgangs. Alle getroffenen Einstellungen können als Datei gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder in das Programm eingeladen werden, sodass Messvorgänge schnell und reproduzierbar wiederholt werden können.

5.4.b. Steuergerät

Abbildung 5.16 zeigt das entwickelte Steuergerät mit seinen Bestandteilen sowie mit angeschlossenen Anregungseinheiten und RGB Laserdioden.

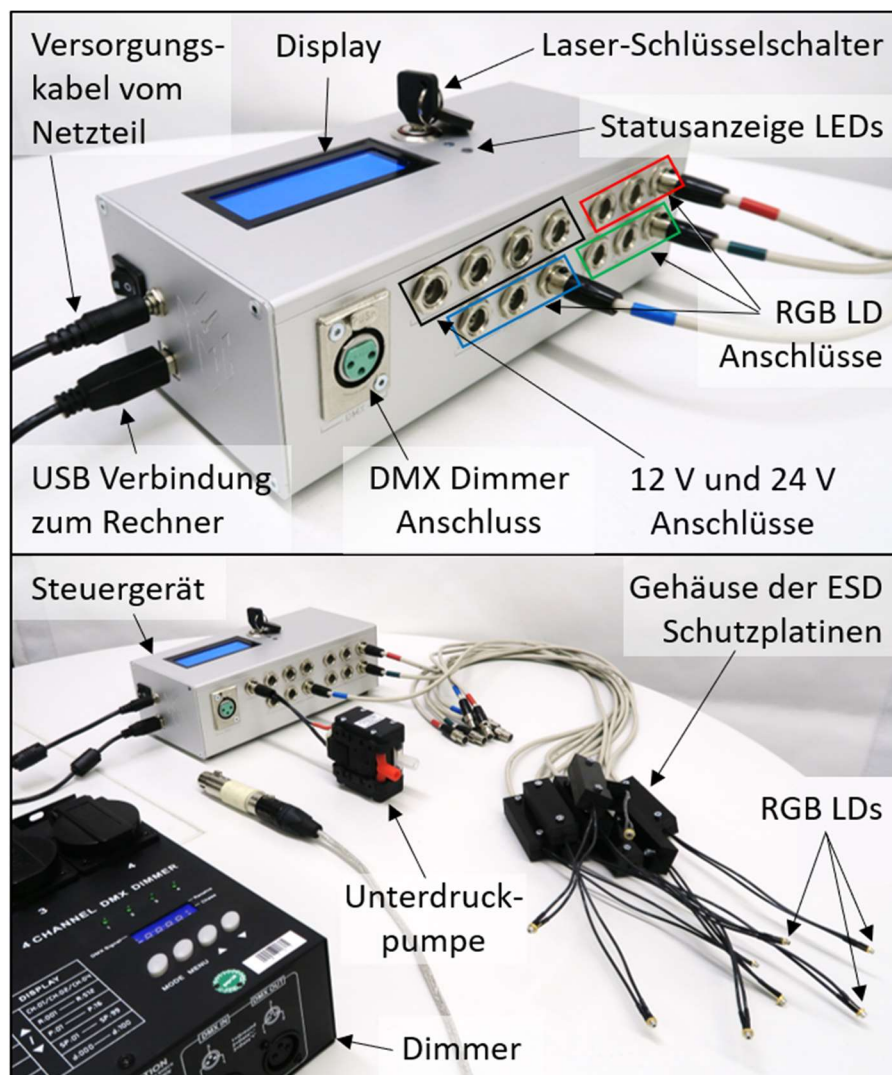


Abbildung 5.16: (Oben) Steuergerät zur Versorgung von vier Anregungseinheiten mit unterschiedlicher Versorgungsspannung sowie von neun Laserdioden unterschiedlicher Wellenlänge am RGB Beleuchtungsmodul; mittels DMX Anschluss werden Signale an einen Dimmer gesendet, um weitere vier Anregungseinheiten mit Netzspannung zu versorgen. (Unten) das Steuergerät mit angeschlossener Unterdruckpumpe, Dimmer und Laserdioden mit ESD Schutzplatinen am Kabel.

Am Steuergerät können vier Anregungseinheiten zur 12 V oder 24 V Versorgung bei einem Versorgungsstrom von jeweils bis zu 1 A angeschlossen werden, wie beispielsweise Unterdruckpumpen oder kleine Elektromotoren. Darüber hinaus werden mittels DMX Kabel Steuersignale an einen günstigen, gekauften Dimmer gesendet. Dieser versorgt bis zu vier Verbraucher mit 230 V Netzspannung und einem Gesamtstrom von bis zu 12 A, wie beispielsweise 500 W Halogenstrahler. Eine Ansteuerung aller Versorgungsausgänge ist unabhängig voneinander mit verschiedenen Signalverläufen zu unterschiedlichen Zeiten oder auch gleichzeitig möglich.

Darüber hinaus können am Steuergerät bis zu neun LDs mit jeweils bis zu 100 mA angeschlossen werden, jeweils drei LDs je RGB Farbe. Wie oben beim Steuerprogramm beschrieben, ist eine Versorgung der LDs unabhängig voneinander und mit verschiedenen Stromstärken möglich. Zudem können die LDs für den Messvorgang einzeln ab- oder zugeschaltet werden. Zwischen den LDs und dem Steuergerät sind je Kabel ESD¹⁰³ Schutzplatinen in einem Gehäuse untergebracht. Aus Lasersicherheitsgründen schaltet ein Schlüsselschalter am Steuergerät die Versorgung der LDs frei. Das Steuergerät gibt visuelle Rückmeldungen zum Ablauf des Messvorgangs.

5.4.c. Technische Daten

Tabelle 5.4 enthält die technischen Daten des entwickelten Steuergeräts für die digitale Anregungs- und Beleuchtungssteuerung.

Tabelle 5.4: Technische Daten des entwickelten Steuergeräts für die digitale Anregungs- und Beleuchtungssteuerung beim Messvorgang mit OPTIS 4.

Steuergerät		
Kastenmaße [mm ³]	225x105x70	
Gewicht [g]	1250	
Maximale Eingangsversorgung durch das 230 V Netzteil	24 V, 5 A	
Maximale Steuerzeit [min]	10	
Auflösung der Steuerzeit [s]	0,1	
	Beleuchtung	Anregung
Maximale Ausgangsversorgung	8 V, 100 mA (je Diode)	12 V, 1000 mA 24 V, 2000 mA (je Anregungseinheit)
Auflösung der Ausgangsversorgung	bis 0,02 mA	bis 0,25 V
Versorgungsanschlüsse (Ausgang)	9 (3 x R, 3 x G, 3 x B)	4 (12 V und 24 V kombinierbar)

5.5. Softwareentwicklung OPTIS 4

Im Technikum OGKB der Hochschule Trier wird für den optisch-interferometrischen Messsystembau seither eine selbstprogrammierte Software eingesetzt, s. auch [121]. Diese Software mit dem Namen *OPTIS* wurde im Rahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit neu aufgesetzt zur Version 4. Neben einer Anwendung für thermografische Messungen sind optisch-interferometrische Messungen

¹⁰³ Electrostatic Discharge, dt.: elektrostatische Entladung.

mit TPS und erstmals mit FFT CF SPS durchführbar. Die Software wurde auf Basis des Programms *Matlab* der Firma MathWorks geschrieben. Die sog. *Image Acquisition Toolbox* ermöglicht die Einbindung aller modernen Kameras mit *GenICam* Standard in OPTIS 4, ohne Änderungen im Programmcode vornehmen zu müssen. Darüber hinaus gibt es weitere Vorteile für eine anwendungsbezogene, schnelle Programmierung mit Matlab durch bereits verfügbare Bildverarbeitungsfunktionen und aufgrund der Beschleunigung parallelisierbarer Berechnungen durch deren Auslagerung auf die Rechner GPU¹⁰⁴. Für eine typische GPU Speichergröße von 4 GB werden so Anzeigegeschwindigkeiten von 10 Hz für gefilterte Differenzphasenbilder und 2 Hz für 3D-angezeigte, demodulierte Verformungsbilder erreicht. Diese Werte gelten für typische Echtzeit-Messungen in Dauerschleife mit einer 2,3 Megapixel Kamera beim ein-Kanal-SPS¹⁰⁵. Die Berechnungsgeschwindigkeit ohne Anzeige ist weitaus höher und wird oftmals nur durch die maximale Messwiederholrate des verwendeten Messgeräts beschränkt, s. Tabelle 5.1, Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 oben.

Abbildung 5.17 zeigt beispielhaft die GUI¹⁰⁶ der Datenerfassung mit SPS, wobei mittig das OPTIS 4 Logo eingefügt wurde. Abbildung 5.18 zeigt beispielhaft die GUI der Datennachbearbeitung. Die einzelnen Programmfunktionen werden nicht weiter beschrieben. Stattdessen wird der Ablauf eines Messvorgangs bei der Verwendung von OPTIS 4 inkl. der wichtigsten Schritte in Tabelle 5.5 aufgezeigt. Er gliedert sich in zehn Schritte von der Einrichtung der Kamera bis zum Speichern der Ergebnisse und bietet eine intuitive Handhabung zur schnellen Durchführung aufeinanderfolgender Messvorgänge. Die Dokumentation bzw. Ergebnisevaluation im Rahmen einer Prüfung wird aktuell noch separat in vorbereiteten Berichtsblättern durchgeführt. Eine entsprechende Erweiterung der Datennachbearbeitungs-GUI wird in naher Zukunft umgesetzt.

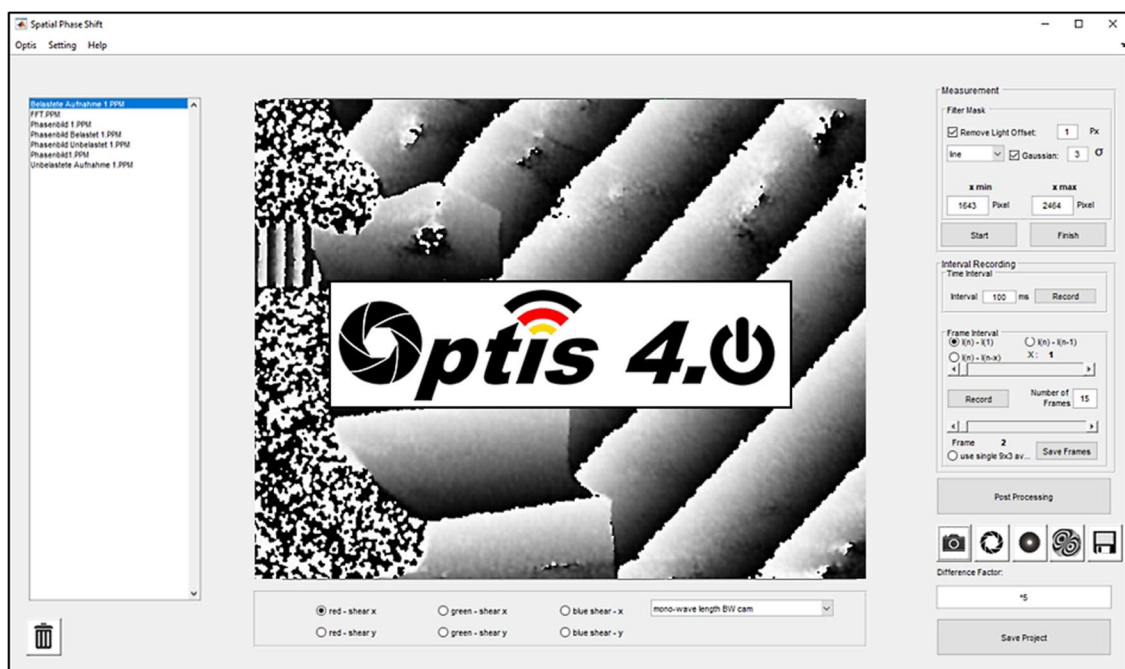


Abbildung 5.17: Grafische Benutzeroberfläche der neuen SPS Datenerfassung in OPTIS 4; das Logo der neu aufgesetzten OPTIS 4 Software wurde mittig ins Bild eingefügt. Der Programmablauf und die Funktionen werden in Tabelle 5.5 beschrieben.

¹⁰⁴ Graphics Processing Unit, dt.: Grafikprozessor.

¹⁰⁵ Beispielsweise oop ESPSI, nicht 3D oder dual-shear ESPSI.

¹⁰⁶ Graphical User Interface, dt.: grafische Benutzeroberfläche.

5. Messgeräte, Steuerung und Software

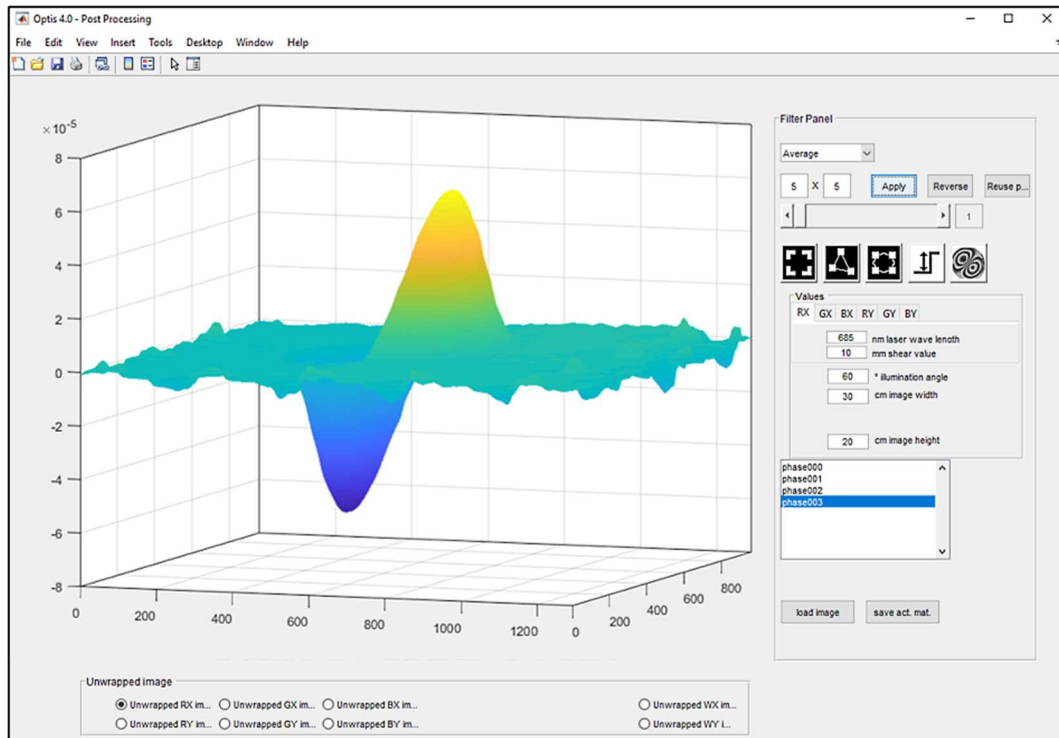
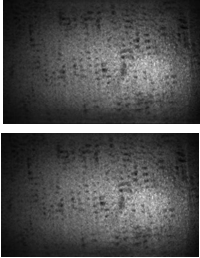
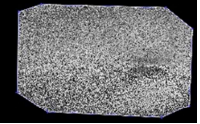
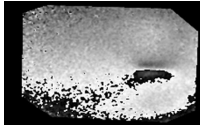
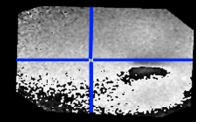
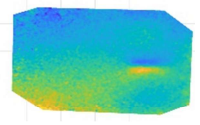
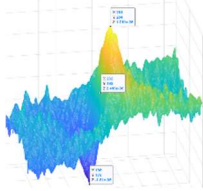


Abbildung 5.18: Grafische Benutzeroberfläche der neuen Datennachbearbeitung mit SPS Funktionalitäten in OPTIS 4; der Programmablauf und die Funktionen werden in Tabelle 5.5 beschrieben.

Tabelle 5.5: Ablauf des Messvorgangs bei der Verwendung von OPTIS 4 für optisch-interferometrische SPS Messungen und chronologische Auflistung der wichtigsten Schritte bzw. Funktionen.

OPTIS 4 – optisch-interferometrische SPS Messungen		
Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
GUI Datenerfassung		
1	Kamera initialisieren	Ausrichtung von Messgerät und Messobjekt; Einschaltung der Laserbeleuchtung; Einstellung der Kamerabelichtungszeit; vordefinierte Einstellung der maximalen Kamerataktzeit; Einstellung des Objektivfokus; Einstellung des Shearvektors; ggf. speichern oder laden der Kameraeinstellungen; Bildaufnahme einer Kalibrierplatte sowie Bildaufnahme des Messobjektes unter Weißlicht und unter Laserlicht zur Nachvollziehbarkeit der korrekten optischen Einstellung und der Messparameter; (s. Kapitel 2.3, 2.4.b Shearvektor, 2.6.a und 2.6.b)
2	SPS-Kanäle festlegen	Wahl der Bildverarbeitung für einfache oop Messungen, 3D Messungen, dual-shear Messungen oder one-shot Messungen mit oder ohne Kanaltrennung; (s. Kapitel 4.1.c und 4.3)
3	Trägerspektrum definieren	Anzeige des Fourier Amplitudenbildes im Kameravideotakt; Einstellung des optimalen VDS-Abstands durch Blendenverschiebung; vordefinierte Maskierung des Trägerspektrums (ggf. für jeden SPS-Kanal) durch Linien-, Rechteck- oder Ellipsen-Werkzeuge; vordefinierte Einstellung einer FFT Fremdlichtunterdrückung; vordefinierte Einstellung der Gauß-Gewichtung bei der iFFT; (s. Kapitel 3.2.c, 3.2.d, 4.1.c und 4.3)

OPTIS 4 – optisch-interferometrische SPS Messungen		
Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
GUI Datenerfassung		
4	Bildaufnahmen durchführen 	Manuelles oder zeitlich definiertes (<i>time interval</i>) Auslösen mindestens zweier Bildaufnahmen, zwischenzeitig Messobjektanregung oder Auslösen einer bestimmten Anzahl von Bildaufnahmen im Videotakt der Kamera (<i>frame interval</i>); Möglichkeit der Echtzeit-Berechnung und Ergebnisanzeige aller SPS-Kanäle mit vollständig vorgelagerter Datennachbearbeitung für gefilterte Phasenbilder oder 3D-angezeigte Demodulationen nach den Methoden $\Phi_{(n)} - \Phi_{(0)}$, $\Phi_{(n)} - \Phi_{(n-1)}$ oder $\text{sum}(\Phi_{(n)} - \Phi_{(n-1)})$, dadurch optimale Einstellung der Belastungshöhe und Abstimmung der Anregungs- und Aufnahmezeiten; (s. Kapitel 2.5.b, 2.5.f, 2.6.d, 2.6.e und 6.2)
5	Rohdaten prüfen 	Prüfen der Phasenstreifenqualität des Differenzphasenbildes; für mehr als zwei Bildaufnahmen Variation von Interferenzphasenbild des unbelasteten und des belasteten Messobjektes zum aussagekräftigsten Differenzphasenbild; Vorfilterung zur besseren Visualisierung möglich; ggf. speichern der Rohdaten für spätere Datennachbearbeitung oder für Weiterverarbeitung mittels <i>lock-in</i> Auswertung (s. Kapitel 6.2.c) oder Summation der Phasenbilder; ggf. löschen des Datenpools für neuen Messvorgang; parallele Datenverarbeitung für alle SPS-Kanäle mit umschaltbarer Anzeige; (s. Kapitel 2.5.a)
GUI Datennachbearbeitung		
6	Maskierung 	Phasenbild für die Bearbeitung wählen; Maskierung mit Rechteck-, Ellipsen- oder Polygonzug-Werkzeugen mit Innen- und Außenbegrenzung möglich; Vorfilterung zur besseren Visualisierung möglich; Automatischer Bildzuschnitt für Rechteck-Werkzeug, sonst NaN-Belegung im Bild; ggf. speichern oder laden der Maskeneinstellungen; parallele Datenverarbeitung für alle SPS-Kanäle mit umschaltbarer Anzeige; (s. Kapitel 2.5.c)
7	Filterung 	Median- oder Mittelwertfilterung in mehreren Schritten mit Anpassung der Filterkerngrößen und Filteriterationen möglich; ggf. speichern oder laden der Filtereinstellungen; parallele Datenverarbeitung für alle SPS-Kanäle mit umschaltbarer Anzeige; (s. Kapitel 2.5.c)
8	Nullpunkt festlegen 	Wahl des Ausgangsverformungsgradienten als relativer Nullpunkt mittels Fadenkreuz-Werkzeug im Bild; (s. Kapitel 2.4.b Mechanik)
9	Demodulation einrichten 	Eingabe der relevanten physikalischen Parameter für alle SPS-Kanäle und Wahl der Demodulationsmethode (oop Holografie / Shearografie, 3D Holografie / Shearografie) bei automatischer NaN-Erkennung; (s. Kapitel 2.5.d)

OPTIS 4 – optisch-interferometrische SPS Messungen		
Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
GUI Datennachbearbeitung		
10	Ergebnis prüfen 	3D Visualisierung des Verformungsergebnis mit Skala; rotieren, zoomen, Einzelwerte hervorheben, Skala anpassen usw. mittels Matlab-Werkzeugen möglich; umschaltbare Anzeige für alle SPS-Kanäle; Berechnung und Anzeige des Verformungsergebnis für jeden Farbkanal sowie der gekoppelten Ergebnisse für oop, ip mit x-Shear und ip mit y-Shear; ggf. speichern aller Zwischen- und Endergebnisse für Dokumentation oder für Weiterverarbeitung, z. B. Trendbereinigung oder dual-shear Ergebnisüberlagerung; (s. Kapitel 2.5.e und 4.3.b)

6. Fehlstellen- und Anregungsmechanik

Bei der shearografischen Prüfung wird die Oberflächenverformung von Messobjekten unter einer definierten Anregung bewertet (s. auch Kapitel 2.5.b) mit dem Ziel, sichere Rückschlüsse auf Fehlstellen an oder unterhalb der Oberfläche des Messobjektes zu ziehen (s. auch Kapitel 2.5.f). Dies ist im Falle von Anomalien und Indikatoren im Shearogramm oder im demodulierten Verformungsbild möglich. Hierbei ist entscheidend, dass die Datenerfassung mit hohem Fehlstellenkontrast erfolgt. Andernfalls ist kein fehlstellenrelevanter Messausschlag mit hohem SNR-Wert feststellbar. Der Fehlstellenkontrast ist, neben Einflüssen der Fehlstelle selbst, abhängig von der Anregungsart und dem Anregungsverfahren. Die Anregungsart kann durch unterschiedliche Anregungseinheiten umgesetzt werden, welche spezifische Vor- und Nachteile bzgl. des Messvorgangs aufweisen. Die Thematik inkl. einiger z. T. neu entwickelter Anregungseinheiten wird im Folgenden näher dargestellt.

6.1. Fehlstellenmechanik

Als „Fehlstellen“ werden im Rahmen der shearografischen Prüfung in den meisten Fällen Materialfehler verstanden, welche lokal zur Steifigkeitsschwächung eines Bauteils führen. Fehlstellen treten zu unterschiedlichen Zeiten des Bauteil-Lebenszyklus auf, beispielsweise bei der Herstellung oder Montage eines Produktes oder während dem Betrieb des Produkts. Letzteres ist vor allem interessant für den Bereich der Luft- und Raumfahrt, in dem Bauteilversagen unmittelbar zum Produkt-Totalausfall mit katastrophalen Folgen führen kann. Im Bereich der Automobilindustrie ist die Erkennung von Fehlstellen eher bei der Herstellung relevant, was dem Zieleinsatz der Shearografie innerhalb dieser Arbeit entspricht (s. Kapitel 1). Hier führt Bauteilversagen beim Kunden zum Imageschaden des Herstellers, was gravierende monetäre Nachteile mit sich zieht.

Die Quantifizierung von Steifigkeitsschwächen in einem Bauteil ist äußerst schwierig, da dies nur relativ zu den erwünschten, oftmals inhomogenen Steifigkeitseigenschaften erfolgen kann. Dabei zu beachten sind beispielsweise der Werkstoff (Aluminium, Kunststoff, Kork etc.), der Werkstoffaufbau (metallisch, faserverstärkt, schaumartig etc.), ggf. der Materialverbund (Komposit mit Schaumkern oder Wabenkern, Beschichtung etc.) und die Fügeart (Schrauben, Nieten, Kleben, Schweißen) sowie die Geometrie (plattenförmig, zylindrisch, 3D-geformt etc.). Die unterschiedlichen Bauteilarten weisen eine entsprechende Fülle an Fehlstellenarten auf, s. Tabelle 6.1.

Steifigkeitsschwächen sind durch die Verzerrungsmessung der DS aufspürbar. Hierzu ist eine aktive Anregung notwendig, um eine geringfügige Verformung des Bauteils hervorzurufen. Abhängig davon, welche Steifigkeitsanteile durch die Fehlstelle geschwächt sind, muss eine Anregung gewählt werden, welche entsprechende Verzerrungsanteile hervorruft (s. auch Kapitel 2.4.b), sodass Verformungsanomalien auftreten und ausgewertet werden können. Beispielsweise wird die oop Verformung stark durch einen Gaseinschluss unter der Oberfläche beeinflusst. Stattdessen wird ein Oberflächenriss durch sein Aufklaffen auffindbar. Das Aufklaffen ruft eine ip Verformung hervor, s. auch [53] Kapitel 4.1. Die Verformungen, verursacht durch die unterschiedlichen Anregungseinheiten (s. Kapitel 6.2 unten), werden infolge der mechanischen oder thermischen Belastung des Bauteils hervorgerufen (s. auch Kapitel 6.1.a). Verformungsanomalien aufgrund von Lagenfaltungsfehler bei Verbundlaminaten machen sich beispielsweise im Biegeverhalten der Bauteile bemerkbar, s. Tabelle 6.1. Stattdessen ist Porosität in diesen Bauteilen besser durch die verminderte Wärmeleitung auffindbar. Unter der thermischen Anregung bildet sich an fehlstellenbehafteten Bereichen ein Wärmestau, welcher zu anomaler Wärmedehnung führt.

6. Fehlstellen- und Anregungsmechanik

Tabelle 6.1: Typische Fehlstellenarten für einige Bauteilarten, welche mittels shearografischer Prüfung unter der angegebenen Belastungsart gefunden werden können; zusammengestellt aus ([64] Teil 5) und ([65] Teil 3.6).

Bauteilart	Fehlstellenart	Belastungsart
Verbundlamine	Lagenfaltenbildung (engl.: <i>ply wrinkling</i>)	Mechanisch
	<i>Kissing bond</i> ¹⁰⁷	
	Trockene Stelle	
	Porosität	Thermisch
	Flüssigkeitseinschluss	
	Delamination	Mechanisch, thermisch
	Schlagschaden (engl.: <i>impact</i>)	
Kompositbauteile mit Waben- oder Schaumkern	<i>Kissing bond</i> ¹⁰⁷	Mechanisch
	Porosität	Thermisch
	Delamination	Mechanisch, thermisch
	Fehlende Haftung	
	Gaseinschluss	
	Schlagschaden (engl.: <i>impact</i>)	
	Gerissener oder gestauchter Kern	
Klebungen und Beschichtungen	<i>Kissing bond</i> ¹⁰⁷	Mechanisch
	Trockene Stelle	
	Fehlende Haftung	Mechanisch, thermisch
Keramiken	Riss	Thermisch
	Gaseinschluss	Mechanisch, thermisch
Komposit-umwickelter Druckbehälter (COPV ¹⁰⁸)	Faserlinien-Abtrennung	Mechanisch
	Delamination	Mechanisch, thermisch
	Schlagschaden (engl.: <i>impact</i>)	

Bei der Belastung machen sich statische und dynamische Effekte entsprechend komplexer physikalischer Gegebenheiten des Bauteils bemerkbar. Diese werden im Folgenden nochmals vereinzelt dargestellt. Entscheidend für die shearografische Messung ist der sog. Fehlstellenkontrast. Dieser entspricht dem Verhältnis aus der Verformung im Bereich der Fehlstelle und der globalen Verformung des Bauteils. Umso höher er ist, desto sicherer kann eine Verformungsanomalie erkannt werden, welche den Rückschluss auf eine Fehlstelle zulässt. Entscheidend dabei sind ausschließlich die auftretenden Verformungen an der Oberfläche des Bauteils¹⁰⁹. Der Fehlstellenkontrast ist unabhängig von der shearografischen Messung. Hierbei ist zunächst lediglich die Wahl der passenden Anregung entscheidend. Erst im Anschluss daran wird die Verformungsanomalie shearografisch erfasst und beispielsweise auf Basis des SNR ausgewertet (s. Kapitel 2.5.f). Das heißt konkret, dass eine Fehlstelle nicht detektierbar ist, wenn durch die Anregung keine Verformungsanomalie verursacht werden kann.

Wie in diesem Kapitel 6 noch umfangreich dargestellt wird, handelt es sich bei der Fehlstellen- und der zugehörigen Anregungsmechanik für die shearografische Prüfung um einen komplexen Parameter-raum mit sehr vielen Abhängigkeiten. In der Praxis wird zur Einrichtung einer neuen Messaufgabe meist auf Erfahrungswerte und Ergebnistabellen aus der Literatur zurückgegriffen. Anschließend erfolgen zeitaufwändige, systematische Parametervariationen an künstlichen und realen Bauteilen, um den

¹⁰⁷ Englisch Wort, unverändert im deutschen Sprachgebrauch im Bereich der ZfP; gemeint sind Bereiche von zwei verklebten Bauteilen, welche ohne Luftspalt aneinander liegen, jedoch keine mechanische Klebeverbindung besteht (Grund sind beispielsweise verschmutzte Oberflächen vor dem Fügen).

¹⁰⁸ Composite Overwrapped Pressure Vessel.

¹⁰⁹ Und nicht die Verformungen im Bauteil, d. h. unterhalb der Oberfläche, welche unmittelbar an der Fehlstelle auftreten.

Fehlstellenkontrast zu erhöhen (s. auch [64]). Tabellen für die Einsatztauglichkeit der DS für spezifische Bauteil- und Fehlstellenarten sind in Kapitel 7.1 zu finden. Alternativ könnten mittels FEM-Simulation erstmals entscheidende theoretische Erkenntnisse zu den Mechanismen beschrieben werden, wodurch der Zeitaufwand bei der Messsystemeinrichtung in vielerlei Hinsicht reduziert würde. Zudem könnte der Fehlstellenkontrast vermutlich weiter erhöht und Messergebnisse validiert werden, was die Aussagesicherheit bei der Evaluation steigert. Im Bereich der shearografischen Prüfung sind derzeit nur vereinzelt Simulationen dieser Art zu finden, s. z. B. ([24] Kapitel 8.2). Ein Ausbau der Thematik wird seitens des Autors als zukünftig unumgänglich angesehen. Aufgrund der steigenden Marktnachfrage wird die Komplexität von Leichtbaukomponenten mit der Weiterentwicklung entsprechender Fertigungstechnologien zunehmen. Dadurch steigen auch die Anforderungen an die ZfP Verfahren, wobei praktische Erfahrung alleine zur Lösung komplexer Messaufgabenstellungen nicht ausreichen wird. Abbildung 6.1 soll ein Beispiel für die Möglichkeiten der Simulation geben. Darüber hinaus sei auf den Ausblick dieser Arbeit verwiesen.

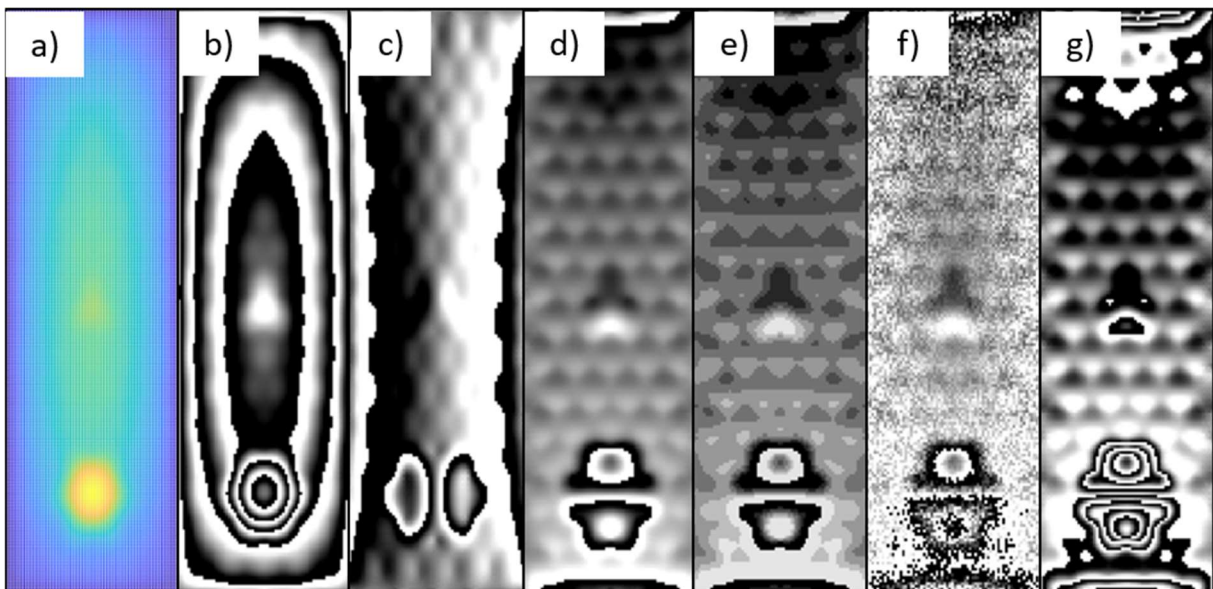


Abbildung 6.1: Überschlüssiges Simulationsbeispiel (alle Bilder sind simuliert) ohne genauere Quantifizierung; a) oop Verformung eines Aluminium-Kompositbauteils mit Wabenkern, Deckplattendicke 2 mm, bei einer Unterdruckeranregung mittels umlaufend anliegender Vakuumhaube; im unteren Bereich mit lateral größerem, mittig mit kleinerem Schlagschaden; b) Hologramm, Laserwellenlänge (für alle Interferogramme) 532 nm, bei einer Anregung von 0,01 kPa; die globale Bauteil-Wölbung macht sich durch ringförmige Phasensprünge bemerkbar, welche die Deutung des mittleren Schadens schwierig gestalten. c) Shearogramm mit 5 mm Shear (für alle Shearogramme) in x-Richtung bei einer Anregung von 0,1 bar (wie für alle weiteren Shearogramme außer g); unterer Schaden wird gut sichtbar, globale Phasenstreifen sind jedoch vorhanden; d) Shearogramm mit Shear in y-Richtung zeigt nahezu keine globalen Streifen; Schaden mittig wird leicht sichtbar; e) Shearogramm aus d) mit reduzierter Tiefenauflösung; f) Shearogramm aus d) mit beaufschlagtem Verformungsdekorrelationsanteil (Rauschen), welcher zu den Bildrändern hin stärker auftritt; g) Shearogramm mit Shear in y-Richtung bei einer Anregung von 0,3 bar zeigt, verglichen zu d), Indikatoren mit höherer Streifenordnung im Bereich der beiden Schäden.

6.1.a. Statische Belastung

Die wichtigsten Einflussparameter der statischen Belastung eines Messobjektes bei der shearografischen Prüfungen seien hier kurz aufgeführt.

Eine entscheidende Rolle bei der statisch-mechanischen Belastung spielen vor allem die Fehlstellengröße und -tiefe unterhalb der Prüfoberfläche sowie die Belastungshöhe. Zur Veranschaulichung der Abhängigkeiten zwischen diesen Parametern und der Verformung sei ein praktisches Beispiel gegeben.

Gleichung 6.1 ([64] Teil 5B) gibt ein Verhältnis von Fehlstellenradius und -tiefe an. Die Gleichung gilt für typische zylinderförmige Fehlstellen, die in Kapitel 6.1.c genauer definiert werden. Für das Verhältnis resultiert an einer Oberfläche unter homogener Druckbelastung dieselbe Verformungshöhe im Bereich der Fehlstellen. Das Shearogramm eines entsprechenden Messversuchs zeigt Abbildung 6.2. Die Fehlstellen in der unteren Zeile weisen unterschiedliche Radien und Tiefen nach Gleichung 6.1 auf. Daraus resultiert ein Fehlstellenindikator mit gleicher Phasenstreifenhöhe.

$$N \sim \frac{r^4}{t^3} \quad (6.1.)$$

Mit

N = Streifenordnung

r = Fehlstellenradius

t = Fehlstellentiefe unterhalb der Oberfläche

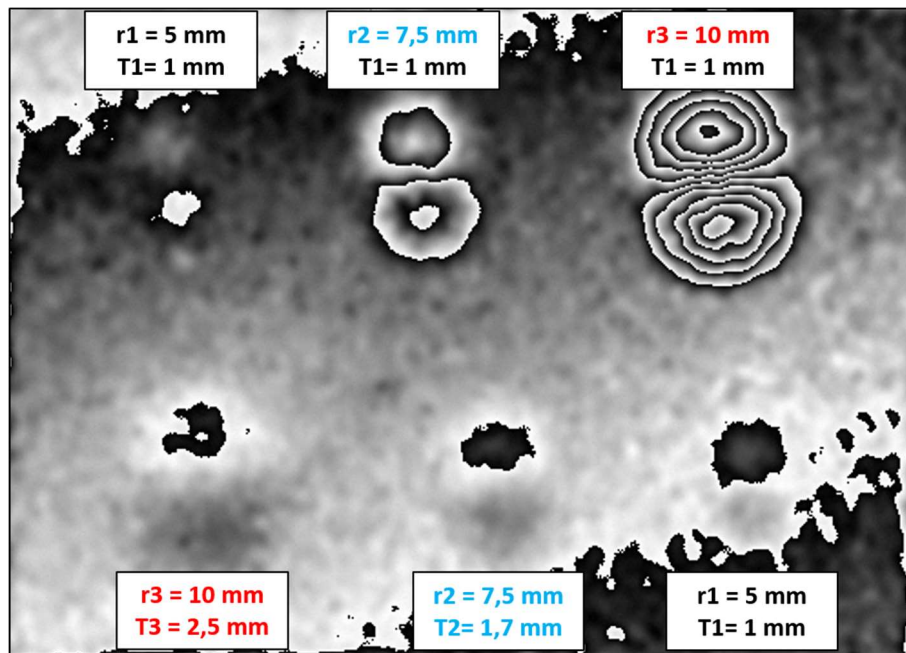


Abbildung 6.2: Shearogramm eines ebenen Messobjektes mit sechs künstlichen Fehlstellen unter Druckbelastung; die Fehlstellen sind zylinderförmig und liegen im Inneren des Messobjektes. Die drei Fehlstellen in der oberen Zeile liegen in derselben Tiefe T unterhalb der Oberfläche und weisen unterschiedliche Radien auf mit $r_1 < r_2 < r_3$. Umso größer der Fehlstellenradius ist, desto stärker ist die Verformung an der Oberfläche unter der homogenen Druckbelastung, erkennbar an der höheren Phasenstreifenordnung. Die drei Fehlstellen in der unteren Zeile weisen unterschiedliche Radien r auf und liegen in unterschiedlichen Tiefen T unterhalb der Oberfläche mit $T_1 < T_2 < T_3$. Dabei sind die Verhältnisse von r und T nach Gleichung 6.1 ausgelegt. In diesem Falle ist die Verformung an der Oberfläche für alle 3 Fehlstellen gleich, erkennbar an der gleichen Phasenstreifenordnung. Das Objekt wurde mittels 3D Druck aus PLA-Kunststoff hergestellt.

Ein weiterer wichtiger mechanischer Parameter ist der E-Modul. Für inhomogene Messobjekte, insbesondere für unidirektionale faserverstärkte Kunststoffe, ist er richtungsabhängig. Infolgedessen ergeben sich unterschiedlich hohe Verformungsanteile unter einer homogenen Belastung. Zudem beeinflusst die Geometrie des Messobjektes die Verformungshöhe. Zylindrische Druckbehälter verformen

sich unter homogener Innendruckbelastung radial doppelt so stark wie axial¹¹⁰. Für Komposite ergeben sich globale Steifigkeitssprünge zwischen den einzelnen Komponenten. Gegebenenfalls sind diese einzeln auszuwerten, da sie sich unter derselben Belastung unterschiedlich stark verformen. Zur Prüfung der Fügung von plattenförmigen Kompositen ist die Belastung und Messung von der weniger steifen Objektseite aus einzuleiten bzw. durchzuführen. Fehlstellen verursachen hier stärkere lokale Schwächungen. Ebenfalls ist die Lagerung der Objekte für die Messung nicht zu unterschätzen. Im einfachsten Fall werden die Messobjekte möglichst flächig hingelegt und stabilisieren sich durch ihr eigenes Gewicht (beachte auch Kapitel 2.6.d). Verformungen können sich auf diese Weise nahezu spannungsfrei ausbilden. Ein besonderer Vorteil der Shearografie ist die Auswertung von „Schönheitsfehlern“. Gemeint sind visuell erkennbare, anormale Oberflächenbereiche, wie beispielsweise Kratzer oder Verfärbungen. Mithilfe der Verzerrungsmessung wird bewertet, ob die visuelle Anomalie das Verformungsverhalten bzw. die Steifigkeit des Messobjektes ändert oder nur einen rein visuellen Einfluss hat.

Bei der statisch-thermischen Belastung spielen ebenfalls die Fehlstellengröße und -tiefe eine Rolle. Beide sind durch den Wärmeausdehnungskoeffizient an die Verformung gekoppelt. Somit dehnen sich die unterschiedlichen Werkstoffe eines Komposits in einer Wärmekammer unterschiedlich stark aus, was bei geklebten Platten beispielsweise zur Biegung führt. Allgemein ist die Wärmeausdehnung von Gasen höher als die von Flüssigkeiten und die von Flüssigkeiten höher als die von Feststoffen. Für Luft einschlüsse in Metall ergibt sich bei einer Temperaturerhöhung somit eine Drucksteigerung, welche eine Verformung an der Messobjektoberfläche verursacht (s. auch oben). Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Stahl ist in etwa nur halb so hoch wie der von Aluminium, der Wärmeausdehnungskoeffizient typischer Kunststoffe und von Gummi hingegen ca. 4-mal höher als der von Stahl.

Die Wärmeausdehnung kann als Bindeglied zwischen DS und Thermografie (TT¹¹¹) angesehen werden. TT misst die Wärmeabstrahlung von Oberflächen, DS die aus der Wärme resultierende Verformung der Oberfläche (s. auch Kapitel 1.3). Zum einen hat DS den Vorteil, dass neben thermischer Belastung auch Messungen mit mechanischer Belastung durchführbar sind. Dies ist für das Auffinden vieler Fehlstellenarten z. T. eine notwendige Voraussetzung (s. auch Tabelle 6.1). Zum anderen muss eine in das Messobjekt geleitete Wärmefront nicht erst wieder an die Oberfläche diffundieren, um erfassbar zu sein. Stattdessen verformt die innere, erwärmte Messobjekt-Tiefenebene das gesamte Messobjekt unmittelbar, wobei sich dies anteilig auch an der Oberfläche zeigt, s. Kapitel 6.1.b. Mittels DS können demnach tiefer liegende Fehlstellen detektiert werden, wie auch bereits experimentell bewiesen [126].

Abschließend sei der Parameter der volumenspezifischen Wärmekapazität¹¹² bei der thermischen Belastung genannt. Sie ist für Aluminium in etwa gleich hoch der typischer Kunststoffe und die von Stahl fast doppelt so hoch wie die von Aluminium. Um Stahl ausreichend stark zu erwärmen, sind hohe Anregungsleistungen notwendig.

6.1.b. Dynamische Belastung

Die wichtigsten Einflussparameter der dynamischen Belastung eines Messobjektes zur shearografischen Prüfung seien hier kurz aufgeführt.

¹¹⁰ Siehe *Kesselformel*, auch *Bockwurst-Formel* genannt [29].

¹¹¹ Abkürzung nach [27].

¹¹² Energiemenge, die nötig ist, um die Temperatur eines Volumens des Stoffs zu erhöhen; Berechnung durch Multiplikation der massenspezifischen Wärmekapazität mit der Werkstoffdichte.

Eine entscheidende Rolle bei der dynamisch-mechanischen Belastung spielt vor allem die Material-Schallgeschwindigkeit. Allgemein ist sie für dichtere Werkstoffe höher und bereits für leichte Kunststoffe zu hoch, um eine zeitaufgelöste shearografische Messung ohne enormen Zusatzaufwand zu erlauben. Stattdessen können geometrisch bedingte Schwingungsformen mittels Resonanzanregung abgerufen und ausgewertet werden, s. dazu Kapitel 6.2.c. Der einzig relevante, jedoch spezielle Aspekt für eine mechanische Belastung bei der zeitaufgelösten shearografischen Prüfung ist Kriechen, beispielsweise für Messobjekte aus Kunststoff oder Gummi. Dies wird jedoch nicht weiter behandelt.

Die Fehlstellentiefe hat einen maßgeblichen Einfluss bei der dynamisch-thermischen Belastung. Verknüpft über die Wärmeleitfähigkeit ist sie für eine ins Messobjekt eingeleitete Wärmefront relevant für den Zeitpunkt, an dem sich der höchste Fehlstellenkontrast zeigt. Sobald die Wärmefront eine thermische Grenzschicht wie einen Gaseinschluss erreicht hat, wird sie zunächst daran gehindert, weiter in das Material einzudringen. Dies führt zu einem Wärmestau, infolgedessen, verknüpft über den Wärmeausdehnungskoeffizient, unmittelbar eine Verformungsanomalie entsteht. Diese zeigt sich anteilig auch an der Messobjektoberfläche. Im weiteren zeitlichen Verlauf wird die Wärme an der Grenzschicht u. a. lateral weitergeleitet, wodurch die oberflächliche Verformungsanomalie weniger stark, jedoch lateral größer ausgebildet ist. Zur Veranschaulichung der zeitlichen Abhängigkeiten sei ein praktisches Beispiel durch Abbildung 6.3 gegeben.

Das Abfließen beim Wärmestau erfolgt nicht nur lateral. Vielmehr stellt sich ein Verhältnis zwischen transmittierendem Anteil und reflektiertem Anteil ein. Das Verhältnis ist vor allem abhängig von dem Sprung der Wärmeleitfähigkeit an der thermischen Grenzschicht, auch thermischer *Impedanz*-Unterschied genannt. Dies ist ein entscheidender Parameter für TT, da sich hieraus die Höhe der Temperatur an der Oberfläche ergibt, s. Kapitel 6.1.a oben. Die laterale Wärmedissipation ergibt sich aufgrund des Temperaturunterschieds zum umliegenden Material, welches zeitlich abhängig von der durchs Messobjekt wandernden Wärmefront ist. Die Thematik wird weitaus komplexer für richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeiten, beispielsweise für faserverstärkte Kunststoffe. Abschließend zu dieser qualitativen Betrachtung zur dynamisch-thermischen Belastung sei auf weiterführende Literatur verwiesen, s. z. B. ([24] Kapitel 2.5.3).

Die Lager- und Umgebungsbedingungen des Messobjektes sind bei hohen Messzeiten nicht zu unterschätzen. Zum einen ergibt sich aus dem Kontakt zwischen Messobjekt und Auflagefläche eine Wärmeleitung. Zum anderen herrscht eine natürliche Konvektion zwischen Bauteiloberfläche und Umgebungsluft. Beides führt zur inhomogenen Wärmeverteilung und damit zur Verzerrung des Messobjektes, wodurch Aussagen zu Fehlstellen unsicherer ausfallen.

Bei der Prüfung von plattenförmigen, gefügten Kompositen sollte die Belastung und Messung von der Seite mit der geringeren Wärmeleitfähigkeit eingeleitet bzw. durchgeführt werden. In Bereichen mit intakter Fügung fließt die Wärme schnell ab, während sie sich an Fehlstellen staut. Werden Gaseinschlüsse in der Fügung vermutet (z. B. bei dickeren Klebungen), ist eine Belastung und Messung von der Seite mit dem höchsten Impedanz-Unterschied zur Fehlstelle sinnvoll, da der Wärmestau hier stärker ausfällt.

Im Allgemeinen ist die Wärmeleitfähigkeit für dichtere Werkstoffe höher. Für die meisten Kunststoffe und Gummis ist sie 1250-mal geringer als für Aluminium, für Stahl 5-mal geringer als für Aluminium. In Kombination mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten und der volumenspezifischen Wärmekapazität (s. Kapitel 6.1.a oben) sind sehr hohe Anregungsleistungen nötig, um die thermische Belastungsmechanik für Metalle gewinnbringend zu nutzen. Werden die beschriebenen Unterscheidungsfaktoren der drei relevanten Kennwerte für Stahl, Aluminium und Kunststoff jeweils miteinander multipli-

ziert¹¹³, ergibt sich eine sehr einfache Quantifizierung bzgl. der erreichbaren thermischen Oberflächenverformung. So muss die Anregungsleistungen für Aluminium 5000-mal und die für Stahl 4000-mal höher sein als die für Kunststoff, um die gleiche Oberflächenverformung hervorzurufen.

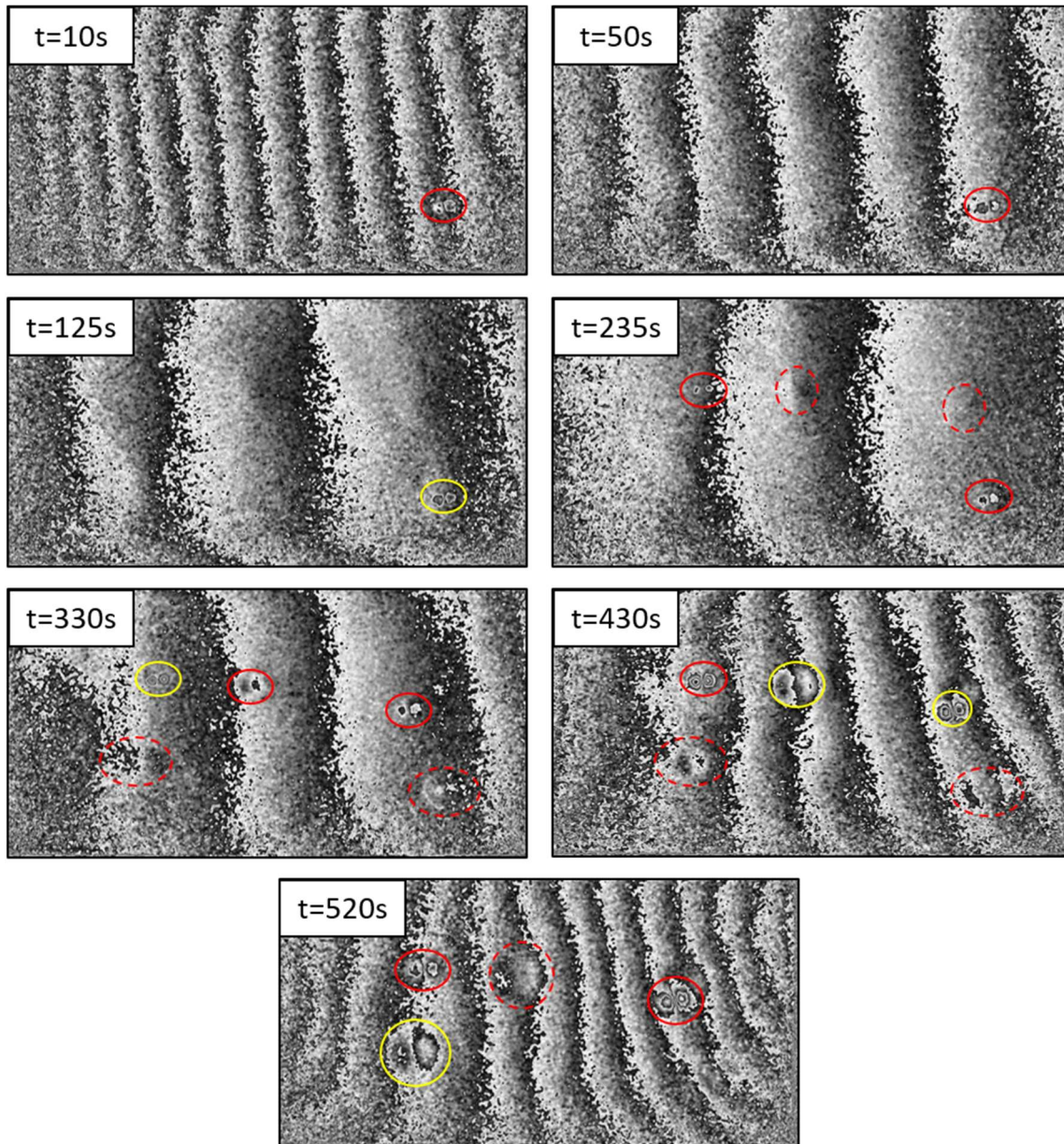


Abbildung 6.3: Shearografische Messung des Verformungszustandes einer ca. 20 mm dicken Kunststoffplatte zu verschiedenen Zeiten t nach dem Beginn einer kontinuierlichen, vorderflächigen Wärmebelastung; die Platte enthält fünf künstliche Fehlstellen unterschiedlicher Größe und Tiefe (nicht weiter quantifiziert). Die globale Verformung ist zu Beginn sehr hoch, bis sich eine gewisse Wärmeableitung ins Bauteilinnere einstellt. Ab ca. 330 Sekunden steigt die globale Streifenordnung wieder, vermutlich da die Wärmefront die Plattenrückseite erreicht hat und sich aufstaut. Die Indikatoren für die künstlichen Fehlstellen ergeben sich nach unterschiedlichen Zeiten, dann mit steigender und wieder abfallender Streifenordnung. Zudem nimmt ihre laterale Größe kontinuierlich zu. Verformungsanomalien mit geringem Fehlstellenkontrast sind rot gestrichelt, Anomalien mit mäßigem Kontrast rot umkreist. Anomalien mit dem höchsten Kontrast in Anbetracht der vermuteten, wahren lateralen Fehlstellengröße sind gelb umkreist.

¹¹³ Beispiel: Wärmeausdehnungskoeffizient von Kunststoff 4-mal höher, volumenspezifischen Wärmekapazität gleich und Wärmeleitfähigkeit 1250-mal geringer als von Aluminium $\rightarrow 4 \cdot 1 \cdot 1250 = 5000$.

6.1.c. Detektierbare Fehlstellendimension und -position

Eine immer wiederkehrende Frage zur Einsatztauglichkeit der shearografischen Prüfung für spezielle Messaufgaben ist die nach der kleinsten noch detektierbaren Fehlstelle. Die Beantwortung setzt die Einarbeitung in einen sehr umfangreichen Parameterraum mit komplexen Abhängigkeiten voraus. Oftmals wird daher zunächst mit „*das muss man ausprobieren*“ darauf geantwortet. An dieser Stelle wird die Pauschal-Antwort näher quantifiziert. Dazu wird eine praxisorientierte Diskussion mit pragmatischen Vereinfachungen geführt.

Definition der Fehlstelle

Zunächst einmal muss beachtet werden, dass man als Fehlstelle bei der shearografischen Prüfung vielmehr den unerwünschten Steifigkeitsunterschied versteht, der durch einen Materialfehler verursacht wird. Diese Steifigkeitsanomalie macht sich in einem Einflussbereich bemerkbar, dessen Größe stark material- und strukturabhängig ist. Zur Vereinfachung wird dieser Bereich hier als sprunghafte Reduktion der Steifigkeit auf einen Wert 0 verstanden. Dabei liegt er an einem Messobjekt mit sonst homogener Steifigkeit vor. Dieser Einflussbereich wird hier vereinfacht als „Fehlstelle“ bezeichnet. Ein kugelförmiger Lufteinschluss in einem Aluminiumbarren erfüllt beispielsweise diese Kriterien, ist als Fehlstelle aber eher die Ausnahme bei der shearografischen Prüfung. Typischer sind halbkugelförmige Fehlstellen, wie beispielsweise bei einem Schlagschaden (Impact) in Sandwichbauteilen mit Schaum- oder Wabenkern, bzw. ellipsenförmige Luftspalte bei einem Schlagschaden in Laminaten ([24] Kapitel 5.4). Relevant ist nahezu ausschließlich die Tiefe unterhalb der Oberfläche, ab welcher der Schaden mit seiner maximalen lateralen Größe beginnt. Vereinfacht kann diese Fehlstellengeometrie als luftgefüllter Zylinder angenommen werden, wobei der Zylinderdurchmesser und die -tiefe entscheidend und die Zylinderhöhe irrelevant ist (vgl. Abbildung 6.4 links). Shearografische Kalibriergeräte weisen eine solche geometrische Anomalie auf und repräsentieren damit die einfachste Form der künstlichen Fehlstelle bei der shearografischen Prüfung, s. ASTM¹¹⁴ E2581-14 [16]. Kugelförmige Fehlstellen werden hier zur Vereinfachung auch mittels Zylindergeometrie beschrieben. Dabei wird die Tiefe des Kugelmittelpunkts als die Tiefe des Zylinders angenommen, an der die Fehlstelle mit ihrer maximalen lateralen Größe in Erscheinung tritt. (In der Realität werden kugelförmige Fehlstellen stärker bzw. früher als die hier definierten zylindrischen Fehlstellen auf eine Belastung reagieren, s. Kapitel 6.1.a und 6.1.b.)

Maximale Fehlstellentiefe

Für zylindrische Fehlstellen besagt eine durch empirische Erfahrungswerte begründete Daumenregel, dass diese nur detektierbar¹¹⁵ sind, wenn ihr Durchmesser mindestens gleich ihrer Tiefe ist [64]. Abbildung 6.4 links verbildlicht diesen Sachverhalt. Dabei ist die maximale Tiefe oftmals durch die Leistung der Anregungseinheiten und die daran gekoppelten umsetzbaren Anregungsverfahren begrenzt, s. Kapitel 6.2. Nach der Erfahrung des Autors wird hier ein Fehlstellen-Tiefengrenzwert¹¹⁵ von ca. 30 mm definiert. Darüber hinaus ist die Erfassung tieferliegender Fehlstellen für Messaufgaben typisch, die mit Ultraschall- (UT¹¹⁶) oder Röntgenverfahren (RT¹¹⁶) besser gelöst werden können (s. auch Kapitel 1.3).

¹¹⁴ American Society for Testing and Materials.

¹¹⁵ Mit periodischer Belastung sind auch tieferliegende Fehlstellen detektierbar, s. Kapitel 6.2.c.

¹¹⁶ Abkürzung nach [27].

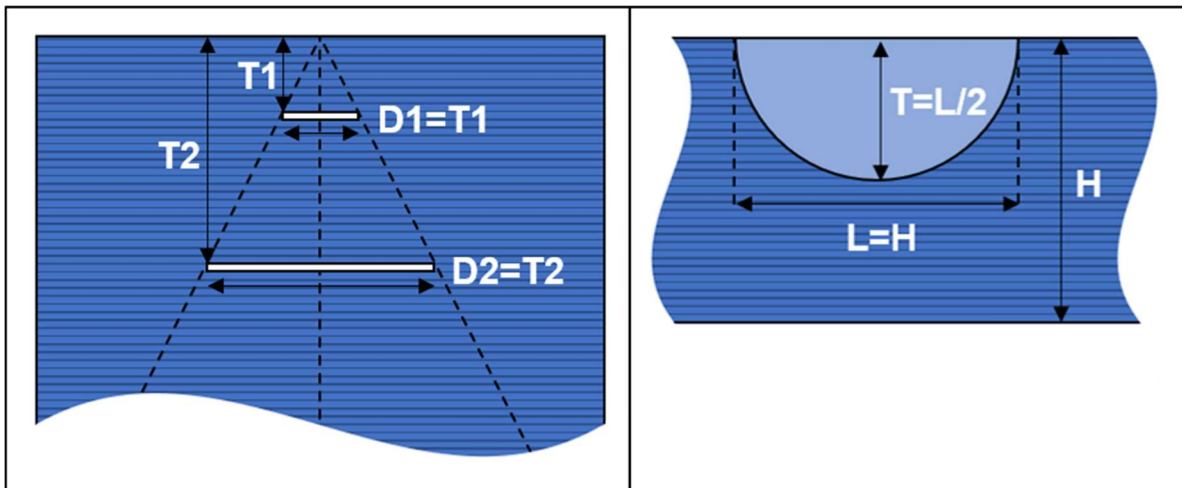


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der Grenzbedingungen für die Detektion von Fehlstellen (links) bzw. Rissen (rechts); der Durchmesser D bzw. das lateral kleinste Maß einer Fehlstelle muss mindestens gleich ihrer Tiefe T unterhalb der Bauteiloberfläche sein, ansonsten ist sie shearografisch nicht ohne Weiteres detektierbar. Für typische halbkreisförmige Oberflächenrisse muss die Risttiefe T mindestens der halben Messobjekthöhe H entsprechen. Die Risslänge L entspricht dabei der Messobjekthöhe.

Minimale Risttiefe bezogen auf die Messobjekthöhe

Für gerichtete Fehlstellen, hier lateral mit einer elliptischen statt einer kreisförmigen Fläche angenommen, gilt entsprechend, dass die Länge ihrer kleinen Halbachse mindestens gleich ihrer Tiefe sein muss. Weiterführend wird die laterale Form nicht-aufklaffender Risse als Ellipse mit einer Länge der kleinen Hauptachse von 0 angenommen. Nach der Daumenregel ergibt sich somit, dass sie lediglich detektierbar sind, wenn sie an der Oberfläche liegen. Oftmals sind Risse durchgängig, ansonsten typischerweise halbkreisförmig ([53] Kapitel 4.2.3), wie schematisch in Abbildung 6.4 rechts gezeigt. Eine maximale Fehlstellen-Sensitivität wird erreicht, indem der Shearbetrag gleich mit der Hälfte des Fehlstellendurchmessers gesetzt wird, s. auch Kapitel 2.6.a. Dies wird bereits aus der schematischen Darstellung der Wellenfronten in Abbildung 2.18 auf S. 36 ersichtlich. Größere Shearbeträge führen lediglich zu einer Verzerrung des shearografischen Fehlstellenindikators, wie in Abbildung 4.3¹¹⁷ auf S. 98 erkennbar. Für die beschriebene Geometrie von Rissen kann diese Einstellung für einen Shear orthogonal zum Rissverlauf¹¹⁸ nicht vorgenommen werden. Die Messversuche in Kapitel 7.3.c und 7.3.d verdeutlichen, dass eine spezielle Auswertung des Fehlstellenindikators erforderlich ist. Die Höhe des Shearbetrags beeinflusst bei einem Riss die Messsensitivität für die Verformung des umliegenden Bereichs. Durch diese wird ein Rückschluss auf den Riss erst möglich. Dabei sind die Risslänge und -tiefe ausschlaggebend dafür, wie stark der umliegende Bereich geschwächt ist und sich dort eine Verformungsanomalie ausbildet. Die Risslänge und -tiefe stehen ferner in Abhängigkeit zur Messobjekthöhe. Seitens des Autors wird schätzungsweise eine Risttiefe von mindestens der halben Messobjekthöhe als shearografisch detektierbar¹¹⁹ angenommen. Das heißt nach der halbkreisförmigen Rissgeometrie (Abbildung 6.4 rechts) entspricht die kleinste detektierbare Risslänge der Messobjekthöhe.

¹¹⁷ Gut erkennbar für Fehlstelle „B“.

¹¹⁸ Voraussetzung für einen hohen Fehlstellenkontrast bei der Detektion von gerichteten Fehlstellen, s. Kapitel 4.3.b.

¹¹⁹ Stark vereinfachte Betrachtung; abhängig vom Werkstoff und der Anregungsmechanik, s. Kapitel 6.2; teilweise sind auch geringere Risttiefen aufspürbar.

Minimaler Fehlstellendurchmesser und minimale Risslänge

Eine weitere Grenze bzgl. des kleinsten detektierbaren Fehlstellendurchmessers resultiert aus der shearografischen Messtechnik selbst. Für das entwickelte MZ Messgerät ergibt sich in der Standardausführung mit 25 mm Objektivbrennweite eine laterale Messauflösung von ca. 0,14 mm/Pixel, s. Kapitel 2.6.a und 5.1.c. Darüber hinaus muss eine Fehlstelle schätzungsweise mindestens 3 Matrixelemente (im Durchmesser) einnehmen, um noch aufspürbar zu sein ([64] Teil 3). Mit dem 6x3 Filterkern beim SPS werden zur Tiefpassfilterung¹²⁰ in der Breite 6 Pixel miteinander verrechnet, s. Kapitel 2.5.c. Aus diesen Bedingungen lässt sich die Daumenregel nach Gleichung 6.2 ableiten ([64] Teil 3).

$$b_F = a_l b_m b_K \quad (6.2.)$$

Mit

b_F = (Kleinste) detektierbare Fehlstellenbreite

a_l = Laterale Messauflösung

b_m = Mindestaufspürbreite

b_K = Filterkernbreite

Für die kleinste detektierbare Fehlstellenbreite mit dem MZ Messgerät unter SPS Erfassung ergibt sich demnach ein Wert von 2,5 mm, was nach der Erfahrung des Autors experimentell bestätigt werden kann. Die laterale Fehlstellenhöhe halbiert sich mit der Filterkernhöhe. Beim SPS wird jedoch empfohlen, den höheren Wert als kleinsten detektierbaren Fehlstellendurchmesser anzunehmen. Für typische TPS Messgeräte werden Werte von bis zu 1 mm angegeben ([64] Teil 3), was auf die geringere Auflösung beim SPS zurückzuführen ist, s. auch Kapitel 3.3.a. Für die kleinste detektierbare Risslänge wird derselbe Wert von 2,5 mm angenommen. Nach der Betrachtung weiter oben ist dieser für eine Messobjekthöhe von maximal 2,5 mm detektierbar. Die maximale Größe von Fehlstellen ist unbegrenzt. Sofern sie die Messfläche übersteigt, wird eine rasternde Auswertung zur Dimensionierung der Fehlstelle vorgenommen ([65] Teil 2.4¹²¹).

Fehlstellen und Risse im Randbereich des Messobjektes

Abschließend sei, neben der Fehlstellentiefe (s. oben), der Einfluss der lateralen Fehlstellenposition diskutiert. Hier sind lediglich die Randbereiche des Messobjektes von Interesse, an denen shearografische Auswertungen grundsätzlich schwierig sind. Zum einen treten dort die größten Messabweichungen auf, s. Kapitel 2.6.c. Zum anderen ergeben sich Inhomogenitätseinflüsse bei der Anregung, s. Kapitel 6.2. Darüber hinaus hat die Shearografie den Nachteil, dass die Messfläche sich in Shearrichtung um den doppelten Shearbetrag reduziert, s. Kapitel 2.4.b und 4.1.a Abbildung 4.2. Für Fehlstellen im Randbereich ergeben sich lateral begrenzte Fehlstellenindikatoren, wie in Abbildung 6.5 angedeutet. Die Grenzbetrachtung zeigt einen Fehlstellendurchmesser entsprechend der Messobjektbreite und einen horizontalen Shearbetrag entsprechend der Hälfte des Fehlstellendurchmessers, um die maximale Messsensitivität zu erreichen¹²². Der mittlere Teil des Fehlstellenindikators ist weiterhin zu sehen, die

¹²⁰ Für weitere darauffolgende, größere Filterkerne ist die folgende Betrachtung analog durchzuführen. Dabei ist der größte Filterkern entscheidend.

¹²¹ Blitzschlag in Windkraftanlagen-Rotorblatt.

¹²² Details s. „Minimale Risstiefe bezogen auf die Messobjekthöhe“ oben.

Auswertung ist jedoch problematisch und die maximale Streifenordnung ist herabgesetzt. Vergleichbare Problematiken treten zudem für nahe beieinander liegende Fehlstellen auf, s. auch Kapitel 4.1.a Abbildung 4.2.

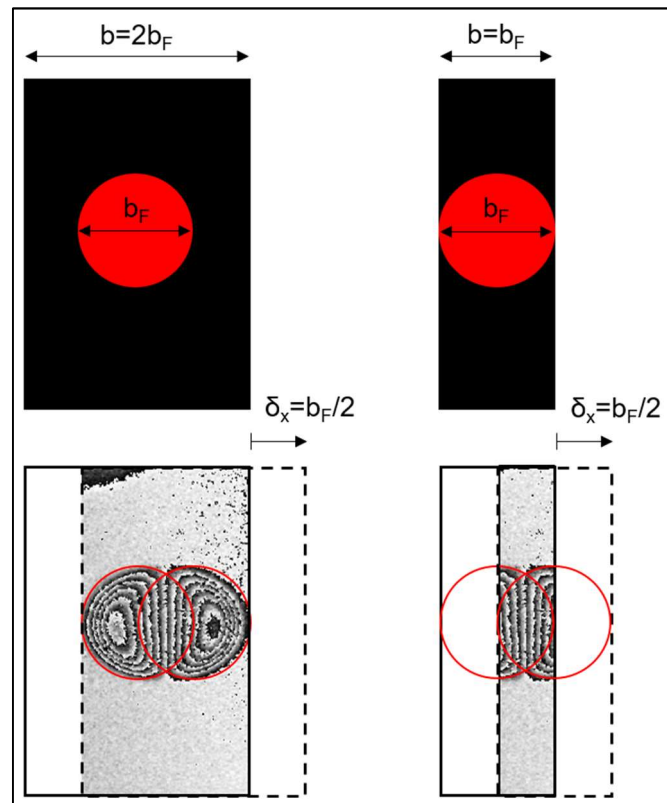


Abbildung 6.5: Schematische Betrachtung zum kleinsten Fehlstellenabstand zum Messobjekttrand; die obere Zeile zeigt die Messobjektbreite sowie die Fehlstellenbreite und -position, die untere Zeile das entstehende Shearogramm bei einem Shearbetrag entsprechend der Hälfte des Fehlstellendurchmessers (für maximale Messsensitivität). Ist die Fehlstelle um den Shearbetrag vom Messobjekttrand entfernt, ergibt sich ein vollständiger Fehlstellenindikator (links). Liegt die Fehlstelle hingegen am Messobjekttrand, werden Teile des Indikators abgeschnitten, was die weitere Auswertung erschwert.

Eine pragmatische Lösung liegt darin, den Shearbetrag zu reduzieren, was jedoch ebenfalls die Messsensitivität herabsetzt und den Fehlstellenkontrast senken kann. Sofern keine gerichtete Fehlstelle vorliegt, ist die Einstellung eines orthogonalen Shears für stabförmige Messobjekte empfehlenswert, s. Kapitel 4.3.b. Schlussendlich wird nur Abhilfe über eine holografische Messung geschaffen, die keine Messflächenverluste mit sich bringt.

Bei Rissen ergibt sich, wie oben¹²² diskutiert, in jedem Fall ein speziell auszuwertender Fehlstellenindikator. Für Risse, die parallel zum Messobjekttrand verlaufen, ist ein Mindestabstand von der halben Risslänge optimal. Risse orthogonal dazu sind auch dann detektierbar, wenn sie bis zum Rand reichen. Die ideale Shearrichtung, orthogonal zum Riss (s. auch Kapitel 4.3.b), entspricht dann der Richtung des Randverlaufs und ist damit unproblematisch. Gleiches gilt für zwei sich orthogonal überlagernde Risse, die je nach Shearrichtung separat detektiert werden.

Zusammenfassung der Grenzwerte

Tabelle 6.2 beinhaltet die in diesem Kapitel 6.1.c ermittelten Grenzwerte der detektierbaren Fehlstellendimension und -position.

6. Fehlstellen- und Anregungsmechanik

Tabelle 6.2: Grenzwerte für die Dimension und Position von Fehlstellen für eine typische shearografische Detektion.

Größe	Minimalwert	Maximalwert
Fehlstellendurchmesser bzw. kleinster Wert für nicht kreisförmige Flächen	1 mm (TPS) bei max. Tiefe von 1 mm 2,5 mm (SPS) bei max. Tiefe von 2,5 mm	Unbegrenzt, ggf. rasternde Messungen erforderlich
Fehlstellentiefe bei nicht periodischer Anregung (s. Kapitel 6.2.c unten)	Oberflächlich	30 mm
Risslänge für halbkreisförmige Oberflächenrisse	1 mm (TPS) bei max. Messobjekthöhe von 1 mm 2,5 mm (SPS) bei max. Messobjekthöhe von 2,5 mm	Unbegrenzt
Risstiefe für halbkreisförmige Oberflächenrisse	0,5 mm (TPS) bei max. Messobjekthöhe von 1 mm 1,25 mm (SPS) bei max. Messobjekthöhe von 2,5 mm	Durchgehend
Fehlstellen- und Rissabstand zum Messobjektrand oder zu anderen Fehlstellen	Idealerweise gleich dem halben Fehlstellendurchmesser bzw. der halben Risslänge; für orthogonal zum Rand verlaufende oder sich orthogonal kreuzende Risse irrelevant	Unbegrenzt

6.2. Anregungsmechanik

Entscheidend für die Wahl der messaufgabenspezifischen Anregung ist die generelle Anregungsart, die spezielle Anregungseinheit und das Anregungsverfahren. Diese Thematik, sowie im Rahmen der Arbeit entwickelte z. T. neue Anregungseinheiten, werden im Folgenden vorgestellt.

6.2.a. Anregungsarten und Anregungseinheiten

Zur Messobjektbelastung werden bei der optisch-interferometrischen Prüfung unterschiedliche Anregungsarten eingesetzt. Die gängigsten Anregungsarten und -einheiten sind in DIN 54180-2 aufgeführt [15]. In Tabelle 6.3 sind diese und weitere genannt, welche derzeit nur für spezielle Messaufgaben in der angewandten Forschung Verwendung finden (s. auch Kapitel 6.2.b). Die Anregungsarten werden mithilfe von unterschiedlichen Anregungseinheiten umgesetzt. Durch die Einheiten werden unterschiedliche Verformungsanteile, -höhen und -dynamiken im Messobjekt hervorgerufen. Beispielsweise verursacht eine Wärmekammer eine globale, ggf. weniger starke und langsamere Messobjektverformung, während eine Vakuumhaube eine lokale, starke und schnellere Verformung verursacht. Die korrekte Wahl ist für den maximal erreichbaren Fehlstellenkontrast entscheidend (s. Kapitel 6.1). Die optische Interferometrie misst materialunabhängig, die notwendige Anregung für die Prüfung ist jedoch materialabhängig. Darüber hinaus besitzen alle Arten und Einheiten unterschiedliche Vor- und Nachteile bzgl. des Messvorgangs, beispielsweise eine berührende oder eine berührungslose Anregung. Die näheren Bedingungen werden nicht weiter aufgeschlüsselt. Weiterführend sei auf ([24] Kapitel 3.3) und ([35] S. 159) verwiesen.

Klassischerweise werden Anregungsarten bei der shearografischen Prüfung nach dem Zeitkriterium „statisch“ und „dynamisch“ unterschieden. Im Rahmen der in dieser Arbeit erfolgten SPS Weiterentwicklungen ist dieses Kriterium jedoch nahezu irrelevant geworden. Zudem ist bei der angestrebten automatisierten Datenerfassung und -evaluation das Kriterium der Messzeit ebenfalls vernachlässigbar. In dem Falle richtet sich die Messzeit fast ausschließlich¹²³ nach der Anregungsdauer. Die Anregungsdauer ist abhängig von der Anregungseinheit (und dem Anregungsverfahren, s. Kapitel 6.2.c). Die Anregungseinheit wird so betrieben, dass ein Fehlstellenkontrast bzw. eine Fehlstellen-Auffindwahrscheinlichkeit (POD¹²⁴) nach den Mindestforderungen der Messaufgabe erreicht wird. In der Automationspraxis muss dies innerhalb der Prozesstaktzeit erfolgen, die den gesamten Produktionsablauf bestimmt. Andernfalls kommt das Messverfahren zur Lösung der Messaufgabe nicht in Frage.

Tabelle 6.3 zeigt die Anregungsarten bzw. Einheiten nach ihrem Prinzip der Energieübertragung auf, wodurch das Messobjekt mechanisch oder thermisch belastet wird. Ein übergeordnetes Einteilungskriterium ist die Notwendigkeit des Kontakts der Anregungseinheit mit dem Messobjekt, berührend oder berührungslos. Dies hat je nach Messaufgabe einen entscheidenden Einfluss auf die Flexibilität des Messvorgangs. Die Einheiten werden nach den vier Kriterien *Anregungshomogenität*, *Automationsaufwand*, *Handhabung* der Messung und *Reproduzierbarkeit* bewertet, welche für die Automation der shearografischen Prüfung eine hohe Bedeutung haben.

Alle genannten Anregungseinheiten, bis auf diejenigen mit angefügter Quellenangabe, wurden im Rahmen der Arbeit eingesetzt. Für die Einheiten *Mensch* und *Roboter* ist eine berührende Verformung, ggf. auch durch einen Montagevorgang mit Vorspannung, gemeint. Diese und u. a. auch die Einheiten *Luftpistole* und *Wirbelrohr* werden bei den Entwicklungen in Kapitel 6.2.b näher vorgestellt. Die Einheiten mit optischer Energieübertragung sind sich, bis auf die Laseranregung, sehr ähnlich. Die Hauptkriterien für ihren Einsatz sind ihre Dynamik (s. Kapitel 6.2.c) sowie das wellenlängenspezifische Absorptionsverhalten der zu prüfenden Oberfläche. Die Anregung mittels Laser stellt ein Spezialgebiet für besondere Anwendungsfälle dar. Die hohe Leistung und Bündelung eines Anregungslasers wird ausgenutzt, um beispielsweise Metalle punktuell zu erhitzen und die Ausbreitung der thermischen Welle bzgl. der Materialintaktheit zu bewerten [128]. Nachteilig hierbei sind die hohen Laserkosten und die aufwändige und ebenfalls kostenintensive Gewährleistung der Lasersicherheit.

Alle Einheiten, welche in Summe¹²⁵ mehr als einen Pluspunkt in der Bewertung erzielen, sind in Fettdruck dargestellt. Hierbei handelt es sich um die typischen Anregungseinheiten bei der shearografischen Prüfung. Diese haben sich seither durch die höchste Einsatztauglichkeit für viele Materialien und Fehlstellenarten bewährt (s. Kapitel 7.1). Der LED-Strahler ist die moderne Alternative zum Halogenstrahler und zum Quarzstrahler. Seine Anregungsleistung ist zwar geringer bei höheren Anschaffungskosten, seine Signalverläufe sind jedoch hochdynamisch schaltbar ([24] S. 90 f.).

¹²³ Beachte auch Kapitel 6.2.c unten.

¹²⁴ Probability Of Detection (dt.: Fehlstellen-Auffindwahrscheinlichkeit).

¹²⁵ - gleichbedeutend mit -1; + gleichbedeutend mit +1.

6. Fehlstellen- und Anregungsmechanik

Tabelle 6.3: Einheiten nach Anregungsart für die Messobjektbelastung bei der optischen Interferometrie; die Einheiten werden nach 4 Kriterien bzgl. einer automatisierten Prüfung bewertet. Fettgedruckt sind die Einheiten mit den besten Eigenschaften.

Art	Einheit	Belastung	Homogenität*	Automatization**	Handhabung***	Reproduzierbarkeit****
Berührend						
Mechanisch	Mensch	Mechanisch	-	-	-	-
	Roboter		-	+	-	0
	Piezoelement, E-Motor		-	+	+	+
	Piezoscwinger		-	+	-	0
	Zugprüfmaschine		0	-	-	0
Pneumatisch	Druckkammer^I	Mechanisch	+	-	+	+
	Vakuumhaube		0	0	+	+
Wärmestrom	Wärmekammer	Thermisch	+	-	0	+
Berührungslos						
Pneumatisch	Luftpistole	Mechanisch	-	0	0	0
Wärmestrom	Heißluftfön	Thermisch	0	0	-	-
	Wirbelrohr		0	0	-	0
Akustisch	Lautsprecher	Mechanisch	+	0	-	0
Elektromagnetisch	Induktionsspule	Thermisch	-	0	0	-
	Mikrowellensender		0	-	+	+
Optisch	Halogenstrahler		+	+	+	0
	Quarzstrahler		+	+	+	0
	LED-Strahler [24] S. 90 f.		+	0	+	+
	Blitzlampe		+	+	0	-
	Laser [128]		-	-	-	-

+ gut, 0 neutral, - schlecht

^I Einlegen des Messobjektes in oder Verwendung des Messobjektes als Druckkammer (z. B. Innenbefüllung von Rohren usw.)

* dadurch Zeitvorteil aufgrund der erreichbaren Messfläche

** Einrichtungsaufwand der Automationslösung inkl. Teilehandhabung, Umweltbedingungen und Kosten

*** Einrichtungsaufwand für die Datenerfassung und -evaluation mit hoher Fehlstellen-Auffindwahrscheinlichkeit

**** Einstellbarkeit der Belastungshöhe und zeitlicher Synchronisation mit der Datenerfassung

6.2.b. Entwickelte Anregungseinheiten

Im Folgenden werden Anregungseinheiten vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt wurden, die für Shearografie erstmalig eingesetzt werden oder deren Einsatz durch die Vorteile von SPS gewinnbringender als bisher ist. Abschließend werden die technischen Daten der relevanten Einheiten aufgeführt.

Händisch berührende Anregung

Als Anregungseinheit „Mensch“ (s. Tabelle 6.3 oben) wird beispielsweise eine händisch berührende Anregung durch einen Prüfer verstanden. Die Wahl des Anregungsortes und ggf. die Verwendung eines zusätzlichen Werkzeugs erfolgen dabei nach freiem Ermessen. Abbildung 6.6 zeigt ein Polsterelement,

mit dem eine relativ homogene und sensible Belastung erfolgt, ohne dass eine störende Wärmeübertragung durch die Hand des Prüfers auf das Messobjekt eingeleitet wird.

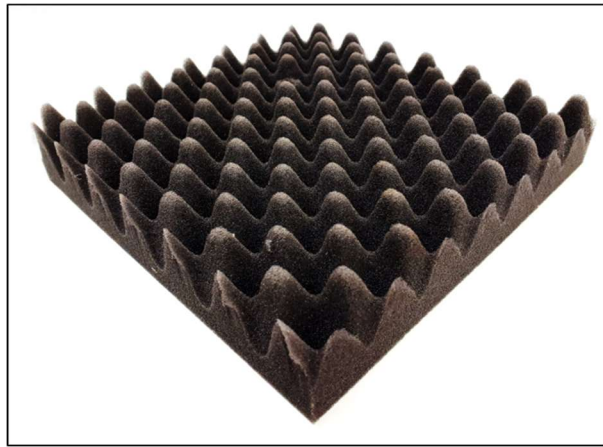


Abbildung 6.6: 200 mm x 200 mm Schaumstoff Polsterelement, welches händisch geführt zur flexiblen, mechanischen Messobjektanregung genutzt wird; durch den Schaumstoff ergibt sich eine relativ sensible, örtlich homogene Belastung ohne punktuelle Wärmeübertragung wie bei einer berührenden Anregung mit der Hand.

Die Belastungshöhe und -dynamik wird dabei unter Beobachtung des Echtzeit-Shearogramms variiert. Diese Art der Anregung ist durch das notwendige Verständnis des Prüfers bei den verschiedenen Variationen sehr schlecht automatisierbar, schlecht quantifizierbar und fast nicht reproduzierbar. Dahingegen ergibt sich eine unerreichbare Flexibilität bei der Erst-Prüfung von großen Messobjekten mit unbekannten Fehlstellen, wie beispielsweise für Prototypen aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrt. Auf diese Weise werden fehlstellenbehaftete Bereiche z. T. sehr schnell ausfindig gemacht, wodurch sich eine enorme Zeitersparnis für umfangreichere, quantifizierende Folge-Prüfungen ergibt. Diese „Anregungseinheit“ wird an dieser Stelle vorgestellt, da sich durch SPS erstmals eine enorme Steigerung der Robustheit ergibt (s. Kapitel 2.6.d). Mittels $\Phi_{(n)} - \Phi_{(n-1)}$ SPS Auswertung zeigen sich für den Prüfer im Bruchteil einer Sekunde Shearogramme. Diese deuten unmittelbar auf den lokalen Strukturzustand hin und stabilisieren sich in jeder Bildaufnahme wieder neu. Der Vorgang ähnelt dem einfachen Klopfest mit einer Münze, vgl. [129]. Dabei werden relative Schallfrequenz- oder -amplitudenunterschiede hinsichtlich vorhandener Hohlräume unter einer Oberfläche durch „Hören“ bewertet. Im Falle der Shearografie erfolgt die Auswertung jedoch viel genauer, mit lateraler Fehlstelleninformation und digital erfassbar. Die Erst-Prüfung bei dem Versuch in Kapitel 7.3.b erfolgte auf die hier beschriebene Art und Weise.

Roboter Greifer

Als Anregungseinheit „Roboter“ (s. Tabelle 6.3 oben) wird beispielsweise eine berührende Anregung durch einen Roboter Greifer verstanden. Sie gleicht der händisch berührenden Anregung durch einen Prüfer, jedoch mit sehr guter Automationsmöglichkeit, einer besseren Reproduzierbarkeit, aber auch mit geringerer Flexibilität. Die Kraftsensitivität typischer Greifer ist für die shearografische Prüfung oftmals unzureichend. Die „Anregungseinheit“ wird an dieser Stelle vorgestellt, da sich durch SPS erstmals eine enorme Steigerung der Robustheit ergibt. Zudem handelt es sich um einen Anregungsvorgang,

welcher sich in einer Fließbandproduktion mit Roboter-Kommissionierung¹²⁶ sehr leicht implementieren lässt. Abbildung 6.7 zeigt die Messobjektbelastung mittels Robotergreifer beispielhaft. Ebenso interessant ist die Messobjektanregung durch eine Vorspannung bei einer Roboter-Montage.

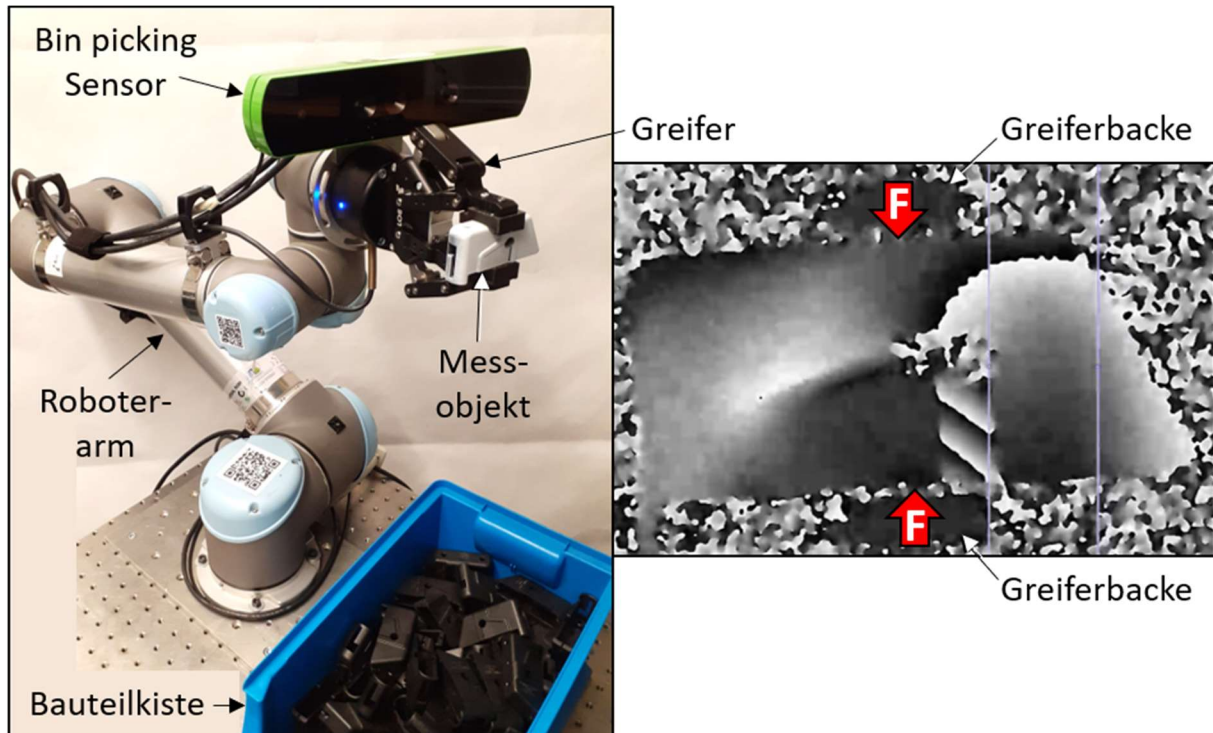


Abbildung 6.7: (Links) Roboter mit Greifer und Bin Picking Sensor zur Vereinzelung chaotisch angeordneter Bauteile aus einer Kiste; (rechts) Shearogramm des mittels Greifer mechanisch belasteten Messobjektes (s. rote Pfeile) zeigt beispielhafte Indikatoren für eine Prüfung.

Mikrozugprüfmaschine

Die sog. Mikrozugprüfmaschine (MZPM), s. Abbildung 6.8, wurde im Jahre 2010 im Technikum OGKB der Hochschule Trier entwickelt. Sie stellt eine spezielle Konstruktion einer Anregungseinheit „Zugprüfmaschine“ dar (s. Tabelle 6.3 oben). Zugprüfmaschinen zur Messobjektanregung sind bzgl. der Automation und Handhabung eher schlecht geeignet. Letzterer Nachteil ergibt sich durch die genaue Probeneinspannung, welche einen hohen Einfluss auf das Messergebnis hat. Hingegen weisen sie Vorteile wie die sensible Einstellung der Belastungshöhe auf, was bei der Konstruktion der MZPM schwerpunktmäßig verfolgt wurde. Die MZPM wird von daher oftmals als Anregungseinheit für das hochgenaue MFK eingesetzt, vgl. Kapitel 5.3, s. auch ([35] Kapitel 4.2.2). Auf einer Messfläche von 85 mm x 30 mm können Messobjekte mittels hochgenau ansteuerbarem Piezostapel mit bis zu 20 kN und mit einem maximalen Hub von 87 µm verformt werden. Die SPS $\sum(\Phi_{(n)} - \Phi_{(n-1)})$ Auswertung ermöglicht erstmals eine enorme Erhöhung des Tiefenmessbereichs (s. Kapitel 2.6.d). Dies ist mit TPS aufgrund von Verformungsdekorrelation, verursacht durch die starke ip Messobjektverformung, nicht ohne Weiteres möglich.

¹²⁶ Siehe *Pick and Place* oder *Bin Picking*.

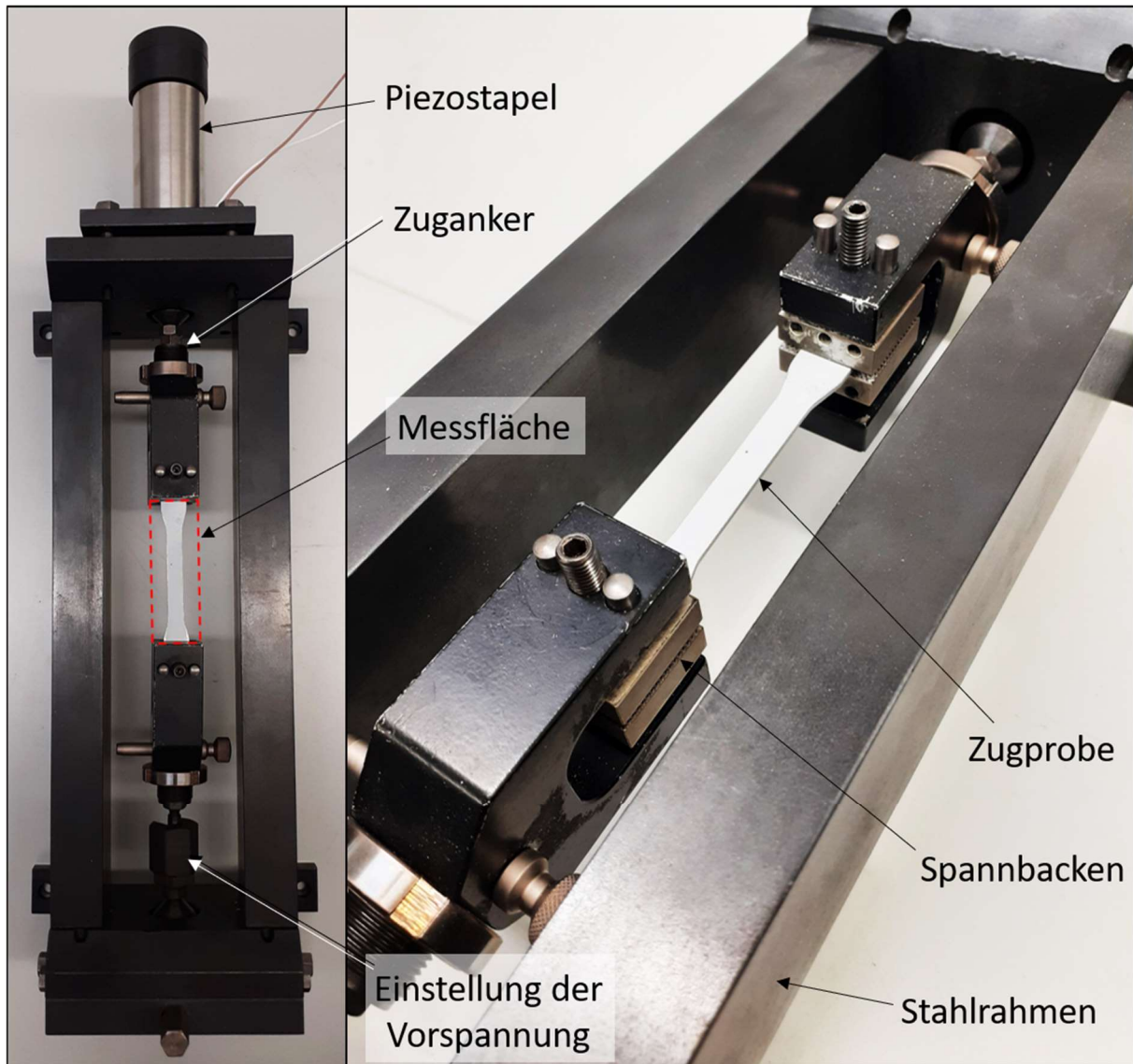


Abbildung 6.8: Im Technikum OGKB der Hochschule Trier entwickelte Mikrozugprüfmaschine zur hochgenauen Verformung von Messobjekten mittels Piezostapel; maximaler Hub $87\ \mu\text{m}$, maximale Kraft $20\ \text{kN}$.

Unterdruckkammer

Als Anregungseinheit der Kategorie „Druckkammer“ (s. Tabelle 6.3 oben) wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Unterdruckkammer entwickelt, s. Abbildung 6.9. Bei Unterdruck ist die Anregungshöhe, im Gegensatz zum Überdruck, auf $-1\ \text{bar}$ begrenzt. Unterdruck bietet jedoch eine höhere Anwendersicherheit im Falle des Systemversagens, zudem ergibt sich eine selbstabdichtende Wirkung. Darüber hinaus ist das erreichbare Belastungsniveau für typische shearografische Anwendungsfälle geeignet und die negative Druckbelastung vorteilhaft bzgl. spezieller Fehlstellenmechaniken (s. Kapitel 6.1). Die Beladung der Unterdruckkammer kann zwar mittels Roboter erfolgen, erhöht jedoch entsprechend die Dauer eines Messvorgangs. Das manuell bediente Einstellventil wird zukünftig durch ein digital steuerbares ersetzt. Konstruktiv sind aktuell Unterdrücke bis $-0,25\ \text{bar}$ zulässig. Das Fenster der Kammer ist winklig angestellt, sodass bei der oop Messung von oben keine direkte Störreflexion der Laserbeleuchtung in den Sensor entsteht. Die Kammer fasst Messobjekte mit einem Volumen von $320\ \text{mm} \times 320\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$. Die shearografische Prüfung von Reifen oder auch Helikopter-Rotorblättern ist eine gängige Praxis ([130], [10] S. 568 f.). Dabei kommen z. T. Kammern mit dem Volumen eines Einfamilienhauses zum Einsatz.

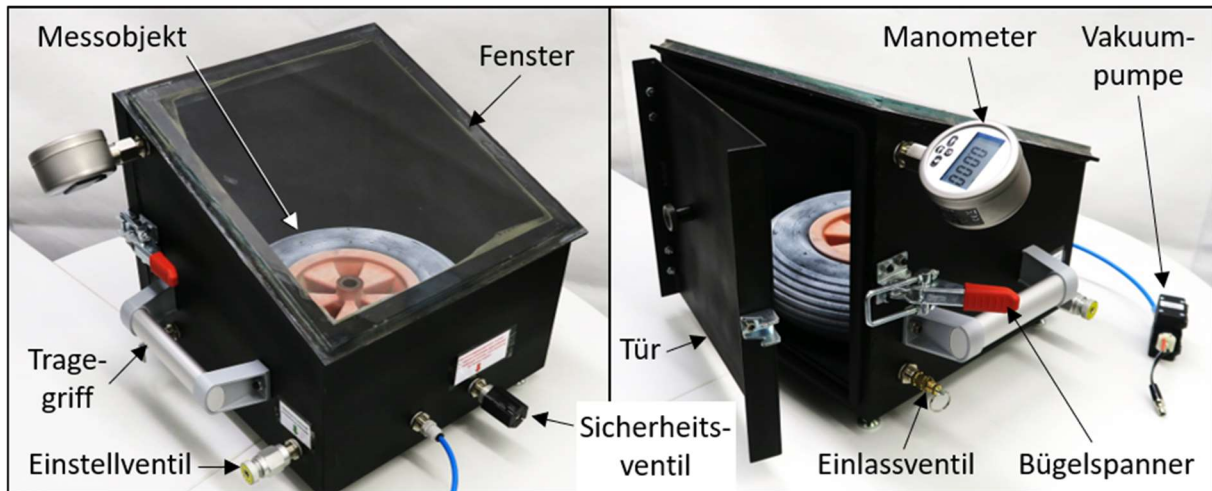


Abbildung 6.9: Im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Unterdruckkammer zur mechanischen Verformung von Messobjekten mit einer Größe von bis zu 320 mm x 320 mm x 200 mm.

Vakuumhaube

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Vakuumhaube entwickelt (s. auch Tabelle 6.3), welche Abbildung 6.10 zeigt.

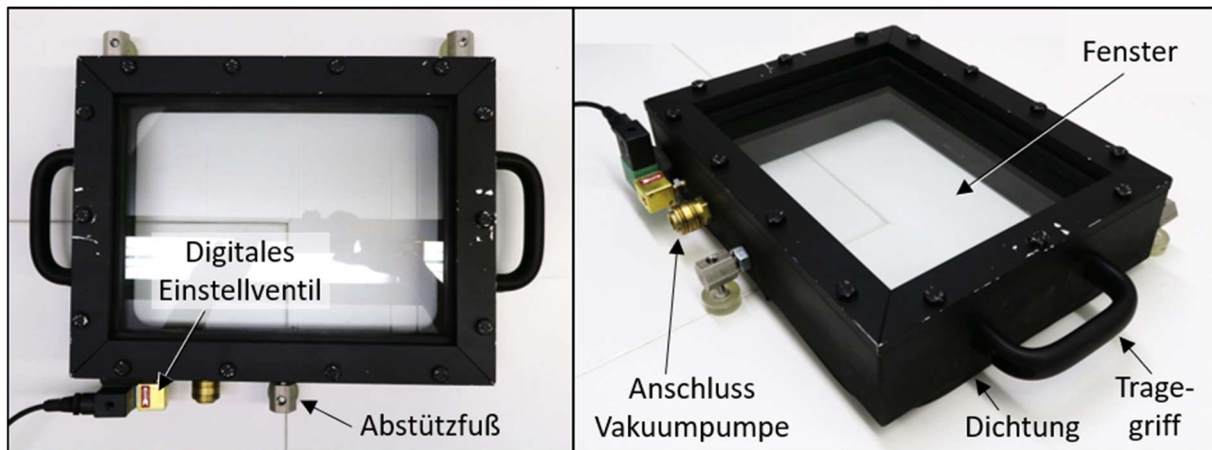


Abbildung 6.10: Im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vakuumhaube zur mechanischen Verformung großflächiger Messobjekte; die Stauchung der ca. 10 mm nach unten herausragenden Dichtung beim Ziehen von Unterdruck kann durch Einstellung der drei Abstützfüße begrenzt werden. Auf diese Weise wird der Hub des Fensters auf das Messobjekt zu verhindert, um optische Einflüsse auf die Messung zu reduzieren. Verschiedene Dichtungen werden je nach Oberflächenrauheit und -unebenheit verwendet. Messfläche 300 mm x 200 mm, maximal zulässiger Unterdruck -1 bar.

Sie besitzt eine umlaufende Dichtung an der Unterseite und wird auf die Oberfläche von möglichst ebenen Messobjekten gelegt. Anschließend wird das Messgerät oberhalb positioniert und die Verformung beim Ziehen von Unterdruck durch das Fenster erfasst. Für die Unterdruckanregung ergeben sich die Vor- und Nachteile, wie bereits für die Unterdruckkammer oben beschrieben. Die selbstabdichtende Wirkung bietet zudem den Vorteil, dass die Haube problemlos ihr eigenes Gewicht trägt und so nahezu kraftlos auch über Kopf bedient werden kann. Aufgrund der Abstützung der angeregten Oberfläche am Rahmen der Haube ist die Verformung im Randbereich geringer und somit prinzipiell

dingt inhomogen. Die Vakuumhaube besitzt ein digital ansteuerbares Unterdruckventil und soll zukünftig mittels Roboter geführt werden. Konstruktiv sind Unterdrücke bis -1 bar zulässig. Die Haube bietet eine Messfläche von 300 mm x 200 mm. Die umlaufende Dichtung ist lediglich gesteckt und je nach Oberflächenrauheit und -unebenheit des Messobjektes austauschbar. Die drei Abstützfüße können eingestellt werden, um die Stauchung der Dichtung beim Ziehen von Unterdruck zu begrenzen. Dies ist notwendig, sobald das Messgerät an die Haube angebunden wird. Die Anbindung bietet praktische Vorteile für eine flexible, manuelle Bedienung als Messsystem. Ohne Abstützung bewegt sich das Messgerät durch den Haubenhub auf das Messobjekt zu, was zur Verformungsdekorrelation führt. Mittels $\sum(\Phi_{(n)} - \Phi_{(n-1)})$ SPS Auswertung wird dieser Störeinfluss stark reduziert (s. Kapitel 2.6.d). Die shearografische Prüfung von beispielsweise großen Messobjekten wie Windkraftanlagen-Rotorblättern oder der Rumpfhaut von Flugzeugen mittels Vakuumhaube ist eine gängige Praxis ([131], [10] S. 562 f.).

Luftpistole

Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmals eine Luftpistole als Anregungseinheit für die shearografische Prüfung verwendet (s. auch Tabelle 6.3). Durch den Luftstrom ergibt sich eine Druckbelastung des Messobjektes, s. Abbildung 6.11.

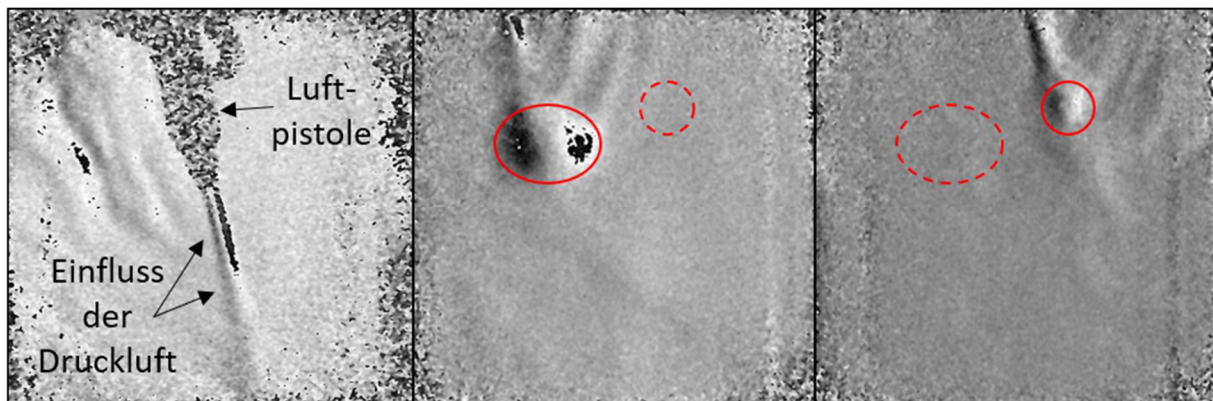


Abbildung 6.11: Links, Luftstrom aus einer Luftpistole zeigt im Shearogramm einen langgezogenen Phasensprung aufgrund der Luftdichteänderung; die Pistole wurde hier nicht auf, sondern orthogonal zur Messobjektoberfläche gehalten, um ausschließlich die Luft zu beeinflussen. Mittig, Fehlstellenindikator für eine rückseitige Plansenkung (bis zur 2 mm starken Aluminium Deckplatte) mit einem Durchmesser von 30 mm, rechts für 10 mm bei 3,5 bar Druckluftanregung von oben im Abstand von ca. 100 mm; Belichtungszeit 0,8 Millisekunden; Messzeit 0,2 Sekunden.

Im Gegensatz zur Druckkammer oder zur Vakuumhaube (s. oben) ist keine Handhabung oder Berührung des Objektes notwendig. Voraussetzung ist lediglich eine stabile Objektlagerung. Darüber hinaus verursacht die expandierende Druckluft eine leichte thermische Belastung, welche z. T. ebenfalls vorteilhaft für die Prüfung ist. Die Belastung ist stark inhomogen und die Höhe abhängig von dem Abstand zwischen Pistole und Messobjekt. Diese Art der Anregung ist der händisch berührenden Anregung (s. oben) sehr ähnlich. Der Anregungsvorgang ist mit den beschriebenen Vor- und Nachteilen verbunden und erst durch die schnelle und selbststabilisierende SPS Auswertung gewinnbringend umsetzbar. Ein besonderer Vorteil des Druckluftstroms ist, dass er die Luftdichte im Gegensatz zu Temperatureinflüssen nur verhältnismäßig geringfügig ändert (s. Kapitel 2.6.e). Störeinflüsse durch optische Weglängenänderungen im Shearogramm beschränken sich somit lediglich auf den Bereich unmittelbar vor der Luftpistole. Im Gegensatz zur händisch berührenden Anregung kann mittels Luftpistole daher auch direkt im Messbereich angeregt werden.

Endoskopische Anregung mittels Wirbelrohr

Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmals ein sog. Wirbelrohr als Anregungseinheit für die shearografische Prüfung verwendet (s. auch Tabelle 6.3 oben). Typischerweise wird es als Alternative zur Wasserkühlung für Gehäuse oder Werkzeuge im industriellen Umfeld eingesetzt. Durch strömungsdynamische Effekte wandelt es Eingangsdruckluft unmittelbar in einen warmen und einen kalten Ausgangsluftstrom um, s. Abbildung 6.12.

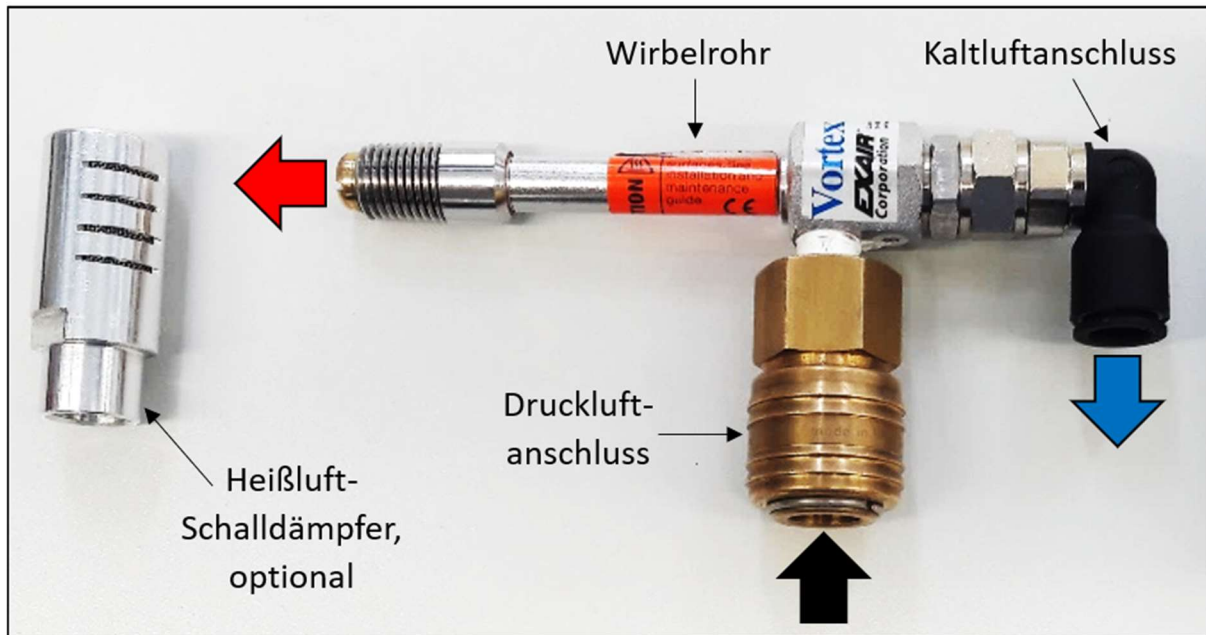


Abbildung 6.12: Wirbelrohr mit montiertem Druckluft- und Kaltluftanschluss; die Eingangsdruckluft (schwarzer Pfeil) wird im Inneren des Wirbelrohres in Rotation versetzt und in einen warmen (roter Pfeil) und einen kalten (blauer Pfeil) Ausgangsluftstrom mit einstellbarer Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit umgewandelt (s. auch [132]). Das Wirbelrohr wird als endoskopische Anregungseinheit am Interferoskop (Kapitel 5.2.b) verwendet.

Das Herzstück des Wirbelrohrs ist ein sog. Generator, der die Eingangsdruckluft in Rotation versetzt. Das Wirbelrohr besitzt keine bewegten Teile und ist damit wartungsfrei. Bezüglich weiterer Beschreibungen zur Funktion sei auf die Herstellerinformationen verwiesen [132]. Das Wirbelrohr wird speziell als endoskopische Anregungseinheit für das Interferoskop (IFK) verwendet, s. Kapitel 5.2.b. Alternativ wurde ein Konzept mit Heißluftfön und Rohrführung entwickelt, jedoch nicht weiter ausgearbeitet. Das Wirbelrohr bietet durch seine Kompaktheit eine sehr hohe Flexibilität im endoskopischen Umgang mit dem IFK und eine gute Möglichkeit der Anregungsenergiespeicherung in einem Druckluftkompressor für den mobilen Einsatz. Die kleinste Baugröße wird gewählt und weitere Einstellparameter der Anregung experimentell optimiert. Auf diese Weise ergibt sich ein Anregungsluftstrom mit einer Geschwindigkeit von ca. 3 Litern pro Sekunde und einem Temperaturunterschied von ca. -30 K gegenüber der Eingangslufttemperatur. Messflächen von ca. 100 mm x 100 mm in einem Abstand von ca. 100 mm werden für eine shearografische Prüfung von Kunststoffen ausreichend stark angeregt (beachte auch Kapitel 6.1.a).

Technische Daten

Tabelle 6.4 zeigt die technischen Daten der oben beschriebenen Anregungseinheiten auf. Die händisch berührende und die Robotergreifer-Anregung sind beispielhaft zu verstehen. Sie werden hier nicht weiter quantifiziert. Die Daten für die Luftpistole sind trivial und werden ebenfalls ausgelassen.

Tabelle 6.4: Technische Daten der entwickelten Anregungseinheiten.

Anregungseinheiten				
	Mikrozugprüfmaschine	Unterdruckkammer	Vakuumhaube	Wirbelrohr inkl. Anschlüsse
Kastenmaße [mm ³]	580x200x170	540x550x370	470x360x100	150x60x20
Gewicht [g]	15.000	23.000	7.000	Ca. 200
Maximales Messobjektvolumen [mm ³]	150x30x15	320x320x200	300x200x80	-
Maximale Messfläche [mm ²]	85x30	320x320	300x200	Ca. 100x100*
Maximale Anregungshöhe	87 µm (kraftlos), 20 kN	-0,25 bar	-1 bar	-30 K (Luftstromtemperatur)**

* im maximalen Abstand von 100 mm

** mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 3 Litern pro Sekunden bei einem Eingangsluftdruck von 7 bar

6.2.c. Anregungsverfahren

Um den maximalen Fehlstellenkontrast hervorzurufen, wird neben der Belastungshöhe die passende Belastungsdynamik entsprechend der Fehlstellendynamik eingestellt (s. Kapitel 6.1.b). Dabei werden grundsätzlich drei Anregungsverfahren unterschieden: die Burst Anregung, die Dual-burst Anregung und die periodische Anregung, s. Abbildung 6.13.

Burst¹²⁷ Anregung

Das einfachste und in vielen Fällen zielführende Anregungsverfahren ist der Burst. Dabei wird das Messobjekt einmalig mit einem Anregungsimpuls belastet, wodurch es mit einer zeitverzögerten, kontinuierlich ansteigenden Verformung antwortet, bis ein Energiegleichgewichtszustand erreicht ist. Sobald der Anregungsimpuls endet, baut das Messobjekt die Verformung über eine gewisse Zeit wieder ab. Innerhalb dieses Ablaufs existiert ein Zeitintervall, in dem der Fehlstellenkontrast am höchsten ist (s. auch Kapitel 6.1). In der Prüfpraxis werden die Anregungsimpulsdauer und -höhe in mehreren Messvorgängen variiert und für jeden Vorgang während des gesamten Ablaufs kontinuierlich Messungen vorgenommen. Im Nachgang wird das aussagekräftigste Interferenzphasen-„Pärchen“ ermittelt und Rückschlüsse auf den optimalen Impuls, den optimalen Messzeitpunkt und die optimale Messdauer gezogen (s. auch Abbildung 6.14). Prinzipbedingt ist der Fehlstellenkontrast bei einer dynamischen Belastung am höchsten, wenn der Verformungsgradient am höchsten ist. Das heißt sofern die Energieabfuhr nach der Anregung nicht gleich hoch der Energiebeaufschlagung bei der Anregung ist, ist eine Messung während der Anregung optimal. SPS liefert hier einen entscheidenden Vorteil aufgrund der besseren Eignung für dynamische Anregungen (s. Kapitel 3.3.a Vorteile). Zudem ist die Messung mit

¹²⁷ Dt.: platzen, bersten, zerspringen:

SPS fremdlichtunabhängig, was gerade bei typischer optischer Anregung vorteilhaft ist (s. Kapitel 2.6.e).

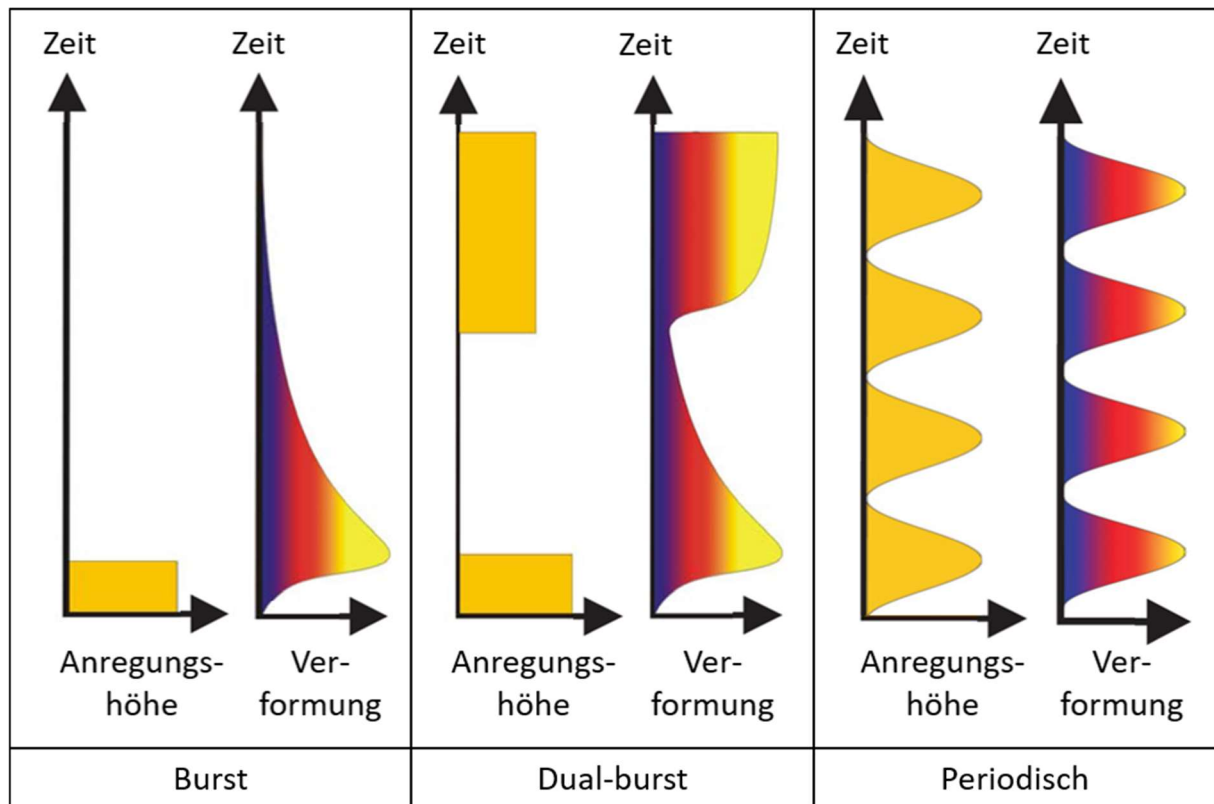


Abbildung 6.13: Schematische Darstellung der grundlegenden drei Anregungsverfahren Burst, Dual-burst und periodische Anregung; die Grafiken zeigen jeweils den zeitlichen Verlauf der Anregungshöhe und die darauffolgende zeitliche Verformungsantwort. Die Verfahren dienen der Fehlstellenkontraststeigerung durch eine optimale Abstimmung der Belastungsdynamik auf die Fehlstellendynamik. Grafik abgeleitet aus ([24] S. 47, 48 und 52).

In der Literatur sind oft unterschiedliche Bezeichnungen¹²⁸ für Anregungsverfahren zu finden, welche mit dem hier als *Burst* beschriebenen Verfahren als Überbegriff definiert werden können. Bei der Anregung eines Messobjektes und der sich daraufhin einstellenden Verformung herrscht immer eine gewisse Dynamik. Bei einer mechanischen Belastung breitet sich die Verformung im Messobjekt nahezu unmittelbar¹²⁹ aus. Die Verzögerungszeit zwischen Anregung und Verformung kann bei der typischen shearografischen Messung nicht aufgelöst werden. Für einen langandauernden Rechteckimpuls kann dann von einer statischen Messobjektbelastung gesprochen werden. Gleiches gilt für eine Wärmekammer als Anregungseinheit. Ihre eigene Anregungsdynamik reicht in den meisten Fällen nicht aus, um einen aussagekräftigen Fehlstellenkontrast durch die dynamische Belastung hervorzurufen. Für alle anderen Anregungseinheiten zur thermischen Belastung ergeben sich die auflösbaren Gegebenheiten zwischen Anregung und Verformung, wie in Abbildung 6.13 für den Burst dargestellt. Selbst für eine hochdynamische Anregung mittels Blitzlampe oder Laser für hochdynamisch reagierende Messobjekte ist eine gewisse, wenn auch kurze Anregungsimpulsdauer definierbar.

¹²⁸ Transient, statisch, dynamisch, Puls, Impuls, Burst, s. ([24], [35], [10]).

¹²⁹ Siehe *Rheologie* [158]; im Falle von Festkörpern ist vor allem die Material-Schallgeschwindigkeit der entscheidende Faktor. Bsp.: Longitudinale Schallgeschwindigkeit in Aluminium ca. 6350 m/s [12].

Dual-burst Anregung

Bei der Anregung mit Dual-burst wird zunächst derselbe optimale Messzeitpunkt für die erste Interferenzphasenmessung wie beim Burst ermittelt. Es handelt sich um den Zeitpunkt des höchsten Verformungsunterschiedes zwischen dem Bereich mit Fehlstelle und dem globalen, intakten Bereich, wie Abbildung 6.14 zeigt. Der Verformungsunterschied sinkt mit dem Abfallen des Verformungsgradienten. Dies ist typisch für das Abkühlen eines Objektes auf Umgebungstemperatur durch natürliche Konvektion. Beim Burst wird bereits frühzeitig die zweite Interferenzphasenmessung durchgeführt, um die globale Verformung möglichst gering zu halten. Abbildung 6.15 links zeigt das so ermittelte Shearogramm und Demodulationsergebnis für die Prüfplatte nach Kapitel 2.5.e. Beim Dual-burst wird stattdessen ein zweites Mal mit geringer Anregungshöhe belastet. Dadurch wird die globale Verformung wieder auf den Wert der ersten Interferenzphasenmessung gebracht. Im Bereich der Fehlstelle stellt sich ebenfalls die globale Verformung ein, da die Fehlstellen-Verformungsantwort auf diesen zweiten Impuls erst später folgt. Die zweite Interferenzphase wird erfasst, wobei die globale Verformung im Shearogramm nahezu vollständig eliminiert ist, s. Abbildung 6.15 rechts.

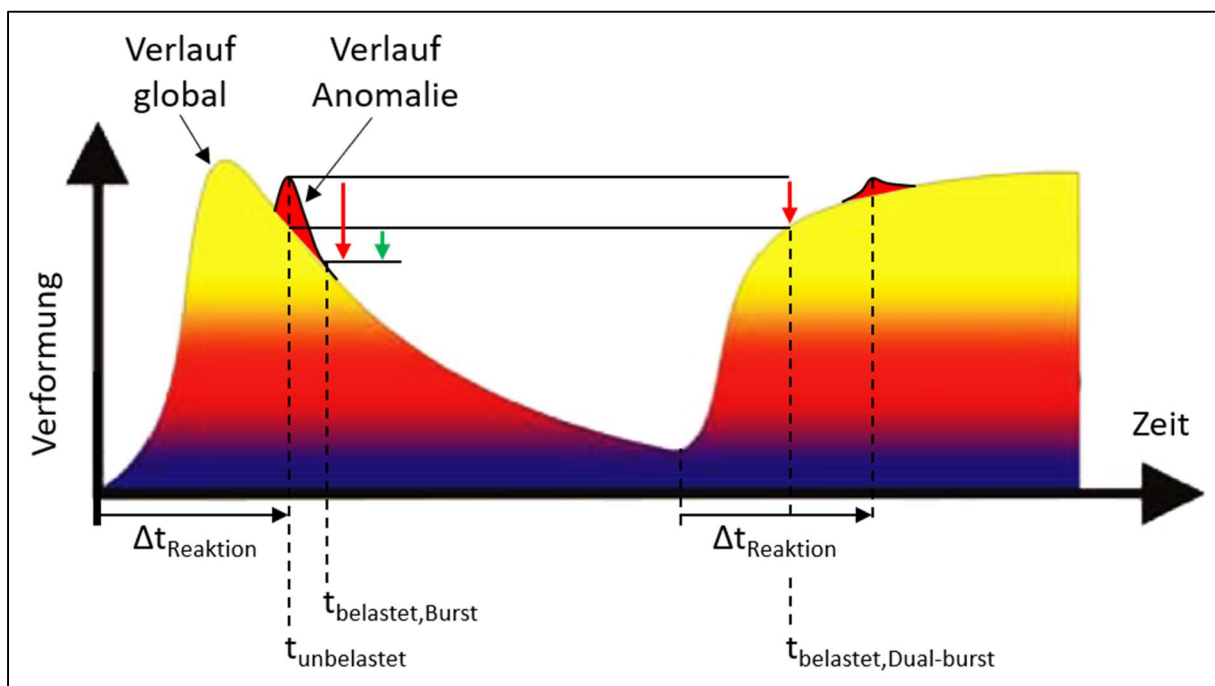


Abbildung 6.14: Schematische Darstellung der Dynamik des globalen und anomalen Verformungsverlaufs bei Dual-Burst Anregung (s. auch Abbildung 6.13); nach einer gewissen Reaktionszeit nach der Anregung verformt sich der Bereich mit Fehlstelle anomal verglichen zum globalen Bereich. Der höchste Fehlstellenkontrast beim ersten Burst wird im Zeitintervall von der maximalen Verformungsanomalie bis zum kurz darauffolgenden Abklingzeitpunkt erreicht. Die so messbare Verformungshöhe der Anomalie zeigt der linke rote Pfeil, die dabei auftretende globale Verformungshöhe der grüne Pfeil (s. auch Abbildung 6.15 links). Mittels zweitem Burst wird der Fehlstellenkontrast gesteigert. Dabei wird die globale Verformung durch abermalige Messobjektbelastung auf den Wert zum Zeitpunkt der ersten Bildaufnahme angehoben und dadurch eliminiert (s. auch Abbildung 6.15 rechts). Die anomale Verformung hat sich in dieser kurzen Zeit nach der zweiten Anregung noch nicht ausgebildet, sodass sie weiterhin mit einer leicht geringeren Verformungshöhe gemessen wird, s. roter Pfeil rechts. Grafik abgeleitet aus ([24] S. 48).

Das Shearogramm für die Anregung mit Burst zeigt zwei vertikal verlaufende, globale Phasenstreifen entsprechend der globalen Verformung. Zudem ist es stärker verrauscht, da bereits eine leichte Verformungsdekorrelation eingetreten ist. Die Visualisierung der Fehlstellen durch das demodulierte Verformungsergebnis ist aufgrund der globalen Verformung stark herabgesetzt. Das Shearogramm für die

Anregung mit Dual-burst zeigt einen hohen Phasenkontrast, wobei die Streifenordnung der Fehlstellenindikatoren gleich hoch der beim Burst-Ergebnis ist. Das demodulierte Verformungsergebnis zeigt die Fehlstellen eindeutig an. Ein ähnliches Ergebnis wird durch die Trendbereinigung des Burst-Ergebnis erzeugt. Eine solche Datennachbearbeitung ist zur Steigerung des SNR-Werts jedoch suboptimal.

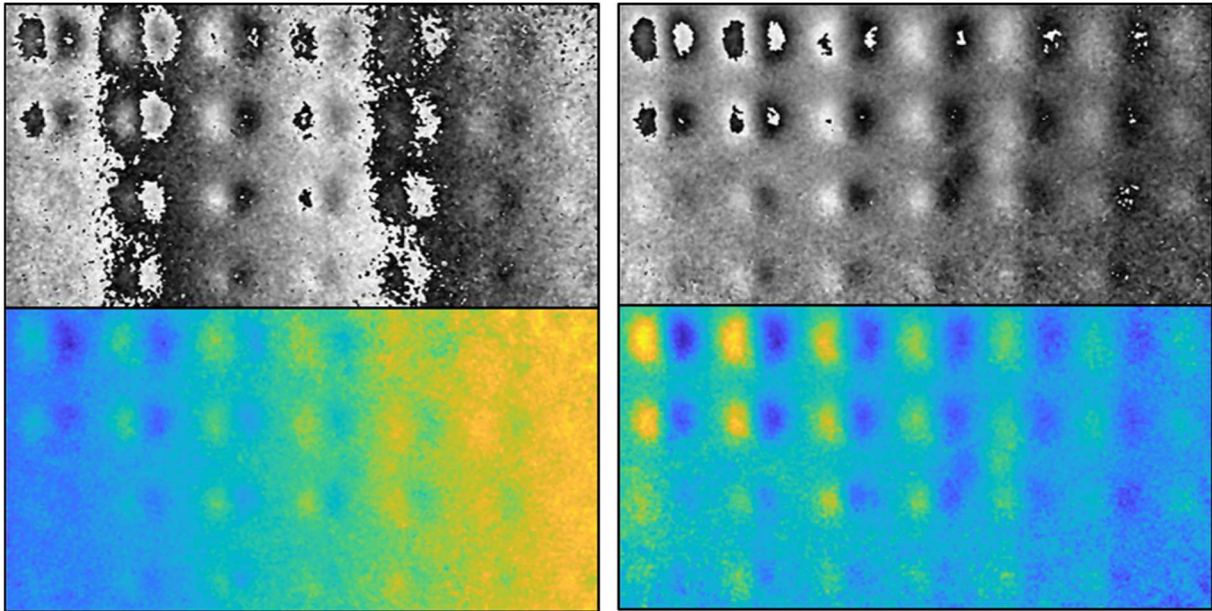


Abbildung 6.15: Shearogramm und demoduliertes Verformungsergebnis für die Prüfplatte nach Kapitel 2.5.e, links mit Burst, rechts mit Dual-burst Anregung; durch letzteres werden globale Verformungseinflüsse eliminiert, was Rauschen bzw. Verformungskorrelation verringert und das SNR der Fehlstellenindikatoren erhöht.

Der Nachteil einer Dual-burst Anregung ist die erhöhte Messzeit. Das Kriterium der Messzeit wird an dieser Stelle jedoch vernachlässigt. Wie in Kapitel 6.2.a oben beschrieben ist in der Automationspraxis die Prozesstaktzeit das bestimmende Kriterium. Grundsätzlich kann der Fehlstellenkontrast durch eine höhere Messdauer gesteigert werden. Eine Dual-burst Anregung ist jedoch nur realisierbar, wenn die Dynamik der Verformungsantwort zeitlich aufgelöst wird. Dies ist typischerweise nur bei thermischer Belastung der Fall.

Periodische Anregung

Eine mechanisch-periodische Belastung ist sinnvoll, wenn mittels Lock-in Auswertung (s. unten) der Fehlstellenkontrast und das SNR gesteigert werden soll. Hierbei erfolgt jedoch typischerweise keine zeitliche Auflösung der Anregungs- und Verformungsdynamik. Neben der Lock-in Auswertung werden hochdynamische, berührende Piezoschwinger oder berührungslose, akustische Lautsprecher verwendet, um die Struktur von Messobjekten in Schwingung zu versetzen, s. ([35] Kapitel 2). Dies hat zum Ziel, aussagekräftige Schwingungsformen an der Oberfläche des Messobjektes hervorzurufen. Dabei wird die Verformung vom nicht-angeregten Messobjektzustand hin zur Schwingungsform gemessen. Als Schwingungsformen kommen zum einen die natürlichen Formen bei einer Messobjektanregung mit den Eigenfrequenzen der Struktur in Betracht. Unter anderem zeigen sich Fehlstellen durch Anomalien in den Schwingungsformen, wie in der Veröffentlichung des Autors et al. gezeigt [119]. Zum anderen besitzen die Fehlstellen selbst Resonanzfrequenzen, wodurch sie in Schwingung geraten können, während die globale Struktur sich nicht verformt ([35] Kapitel 4.2.4). Eine periodische Anregung

zur Erzeugung von Rissuferreibung und damit Erwärmung und Verformung einer Fehlstelle ist bzgl. der ZfP suboptimal, da das Messobjekt auf diese Weise weiter geschädigt werden kann.

Typischerweise¹³⁰ ist die Verformung dieser schwingenden Strukturen zu schnell, um bei der optisch-interferometrischen Prüfung zeitlich aufgelöst zu werden. Die Messung erfolgt dann im Zeitmittlungsverfahren mit einer Differenzbilddauswertung durch zwei einfache Bildaufnahmen bei einer Belichtung über mehrere Verformungszyklen ([35] Kapitel 4.2.4). Dies bringt enorme Nachteile bzgl. des Interferenzstreifenkontrasts mit sich, s. Kapitel 2.5.a. Die so erzeugten Ergebnisse können nicht weiterverarbeitet werden, da die Interferenzstreifen ohne Richtungsinformation erfasst werden. Zur zeitlichen Auflösung müssen Zusatzgeräte zur stroboskopischen Beleuchtung und zeitlichen Synchronisation derer mit der Anregungseinheit verwendet werden ([10] S. 316 f.). Aufgrund der Berechnung der Interferenzphaseninformation in einer einzigen Bildaufnahme bietet SPS den Vorteil, dass Zeitmittlungsmessungen unmittelbar zum Differenzphasenbild führen. Die Ergebnisse können zwar ebenfalls nicht weiterverarbeitet werden, der erreichbare Phasenstreifenkontrast erleichtert die Ergebnisauswertung jedoch erheblich, s. Abbildung 6.16. Darüber hinaus kann statt einer stroboskopischen Beleuchtung die Kamerabelichtungszeit selbst entsprechend kurz eingestellt werden, um Verformungszustände für den Bruchteil einer Schwingungsperiode „einzufrieren“, wie vom Autor et al. in [58] aufgezeigt. Auf diese Weise werden quantifizierbare Interferogramme bis zu einer bestimmten Schwingungsfrequenz ohne Zusatzgeräte erfasst. Ein entsprechender Messversuch ist in Kapitel 7.3.a zu finden.

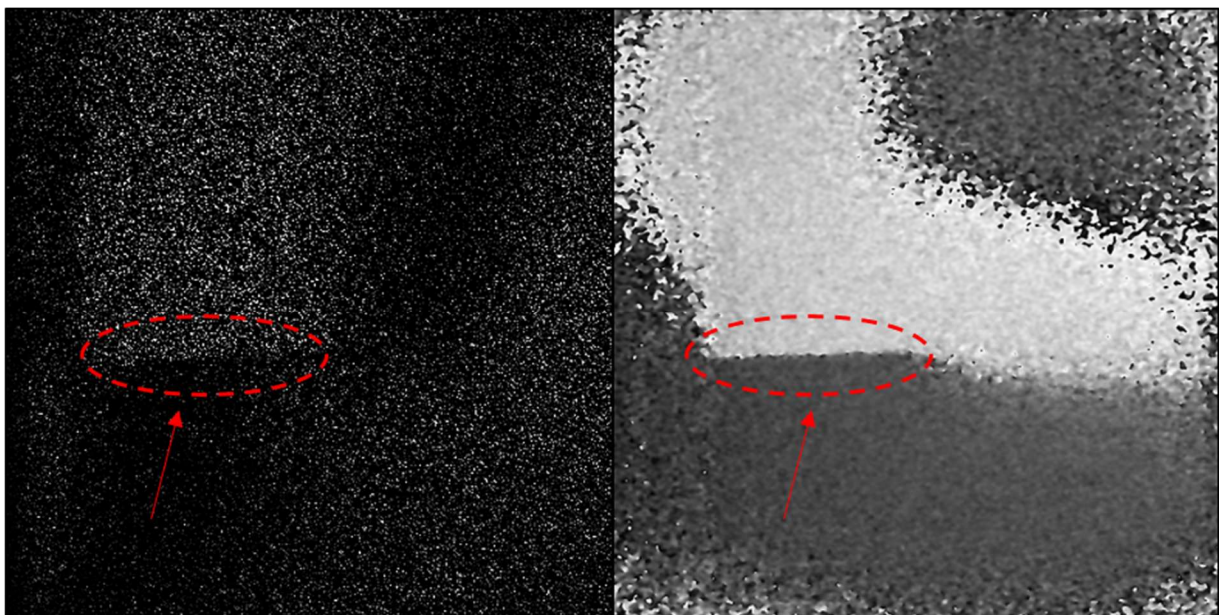


Abbildung 6.16: Zeitmittelungserfassung einer schwingenden Platte mit horizontal verlaufendem Riss (s. roter Pfeil), links mit klassischer Differenzbilddauswertung (Kontrast um einen Faktor von 5 gesteigert), rechts mit unmittelbarer SPS Differenzphasenberechnung; mit SPS ist die Risslänge aufgrund des Grauwertsprungs von weiß nach grau eindeutig feststellbar.

Eine thermisch-periodische Belastung ist sinnvoll, wenn mittels Lock-in Auswertung (s. unten) der Fehlstellenkontrast und das SNR gesteigert werden soll. Hierbei ist auch eine zeitliche Auflösung der Anregungs- und Verformungsdynamik möglich. Zur Erzeugung einer optimalen sinusförmig-periodischen

¹³⁰ Siehe z. B. ([10] S. 309 f.), tiefste Eigenfrequenz einer Pkw-Motorhaube ca. 10 Hz; nach den Erkenntnissen des Autors et al. in [58] muss die Verformung innerhalb ca. 1/20 einer Schwingungsperiode erfasst werden. Für eine TPS Auswertung wäre eine Kamerataktzeit von 200 Hz nötig, was grenzwertig ist.

Belastung, wie in Abbildung 6.13 oben gezeigt, ist gerade bei thermischer Belastung eine gewisse Einschwingzeit zu beachten, s. z. B. ([24] S. 88). Dabei ist ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Anregungseinheit, Messobjekt und der Umgebung notwendig. Menner ([24] Kapitel 3.4) setzt für die Abkühlphasen zusätzlich Ventilatoren für eine erzwungene Konvektion ein, um die sinusförmige Periode schneller und bei einer tieferen mittleren Temperatur zu erreichen.

Sweep¹³¹ Anregung

Eine Sweep Anregung entspricht einer periodischen Anregung, wobei die Anregungsfrequenz nicht konstant ist, sondern kontinuierlich zunimmt. Der Messzeitvorteil der Sweep Anregung zur mechanischen Belastung in Kombination mit einer SPS Echtzeit-Auswertung wird vom Autor et al. in [119] gezeigt. Für die langsame dynamisch-thermische Belastung ist eine Sweep Anregung eher untypisch. Aufgrund der langen Einschwingzeiten und auch Lock-in Messzeiten (s. unten) werden stattdessen separate Messvorgänge je Anregungsfrequenz durchgeführt. Alternativ dazu zeigt Menner ([24] Kapitel 4.1.5) und später Pfeffer et al. [135] eine gleichzeitige Multifrequenz-Anregung zur thermischen Belastung. Auf diese Weise wird die Messzeit auf Kosten des Fehlstellenkontrasts gesenkt.

Lock-in¹³² Auswertung

Lock-in bezeichnet eine Auswertemethode, bei der eine möglichst sinusförmig-periodische Belastung des Messobjektes¹³³ erfolgt, während typischerweise mindestens 100 Messergebnisse über eine oder mehrere Belastungsperioden erfasst werden. Abbildung 6.17 zeigt den Ablauf schematisch. Die erfassten Shearogramme werden einzeln demoduliert. Anschließend wird der Verformungswert für jeden Pixel nach der Zeit aneinandergereiht. Wird diese Reihe Fourier-analysiert, ist in der Fourier Amplitude eine hohe Intensität im Bereich der Anregungsfrequenz bzw. Lock-in Frequenz erkennbar. Dieser Bereich wird maskiert und rücktransformiert. Der Vorgang wird für jeden Pixel durchgeführt, sodass eine Matrix mit komplexen Werten entsteht. Aus ihr kann ein Amplituden- und ein Phasenbild berechnet werden. Die Prozedur ist dem Ablauf beim SPS sehr ähnlich (s. Kapitel 3.3.a).

Das Amplitudenbild zeigt die maximalen Verformungswerte des Messobjektes unter der periodischen Anregung. Kurzzeitige Störphänomene wie Verformungsdekorrelation, zufällige Wärmeschlieren sowie eine kontinuierliche, globale Verzerrung des Messobjektes über die Gesamtmessdauer sind nicht im Amplitudenbild enthalten. Sie weisen keine periodische Änderung entsprechend der Lock-in Frequenz auf und wurden daher herausgefiltert. Das Amplitudenbild zeigt damit einen sehr hohen Fehlstellenkontrast.

Das Phasenbild zeigt die Verzögerungszeit der Verformung bezogen auf die globale Verformungsänderung unter der periodischen Anregung. Die für das Amplitudenbild beschriebenen Störphänomene wurden analog herausgefiltert. Die Werte im Phasenbild sind von der Verformungshöhe entkoppelt¹³⁴. Das heißt, Bereiche mit einer hohen Verzögerung gegenüber der globalen Verformungsänderung werden durch einen starken Ausschlag im Phasenbild angezeigt. Dies trifft typischerweise auf Bereiche mit tiefliegenden Fehlstellen zu, s. Kapitel 6.1.b. Der besondere Vorteil dabei ist, dass diese Bereiche ohne Lock-in Auswertung nur mit sehr geringem Fehlstellenkontrast auffindbar sind, da die Verformungs-

¹³¹ Dt.: wischen, durchsuchen, ablaufen.

¹³² Dt.: einsperren.

¹³³ Hier bezogen auf die optische Interferometrie sowie auf die aktive Thermografie.

¹³⁴ Vergleichbar mit der Entkopplung der Phaseninformation von der Bildintensität beim Phasenschieben, s. Kapitel 2.5.a.

höhe mit der Tiefe der Fehlstelle abnimmt, s. Kapitel 6.1.a. Durch eine Variation der Anregungsfrequenz wird die Lock-in Auswertung für verschiedene Fehlstellen-Tiefenlagen optimiert, s. auch Abbildung 6.14. Zudem lassen sich die Tiefenlagen von Fehlstellen durch die Gleichungen zum Ausbreitungsverhalten thermischer Wellen und die entsprechenden Materialkennwerte anhand des Lock-in Phasenbilds quantifizieren, s. ([24] Kapitel 2.5.3). Typischerweise wird das Phasenbild nur für die langsame dynamische Verformungsantwort eines Messobjektes unter thermischer Belastung aufgelöst.

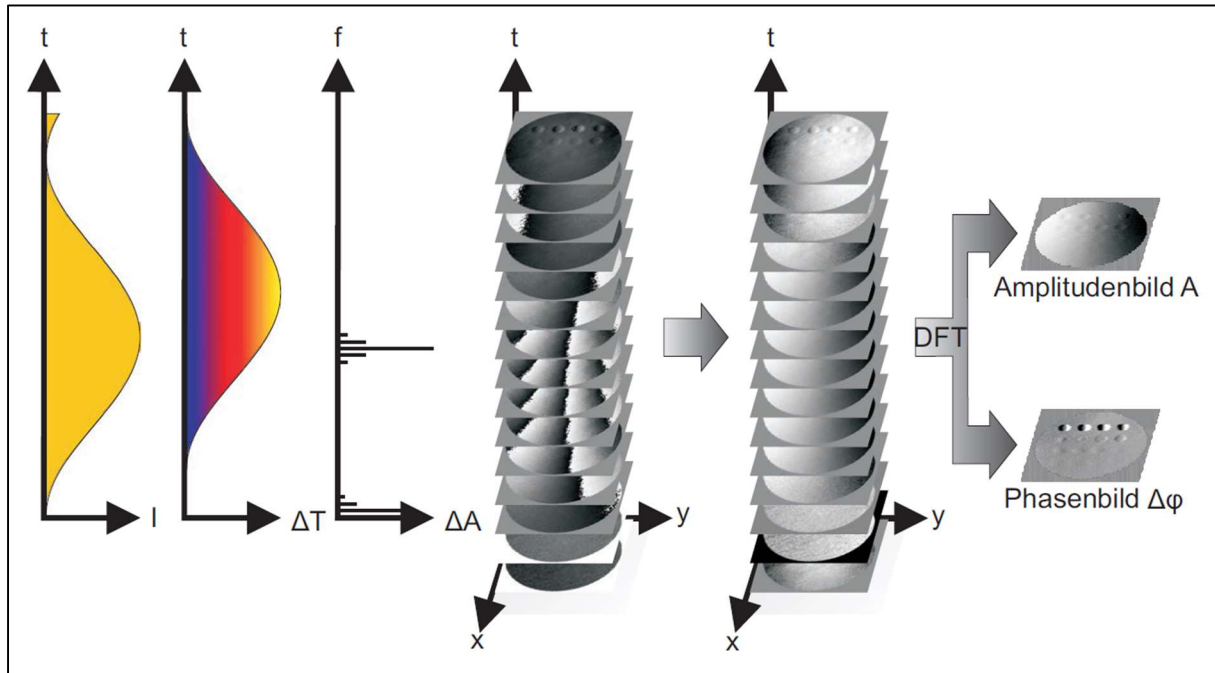


Abbildung 6.17: Abbildung zum Ablauf bei der Lock-in Shearografie von Menner ([24] S. 52); eine sinusförmige Anregung (I) führt zur entsprechenden sinusförmigen, thermischen Belastung (ΔT) eines Messobjektes, wodurch eine stark Anregungsfrequenz-abhängige (f) Verformung (ΔA) eintritt. Über die Belastungsperiode werden viele Shearogramme erfasst und anschließend die entsprechenden demodulierten Verformungsergebnisse berechnet. Der zeitliche Verformungswert je Pixel wird Fourier-analysiert, nach der Lock-in Frequenz gefiltert, rücktransformiert und ein zusammengesetztes Amplituden- und Phasenbild berechnet, welches Rückschlüsse auf die Fehlstellenstatik und -dynamik mit hohem Kontrast zulässt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm entwickelt, welches Lock-in Auswertungen für Reihen-Bildaufnahmen aus OPTIS 4 erlaubt (s. Kapitel 5.5). Aufgrund der hohen Messdauer sind solche Auswertungen jedoch im Bereich der Serienüberwachung der Automobilindustrie oftmals ungeeignet. Mit dem Programm wird das Ziel verfolgt, Lock-in Auswertungen zukünftig erstmals in Echtzeit auszuführen. Das heißt beispielsweise, dass die kontinuierlichen Messaufnahmen unter periodischer Messobjektbelastung nur solange durchgeführt werden, bis ein ausreichend hoher Fehlstellenkontrast erreicht ist. Im Folgenden werden keine entsprechenden Messergebnisse vorgestellt. Es wird auf die zukünftigen Veröffentlichungen des Technikums OGKB der Hochschule Trier verwiesen.

Anregungseinheiten nach Verfahren

Tabelle 6.5 ordnet den Anregungseinheiten die mit ihnen typischerweise möglichen Anregungsverfahren zu. Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle Verfahren bis auf diejenigen mit Quellenangaben eingesetzt.

6. Fehlstellen- und Anregungsmechanik

Tabelle 6.5: Zuordnung der Anregungsverfahren, welche mit den Anregungseinheiten durchführbar sind, unterteilt in mechanische und thermische Belastung:

Einheit	Burst	Dual-burst	Periodisch	Sweep
Mechanische Belastung				
Mensch	S			
Roboter	S		LA	
Piezoelement, E-Motor	S		LA	
Piezoschwinger			Z	Z
Zugprüfmaschine	S		LA	
Druckkammer	S		LA	
Vakuumhaube	S		LA	
Luftpistole	S			
Lautsprecher			Z	Z [136] [137]
Thermische Belastung				
Wärmekammer	S			
Heißluftfön	D	D		
Wirbelrohr	D	D		
Induktionsspule	D	D	L	
Halogenlampe	D	D	L	
Quarzstrahler	D	D	L	
LED-Strahler	D	D	L	
Blitzlampe	D			
Laser	D [128]			
Mikrowellensender	D	D		

D: zeitlich auflösbare, verzögerte Verformungsantwort (dynamisch)

L: Lock-in Phasen- und Amplituden-Auswertung

LA: Lock-in Amplituden-Auswertung

S: zeitlich nicht auflösbare, direkte Verformungsantwort (statisch)

Z: ohne Zusatzaufwand zeitlich nicht auflösbare, direkte Verformungsantwort

Wie für die Burst Anregung oben beschrieben, werden mechanische Belastungen zeitlich nicht aufgelöst. Stattdessen wird das Messobjekt durch die Einheiten mit Anregungssprüngen beaufschlagt. Gleiches gilt auch für die träge Wärmekammer. Sofern eine sinusförmige mechanische Belastung mit der Einheit möglich ist, ist auch eine Lock-in Amplitudenauswertung möglich. Ansonsten werden Piezoschwinger und Lautsprecher zur hochdynamischen periodisch-mechanischen Belastung verwendet, teilweise mit Sweep. Hierbei werden meistens Schwingungsformen durch eine Zeitmittelungserfassung ausgewertet. Für die zeitliche Auflösung der Schwingungsverformungen sind Zusatzgeräte notwendig.

Bei der Burst Anregung mit thermischer Belastung wird die Verformungsantwort zeitlich aufgelöst. Dabei kommt eine Einheit mit passender Anregungsdynamik zum Einsatz, s. auch ([24] Kapitel 3.3). Dual-Burst Anregungen sind mit allen Einheiten außer der hochdynamischen Blitzlampe und dem Laserimpuls realisierbar. Sofern eine sinusförmige thermische Belastung mit der Einheit möglich ist, ist auch eine Lock-in Amplituden- und Phasenauswertung möglich.

7. Messungen und Auswertung

In Kapitel 7 werden die Messergebnisse, welche im Rahmen dieser Arbeit ermittelt wurden, zunächst zusammengefasst vorgestellt. Dabei wird die Einsatztauglichkeit der Fehlstellendetektion mit Shearografie und Thermografie gegenübergestellt. Alle shearografischen Messungen werden mit der neuen Methodik und der Messtechnik nach Kapitel 4 und 5 erfasst. Anschließend werden zwei ausgewählte Messergebnisse vorgestellt, welche das Potential der Shearografie im Bereich der Automobilindustrie bestätigen, wie in Kapitel 1 beschrieben. Daraufhin folgen ausgewählte Messergebnisse, welche ausschließlich mit der neuen Methodik und der Messtechnik durchführbar sind.

Bei allen Messobjekten handelt es sich um möglichst praktische Bauteile, wie sie industriell vorkommen. Das heißt soweit möglich existieren reale statt künstlicher Fehlstellen und es wird keine Prüfbeschichtung auf die Messfläche aufgebracht. Sollte letzteres dennoch nötig sein, sind neuerdings Beschichtungen am Markt verfügbar, welche sich über ca. 2 Stunden nahezu rückstandslos auflösen. Auf diese Weise können nachgeschaltete Bauteil-Waschanlagen in automatisierten Serienprüfprozessen eingespart werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Beschichtung sich bei hohen Umgebungstemperaturen bereits in weniger als 5 Minuten auflöst. Für eine thermografische und vor allem eine shearografische Prüfung mit thermischer Bauteilbelastung treten Störphänomene bei der Messung auf. Nach der Erfahrung des Autors ist die Beschichtung für eine shearografische Prüfung mit mechanischer Belastung hingegen geeignet.

Die Herstellung von Schlagschäden (Impacts) erfolgt in Anlehnung an die DIN ISO 18352 [138]. Untersuchungen zu Kissing bonds wurden nicht weiterverfolgt, da die künstliche Herstellung äußerst komplex ist. Weiterführend sei auf [139] verwiesen. Viele der Ergebnisse werden mit anderen Methoden, vor allem mittels ZfP, validiert. Die Kapitelüberschrift je Messergebnis gliedert sich in „Messgerät, Bauteil, Fehlerart, Belastungsart, ggf. Validierungsmethode“.

7.1. Zusammengefasste Ergebnisse

In der Literatur sind bereits einige ZfP Verfahrensvergleiche mit der Shearografie (DS) zu finden. Aufgrund der sich teilweise überlappenden Einsatztauglichkeit werden dabei vor allem Vergleiche zwischen DS und Thermografie (TT) angestellt, s. auch Kapitel 1.3. Burleigh zeigt eine umfangreiche Vergleichstabelle für verschiedene Materialien und Fehlstellenarten [140]. Bezüglich weiterer interessanter Vergleiche sei auf ([141], [142], [143], [126], [144], [145]) verwiesen. Darüber hinaus zeigt Xie et al. 2019 einen Vergleich von DS und CT an CFK Rohren [146], wobei die DS auch Fehlstellen detektiert, die mit CT nicht auffindbar sind. Menner ([24] Kapitel 5) und Pfeffer ([68] S. 51 ff.) zeigen weitere Vergleiche mit DS, TT, UT und RT an diversen Materialien und Bauteilen mit künstlichen Fehlstellen.

Tabelle 7.1 stellt die Ergebnisse für DS und TT gegenüber, die innerhalb dieser Arbeit durchgeführt wurden. Viele Positionen aus der Tabelle von Burleigh können dabei bestätigt werden. Zudem kann die Tabelle von Burleigh um einige Materialien und Bauteile sowie um die Unterscheidung der Belastungsart bei der DS ergänzt werden. Wie bereits in Kapitel 2.2.e angemerkt, werden bei Prüfungen mit thermischer Anregung dieselben Anregungseinheiten für DS und TT verwendet. Zur optischen Anregung kommen vor allem augensichere Strahler zum Einsatz, welche kostengünstig, einfach zu bedienen und energiearm sind. Die DS reagiert für die in der Tabelle aufgeführten Materialien oftmals schneller und empfindlicher auf die Anregungsleistung, wodurch sie als besser geeignet bewertet wird (s. auch Kapitel 6.1).

7. Messungen und Auswertung

Tabelle 7.1: Bewertung der Detektion von Fehlstellenarten für die Materialien und Bauteile, welche innerhalb dieser Arbeit shearografisch mit mechanischer und thermischer und thermografisch mit thermischer Belastung geprüft wurden; zur Orientierung: die Steifigkeit der Materialien und Bauteile nimmt von oben nach unten überschlägig zu.

Material, Bauteil, Fehlerart	Shearografie, mechanische Belastung	Shearografie, thermische Belastung	Thermografie, thermische Belastung
Schaumkern Sandwich, Armaturenblech, Delamination	-	Gut	Durchschnittlich
Acrylschaum, Klebeband, diverse Fehlstellen, s. Kapitel 7.2.a	Gut	Gut	Durchschnittlich
Gummi, Dichtringe, s. ([123], [124], [125]), oder Reifen, Riss und Vulkanisationsfehler	Gut	Durchschnittlich	Schlecht
Harzgetränktes Papier, Wabenkern Komposit, Delamination	-	Gut	Gut
Hartpapier, Leiterplatine, herabgesetzte Wärmeableitung der elektrischen Bauteile an die Platine	-	Durchschnittlich	Gut
Kork-Aluminium, Laminat, fehlende Haftung	Schlecht	Gut	Gut
Holz, Risse, s. Kapitel 7.3.d	-	Gut	Schlecht
NFK, Laminat, Riss, s. Kapitel 7.3.a	Gut	Gut	Gut
NFK, Laminat, trockene Stellen	-	Gut	Gut
NFK, Laminat, Ondulation	Gut	-	Durchschnittlich
NFK, Laminat, Dickenunterschiede	Durchschnittlich	-	Gut
NFK, Schaumkern Sandwich, Delamination und Schlagschaden	Durchschnittlich	Gut	Schlecht
GFK, COPV, Faserlinien-Abtrennung, s. Kapitel 7.3.e	Gut	Schlecht	Schlecht
GFK, COPV, Delamination und Gaseinschluss, s. Kapitel 7.3.e	Durchschnittlich	Gut	Durchschnittlich
Waben-Komposit Platte, Schlagschaden, s. Kapitel 7.3.b	Gut	Schlecht	Durchschnittlich
CFK, Rohr, Schlagschaden	-	Gut	Schlecht
CFK, Bauteil aus Prepreg ¹³⁵ , diverse Fehlstellen, s. Kapitel 7.2.b	Durchschnittlich	Gut	Gut
Aluminium, Wabenkern, Komposit Delamination und Schlagschaden	Gut	Schlecht	Schlecht
Beschichtete Glasplatte, Risse, s. Kapitel 7.3.d unten	Gut	Gut	Schlecht
Titian, Turbinenschaufel, Beschichtungsschaden, s. [119]	Durchschnittlich	Gut	Gut

¹³⁵ Preimpregnated fibres, dt.: vorimprägnierte Fasern.

Material, Bauteil, Fehlerart	Shearografie, mechanische Belastung	Shearografie, thermische Belastung	Thermografie, thermische Belastung
Titian, Turbinenschaufel, Riss, s. [119]	Gut	Durchschnittlich	Gut
Stahl, Werkzeuge (raue Oberflächen), Risse, s. Kapitel 7.3.f und 7.3.g	Durchschnittlich	Durchschnittlich	Gut
Stahl, Werkzeuge (glänzende Oberflächen), Risse	-	Durchschnittlich	Schlecht
Keramikbauteil, Risse, s. Kapitel 7.3.c	-	Gut	Gut

Tabelle 7.1 zeigt den Vorteil der DS mit thermischer Belastung gegenüber der TT für Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit wie Schaum, NFK und Gummi. Hierbei können mit DS tieferliegende Fehlstellen detektiert werden, wie es in Kapitel 6.1.b theoretisch diskutiert wird. Zudem ergibt sich bei Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit der Vorteil der mechanischen Belastung bei der DS, wie für Aluminium Wabenkomposite. Darüber hinaus ist die mechanische Belastung konstruktionsbedingt auch für Reifen, Rohre und Druckbehälter vorteilhaft. TT hingegen weist Vorteile bei Beschichtungsschäden oder zur Detektion von Dickenunterschieden bei Laminaten auf. Zudem sind Risse in Stählen mit geringem Wärmeausdehnungskoeffizient mit TT gut aufspürbar, s. auch Kapitel 6.1.a, wobei glänzende Bauteiloberflächen problematisch sind.

7.2. Ausgewählte Messungen

Im Folgenden werden zwei Messergebnisse vorgestellt, welche die Vorteile der DS gegenüber der TT und die Vorteile bei einer Automation gegenüber anderen ZfP Verfahren aufzeigen.

7.2.a. MZ, Acrylschaumklebeband, diverse Fehlstellen, mechanisch/thermisch, TT

Doppelseitiges Klebeband aus Acrylschaum wird immer häufiger im Automobilbau verwendet, um beispielsweise Radlaufblenden gewichtssparend an Kotflügeln zu befestigen. Bei der maschinellen, einseitigen Aufbringung können diverse Problematiken auftreten, wodurch die Klebewirkung zwischen den zu verklebenden Teilen herabgesetzt wird. Beispielsweise tritt eine Verdrückung des Bandes auf, wenn der Spalt zwischen Bauteil und Band-Ablagerolle aufgrund der variierenden Bauteilhöhe zu gering ist, s. Abbildung 7.1. Darüber hinaus kann es bei zu hohen Ablegegeschwindigkeiten zu Stauchungen in Kurvenbereichen kommen, bei zu geringen Ablegegeschwindigkeiten zu Banddehnungen. Typischerweise spielt die Kontamination der Klebeoberfläche ebenfalls eine wichtige Rolle.

Im vorliegenden Fall wird ein einseitig appliziertes Band mit einer Breite von 10 mm und einer Höhe von 1 mm auf diese gezielt in der Maschine eingebrachten Fehlerarten geprüft. Die Verformungen durch die Fehlstellen an dem Klebeband sind oftmals zu klein, als dass sie beispielsweise mittels 3D Laserscanner sicher aufgefunden werden könnten. Stattdessen muss ein möglichst schnell arbeitendes und günstiges ZfP Verfahren verwendet werden, um die Aufgabenstellung wirtschaftlich zu lösen. Tabelle 7.2 stellt die Messergebnisse vergleichend gegenüber, welche mittels DS mit verschiedenen Anregungseinheiten und mit TT ermittelt werden. Gezeigt werden die interessanten ca. 40 mm langen Bereiche mit Fehlstelle der 150 mm Band-Prüflänge.

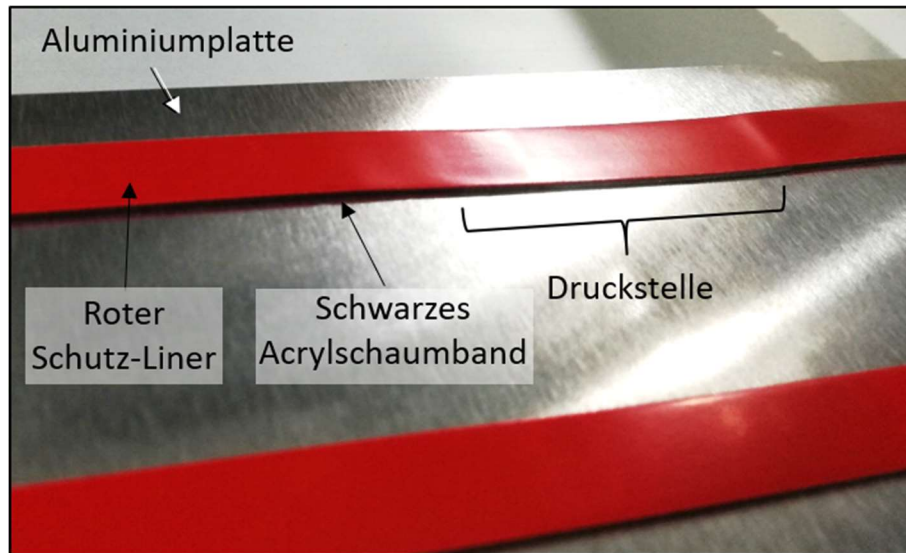


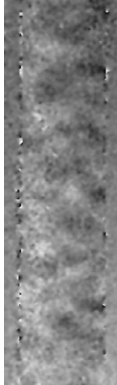
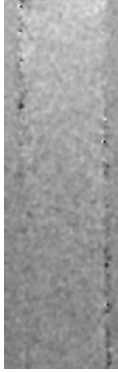
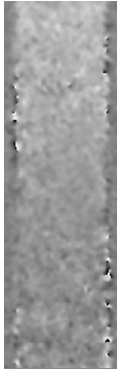
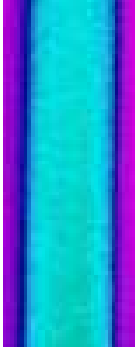
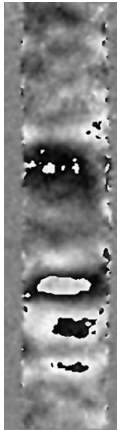
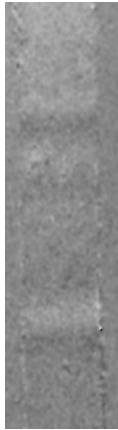
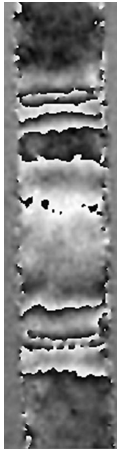
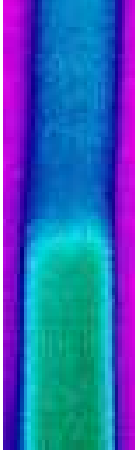
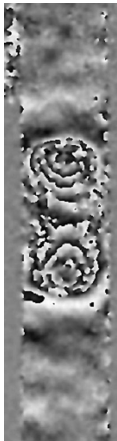
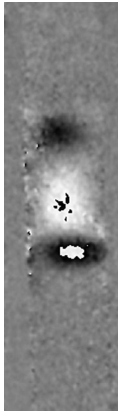
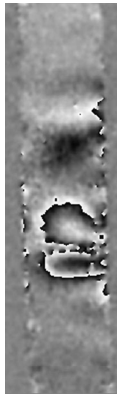
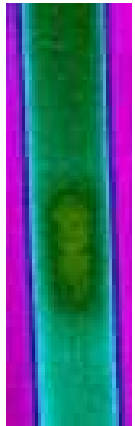
Abbildung 7.1: Doppelseitiges Klebeband für den Kfz-Bereich, einseitig auf ein Aluminiumblech appliziert und noch mit rotem Schutz-Liner versehen, um eine Kontamination der Klebefläche zu vermeiden; es wurde eine künstliche Druckstelle verursacht, wie sie bei der Bandablage mit zu geringem Ablegespalt für unebene Bauteile vorkommt. Diese vermindert die Haftung zwischen den verklebten Bauteilen.

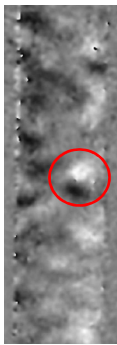
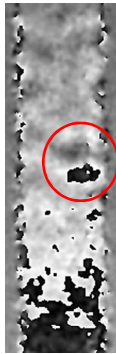
Durch eine statische Unterdrückanregung lassen sich, bis auf das kleine Sandkorn, alle Fehlerarten mit einem Indikator mit mindestens einem Phasensprung detektieren. Der Indikator für das Sandkorn hebt sich dennoch stark genug von der lokalen Verformung ab, um zumindest visuell aufzufallen. Die Handhabung solch länglicher Messbereiche in einer Druckkammer ist für eine Automation nicht optimal, daher wird die Einsatztauglichkeit berührungsloser Anregungseinheiten untersucht. Mittels Bauteilbiegung als auch mittels Luftpistole kann ein Indikator für Stauchungsfehlstellen erzeugt werden. Alle anderen Fehlerarten sind jedoch nur unzureichend oder gar nicht aufspürbar. Bei der Biegung tritt leichtes Rauschen durch die Verformungsdekorrelation auf. Die thermische Belastung mittels Halogenstrahler liefert, bis auf den Dehnungsfehler, ähnliche gute Ergebnisse wie die mechanische Belastung mittels Unterdruckkammer. Zur Prüfung des eher dünnen Bandes ist eine Gesamtmesszeit von nur 4 Sekunden ausreichend. Die TT hingegen liefert nur Indikatoren für das gedrückte und das gestauchte Band. Ersteres zeigt sich durch einen Wärmekontrastunterschied von verdrücktem und intaktem Bereich über die gesamte Prüflänge. Das heißt mit einem kalibrierten Messgerät sind auch absolute Messungen möglich. Mittels DS wird stattdessen nur der Übergang solcher gedrückter Bereiche sichtbar.

Insgesamt machen sich die Fehlstellen im Klebeband durch die von ihnen verursachten Steifigkeitsunterschiede bemerkbar, welche mittels DS abgefragt werden können. Der Wärmekontrast, welcher thermografisch messbar ist, spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle. Eine wirtschaftliche Automation könnte demnach mit einem schnellen und günstigen DS Messsystem mit Halogenstrahlern realisiert werden. Die Messtechnik nach Kapitel 5 ist für die rauen Umgebungsbedingungen einsatztauglich, was in Kapitel 8.2 weiter unter Beweis gestellt wird.

7. Messungen und Auswertung

Tabelle 7.2: Messergebnisse der shearografischen und thermografischen Prüfung von einseitig appliziertem Acrylschaumklebeband mit verschiedenen Anregungseinheiten (X: kein Indikator feststellbar); die Prüflänge beträgt 150 mm, von denen ca. 40 mm gezeigt werden. Die Bandhöhe beträgt ca. 1 mm, die Breite 10 mm.

Fehlstellenart	Unterdruckkammer, statisch	Luftpistole, Burst	Biegung	Halogenstrahler, Burst	Thermografie, Halogenstrahler, Burst
Referenzband					
Gedrücktes Band			X		
Gestauchtes Band					

Fehlstellen- art	Unterdruckkam- mer, statisch	Luftpistole, Burst	Biegung	Halogenstrah- ler, Burst	Thermografie, Halogenstrahler, Burst
Gedehntes Band		X	X		X
Sandkorn		X	X		X

7.2.b. MZ, CFK Bauteil aus Prepreg, diverse Fehlstellen, mechanisch/thermisch, ZfP

Im Rahmen des 11. internationalen Symposiums für ZfP in der Luft- und Raumfahrt 2019 in Paris wurde ein studentischer Wettbewerb veranstaltet. Von sieben Teams wurden ZfP Ergebnisse von identischen, aus Prepreg¹³⁶ gefertigten CFK Bauteilen vorgestellt [151], s. Abbildung 7.2.

Es kamen gängige (TT, UT, RT, VT)¹³⁷ und auch spezielle (TM, AE, LV)¹³⁷ Prüfverfahren zum Einsatz. Die Bauteile mit den Kastenmaßen von ca. 300 mm x 150 mm x 30 mm und einer Wandstärke von ca. 0,5 mm wurden von der Firma *Cotesa GmbH* gefertigt, einem Automobil- und Luftfahrtzulieferer. Sie wurden mit unterschiedlichen künstlichen Fehlstellen versehen, welche typische Fertigungsfehler in der Produktion repräsentieren. Die Aufgabenstellung des Wettbewerbs war das Aufspüren aller Fehlstellen, deren Bemaßung und Charakterisierung, die Bewertung einer Klebung sowie die Ausarbeitung einer Empfehlung bzgl. der industriellen Automation dieser Prüfaufgabe mit dem passenden Prüfverfahren. Die Empfehlung von allen Teams ist nahezu einheitlich. Sie sagen aus, dass die Wahl des Prüfverfahrens von der erforderlichen Ergebnisqualität bzw. -sicherheit sowie von der erlaubten Prüfdauer abhängt. Smagulova et al. [151] nennt Ultraschall in Tauchtechnik als das Verfahren mit der höchsten POD¹³⁸ bei Gerätekosten¹³⁹ von 0,5 Mio. € und einer Gesamtprüfdauer von über einer Stunde. Poelman et al. [151] nennt TT mit Blitzlampe als kostengünstige und schnelle Alternative mit Gerätekosten von

¹³⁶ Preimpregnated fibres, dt.: vorimprägnierte Fasern.

¹³⁷ TT = Thermografie, UT = Ultraschall, RT = Durchstrahlungsprüfung, VT = visuelle Sichtprüfung, TM = Tera hertz Prüfung, AT = akustische Emissionsprüfung, Abkürzungen nach [149]; LV = Laser Vibrometer, s. ([10] Kapitel 4 Teil 2).

¹³⁸ Probability Of Detection (dt.: Fehlstellen-Auffindwahrscheinlichkeit).

¹³⁹ Inkl. Roboter und Tauchbecken.

0,1 Mio. € bei hoher POD, während die Augensicherheit bei der 1,2 MW Blitzlampe¹⁴⁰ problematisch ist. Die Gesamtprüfdauer wird mit 8 Minuten angegeben.



Abbildung 7.2: CFK Bauteil aus Prepreg mit den Kastenmaßen von ca. 300 mm x 150 mm x 30 mm und einer Wandstärke von ca. 0,5 mm, gefertigt von der Firma Cotesa GmbH für den studentischen Wettbewerb im Rahmen des 11. internationalen Symposiums für ZfP in der Luft- und Raumfahrt 2019; das Bauteil ist mit unterschiedlichen Fehlstellen versehen. Die Vorderseite ist glänzend, die Rückseite stark glänzend. Die fehlerstellenbehaftete Unterkante (und linke Kante, nicht dargestellt) wird bei der vorderflächigen shearografischen Prüfung mittels Spiegel in die Prüfrichtung reflektiert.

Im Nachgang zum Wettbewerb wird vom Autor an dieser Stelle das Ergebnis der shearografischen Messung als alternatives ZfP Verfahren vorgestellt. Es wird eine vorderseitige Vermessung bei einer thermischen Dual-burst Belastung mittels einem 500 W Halogenstrahler durchgeführt. Die untere und linke Messobjektkante, wo bekannterweise Fehlstellen im Bauteil vorliegen, werden mittels Spiegel orthogonal zur Vorderseite reflektiert. Trotz der glänzenden Oberfläche muss keine Prüfbeschichtung aufgetragen werden. Der Messvorgang dauert insgesamt ca. 20 Sekunden. Währenddessen werden kontinuierlich Bildaufnahmen getätigt. Unter ihnen sind 5 unterschiedliche Shearogramme zu finden, welche für die einzelnen Fehlstellen den höchsten Kontrast liefern (s. Kapitel 6). Die Ergebniszusammenstellung zeigt Abbildung 7.3.

Es werden einige komplexe Einflüsse sichtbar, welche im visuellen Vergleich jedoch eindeutig der dreidimensionalen Geometrie des Messobjektes zugeordnet werden können. Die Klebung sowie alle sieben künstlichen Fehlstellen zeigen sich durch unterschiedliche Indikatoren. Darüber hinaus wird eine weitere Verformungsanomalie am unteren Messobjektrand sichtbar (rot gestrichelt umkreist). Hier

¹⁴⁰ 6 kJ in 5 ms.

wird ein Schlagschaden des dünnen Randbereichs vermutet, welcher ggf. beim Transport des Objekts aufgetreten ist. Die Fehlstellen 1¹⁴¹, 2¹⁴¹, 5¹⁴², 6¹⁴¹ und 7¹⁴³ werden mit einem hohen SNR aufgespürt. Die Detektion der Fehlstellen 3¹⁴¹ und 4¹⁴² ist eher unsicher. Eine quantitative Bewertung der Klebung erfordert genauere Untersuchungen. Die Phasensprünge zum Anfang und Ende des rückseitig aufgeklebten Stegs und der Phasensprung mittig am Steg deuten darauf hin, dass keine unzulässigen Steifigkeitssprünge vorhanden sind.

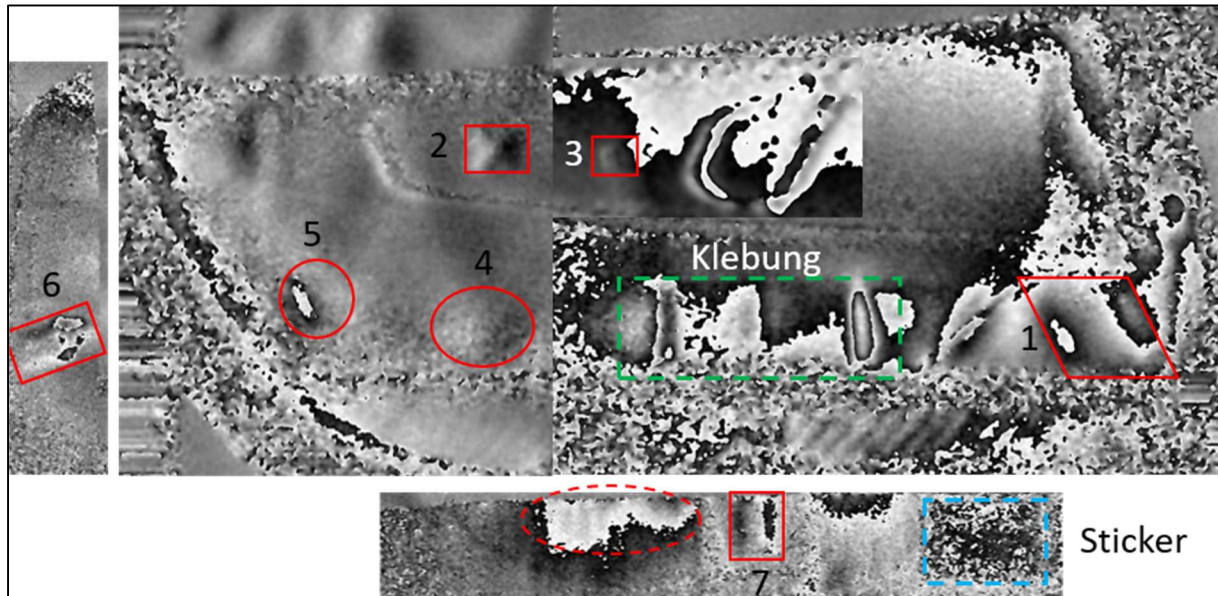


Abbildung 7.3: Zusammengesetztes Ergebnis aus Shearogrammen, welche in einem ca. 20 s Messvorgang bei thermischer Dual-burst Belastung mittels 500 W Halogenstrahler erfasst werden; zur Maximierung des Fehlstellenkontrasts für die unterschiedlichen Fehlstellen werden vorderseitig 3 Shearogramme zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Dual-burst Belastung erfasst. Die Shearogramme am unteren Bauteilrand (unten) und am linken Bauteilrand (links) werden mithilfe von zwei Spiegeln orthogonal zur Vorderseite reflektiert und vermessen.

Wie in Kapitel 1 diskutiert, sind Fehlstellenbemaßungen und -charakterisierungen untypisch für die Anforderungen der Serienproduktion in der Automobilindustrie. Von daher werden diesbezüglich keine weiteren Betrachtungen angestellt. Stattdessen sei kurz die shearografische Automation diskutiert. Diese gewährleistet, verglichen zu allen anderen oben angewendeten ZfP Verfahren, die kürzeste Gesamtprüfdauer von schätzungsweise unter einer Minute (inkl. automatischer Evaluation). Die Gerätekosten eines Shearografie-Messsystems betragen ca. 50.000 €, was der Hälfte der TT Gerätekosten entspricht, vgl. zu oben. Der Kontrast der Fehlstellen 3 und 4 kann u. a. durch die Subtraktion eines Gutteil-Shearogramms gesteigert werden, vgl. dazu Kapitel 8.2.c.

Zusammenfassend bestätigt diese aktuelle Messaufgabe das Potential der Shearografie für den Einsatz in der Automobilindustrie, wie es in Kapitel 1 beschrieben ist. Die Messtechnik nach Kapitel 5 ist für die rauen Umgebungsbedingungen einsatztauglich, was in Kapitel 8.2 weiter unter Beweis gestellt wird.

¹⁴¹ Herrmann et al. [151]: 1 = 19 mm x 19 mm Cuttermesser-Klinge (s. Fig. 7 rechts), 2 = 12 mm x 12 mm Einlage (s. Fig. 14), 3 = 6 mm x 6 mm Einlage (s. Fig. 14), 6 = 24 mm x 11 mm Delamination (s. Fig. 15).

¹⁴² Azuara et al. [151]: 4 = s. Fig. 10 Nr. 2, 5 = s. Fig. 10 Nr. 1.

¹⁴³ Yi et al. [151]: 7 = s. Fig. 2(b) Nr. D4.

7.3. Ausgewählte neuartige Messungen

Im Folgenden werden ausgewählte Messungen vorgestellt, welche ohne die neu- bzw. weiterentwickelten Messgeräte (s. Kapitel 5) nicht oder nur mit hohem Zusatzaufwand durchführbar sind. Für das MZ Messgerät werden die Vorteile der schnellen Messgeschwindigkeit sowie der großen Messfläche mittels 4f Modul gezeigt. Darüber hinaus werden durch jeweils zwei Messungen die neuen Auswertemöglichkeiten mit RGB Beleuchtungsmodul und mit dual-shear Aufbau präsentiert. Abschließend werden eine Innen-Messung mit dem neuen IFK 5 mit endoskopischer Belastung sowie zwei Messungen mit dem neuen MFK 2 vorgestellt.

7.3.a. MZ, NFK Laminat, Riss, mechanisch, TT

Zur Demonstration der gesteigerten Auswertemöglichkeiten mit SPS DS, verglichen zur thermografischen Prüfung, wird eine NFK Laminat Platte untersucht. Die 2 mm dicke Platte, nach Abbildung 7.4 oben links, mit einer Breite von 260 mm und einer Höhe von 250 mm wird hochkant an eine Wand angelehnt. Die Platte weist mittig einen durchgehenden, vertikal verlaufenden Riss mit einer Länge von 40 mm auf, wobei die Rissufer minimal aufklaffen. Es wird eine typische TT Prüfung mit einer thermischen Burst-Anregung von 15 Sekunden durch zwei 500 W Halogenstrahler durchgeführt. Der höchste Fehlstellenkontrast wird für die relative Abkühlung unmittelbar nach dem Ende des Bursts bis 40 Sekunden danach erreicht. Der Messvorgang inkl. Anregungszeit dauert damit insgesamt 55 Sekunden. Abbildung 7.4 oben rechts zeigt das erfasste Thermogramm.

Neben dem Rissindikator (rot umkreist) sind weitere Anomalien enthalten. Vor allem ein horizontal verlaufender Bereich, welcher stärker als der Riss abkühlt, stört die Evaluation. Die Anomalie ist vermutlich auf Fertigungstoleranzen beim Laminieren des Materials zurückzuführen, was im Rahmen dieser Prüfung als nicht relevant bewertet wird. Abbildung 7.4 unten rechts zeigt den Temperaturverlauf über die Plattenbreite in dem Rissbereich, welcher durch das schwarz gestrichelte Rechteck in Abbildung 7.4 oben rechts angedeutet ist. An der Stelle des Risses zeigt sich ein eindeutiger Temperatursprung. Im globalen Umfeld sind jedoch ebenfalls hohe Temperaturunterschiede vorhanden, welche sich vor allem aufgrund der horizontal verlaufenden Anomalie ergeben. Ein SNR sowie die absoluten und relativen Temperaturunterschiede werden hier nicht weiter quantifiziert. An der „körnigen“ Struktur im Ergebnis in Abbildung 7.4 unten rechts ist erkennbar, dass die Thermografiekamera¹⁴⁴ an ihrer Sensitivitätsgrenze arbeitet (Tiefenauflösung ca. 0,05 K). Die Aussagesicherheit der Prüfung durch diesen Indikator ist nicht sonderlich hoch.

Zum Vergleich werden an der Platte shearografische Untersuchungen mit akustischer Schwingungsanregung durchgeführt. Bei der Anregungseinheit handelt es sich um ein typisches Home-Entertainment Boxensystem¹⁴⁵ mit zwei Lautsprechern und einem Subwoofer mit einer RMS¹⁴⁶-Gesamtleistung von 32 W. Abbildung 7.5 zeigt die Zeitmittelungsshearogramme von acht Schwingungsmoden, welche mit dieser Leistung ausreichend stark angeregt werden können. (Ein Vergleich zwischen DS und TT unter derselben thermischen Anregung der Platte findet sich in der Veröffentlichung des Autors et al. [152].)

¹⁴⁴ FLIR A65.

¹⁴⁵ Hier: Logitech X-230.

¹⁴⁶ Root Mean Square, dt.: quadratischer Mittelwert.

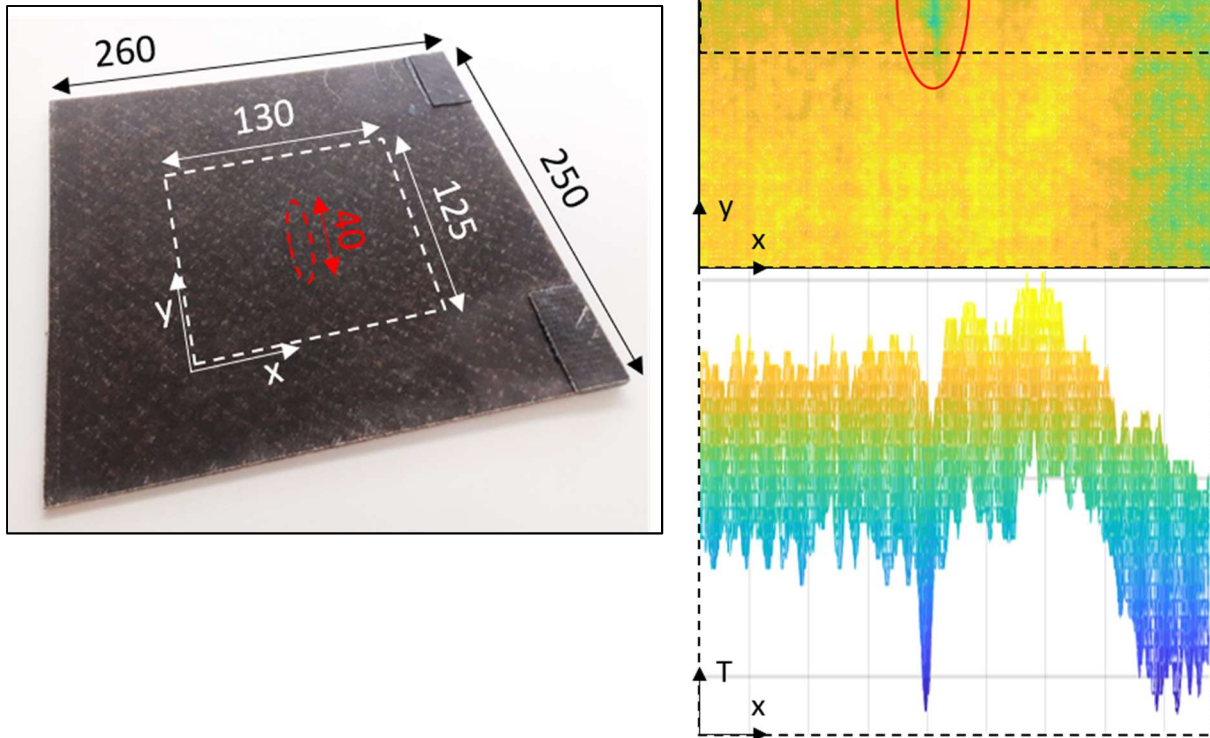


Abbildung 7.4: (Links) 260 mm x 250 mm NFK Laminatplatte mit einer Dicke von 2 mm; die beiden angeklebten Versteifungen an den Ecken rechtsseitig haben keinen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse. Der Messbereich ist weiß markiert. Mittig ist ein fast geschlossener Riss mit einer Länge von 40 mm (rot gekennzeichnet) eingebracht. (Oben rechts) erfasstes Thermogramm für eine Abkühlzeit von 40 Sekunden nach einem 15 Sekunden Anregungsburst mit zwei 500 W Halogenstrahlern; neben dem Rissindikator zeigt sich eine horizontal verlaufende Anomalie durch die starke Abkühlung, welche vermutlich auf Fertigungstoleranzen zurückzuführen ist. Der schwarz gestrichelte Bereich wird (unten rechts) über die Breite dargestellt. Die globale Abkühlung ist, neben dem Rissindikator, eher inhomogen, was die Aussagesicherheit zur Fehlstelle unsicher macht.

Die Frequenzen der maximalen Modenausbildung in den beiden Shearrichtungen unterscheiden sich leicht voneinander. In sieben der acht Shear-x-Moden ist der Indikator für den Riss durch einen lokal abgegrenzten Grauwertsprung erkennbar (rot umkreist). In der Shear-x-Mode 3 bildet sich eine global laufende Welle aus, welche nur durch eine Bilderreihe dargestellt werden kann (nicht dargestellt). Ein Rissindikator ist jedoch nicht zu finden. Die Shear-y-Moden 1, 4 und 6 weisen, verglichen zu einer idealen schwingenden Plattenform, eine annähernd runde Anomalie auf. Diese könnte auf die obere Risspitze hindeuten (rot gestrichelt umkreist). Die Vermutung wird bestärkt durch das sehr interessante Shearogramm der Shear-y-Mode 8, welches die schwingende Verformung ausschließlich im Bereich der Risspitzen zeigt.

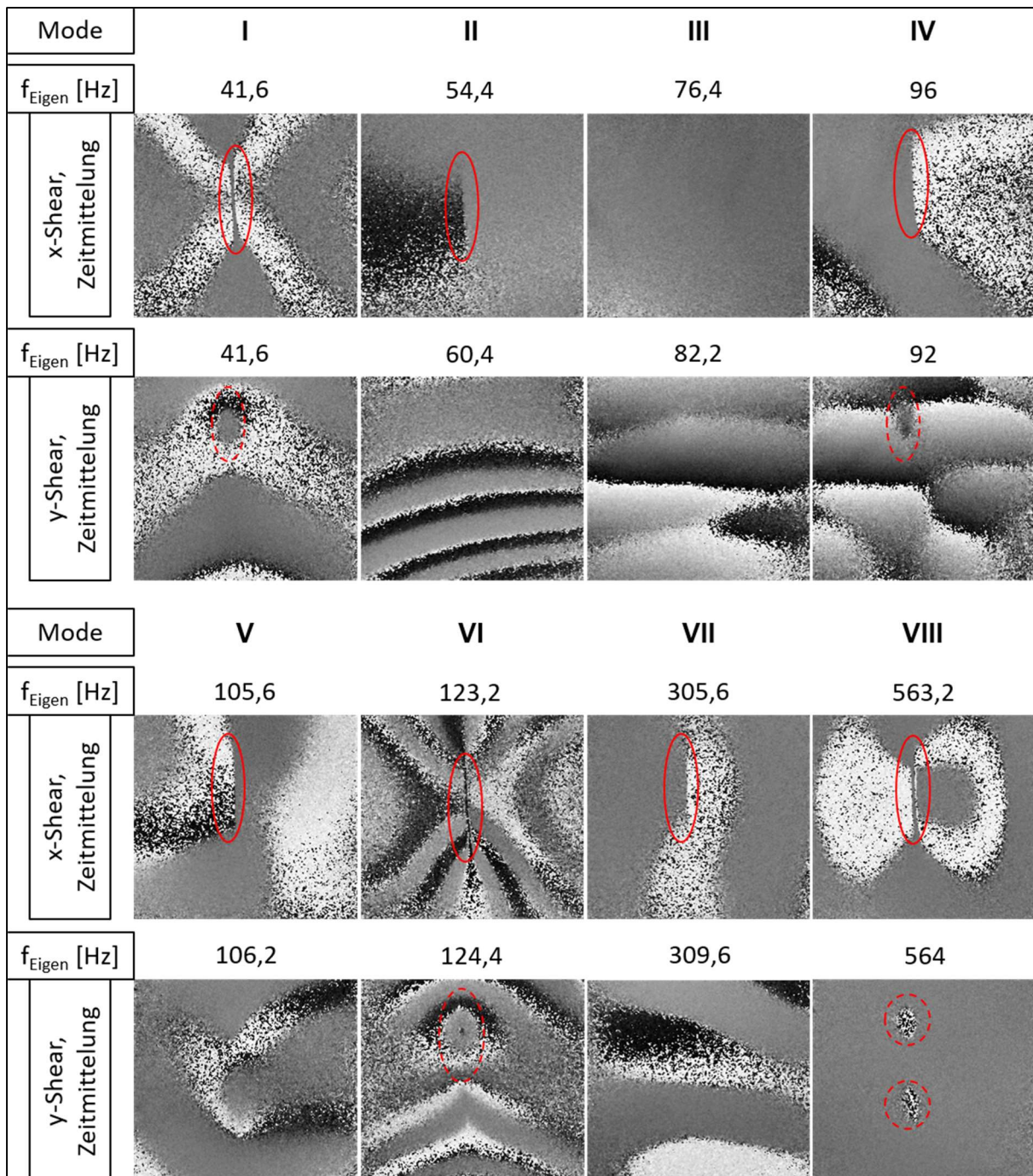


Abbildung 7.5: Zeitmittelungsshearogramme der NFK Platte nach Abbildung 7.4 links (gleicher Messbereich wie bei der thermografischen Untersuchung) unter akustischer Anregung; es können acht Moden bis 570 Hz gefunden werden. Mit Shear in x-Richtung wird der Rissindikator durch einen lokalen Grauwertsprung sichtbar, rot umkreist. Mit Shear in y-Richtung ist die Evaluation des Indikators (rot gestrichelt umkreist) schwieriger. Shear-y-Mode 8 deutet darauf hin, dass die Bereiche um die Risspitzen in Schwingung geraten.

Die Shear-x-Moden liefern die eindeutigere Anzeige für den Riss mit Verlauf in y-Richtung, was bei der DS ein typisches Phänomen ist (vgl. Kapitel 4.3.b). Aufgrund dessen werden weitere Untersuchungen mit einem Shear in x-Richtung durchgeführt. Die Kamerabelichtungszeit wird auf nur 1 Millisekunde gesenkt. Auf diese Weise kommt es zwar zur Unterbelichtung mit einer Reduktion der Tiefenauflösung, jedoch sind so zeitaufgelöste Messungen möglich (s. auch Kapitel 6.2.c). Abbildung 7.6 zeigt den Vergleich von 4 ausgewählten Zeitmittelungsshearogrammen zu den zeitaufgelösten. Letztere zeigen für

die Moden 1 und 6 einen sehr guten Phasenstreifenkontrast mit entsprechendem eindeutigen Rissindikator. Es ist zu beachten, dass Mode 6 eine Periodendauer von nur ca. 9 Millisekunden¹⁴⁷ aufweist. Das heißt bei der SPS Messung wird ca. 1/9 der periodischen Verformung erfasst, wobei es oftmals bereits zum Rauschen kommt. Dies wird für die zeitaufgelösten Shearogramme der Moden 7 und 8 deutlich. Für Mode 7 ist mehr als ein Phasensprung auflösbar, für Mode 8 knapp nur ein Sprung. Bereiche mit höherer Verformung zeigen sich durch Rauschen (s. auch [58]). Für Mode 7 kann der Indikator noch vermutet werden, für Mode 8 aufgrund des verrauschten Bereichs rechts vom Riss nicht.

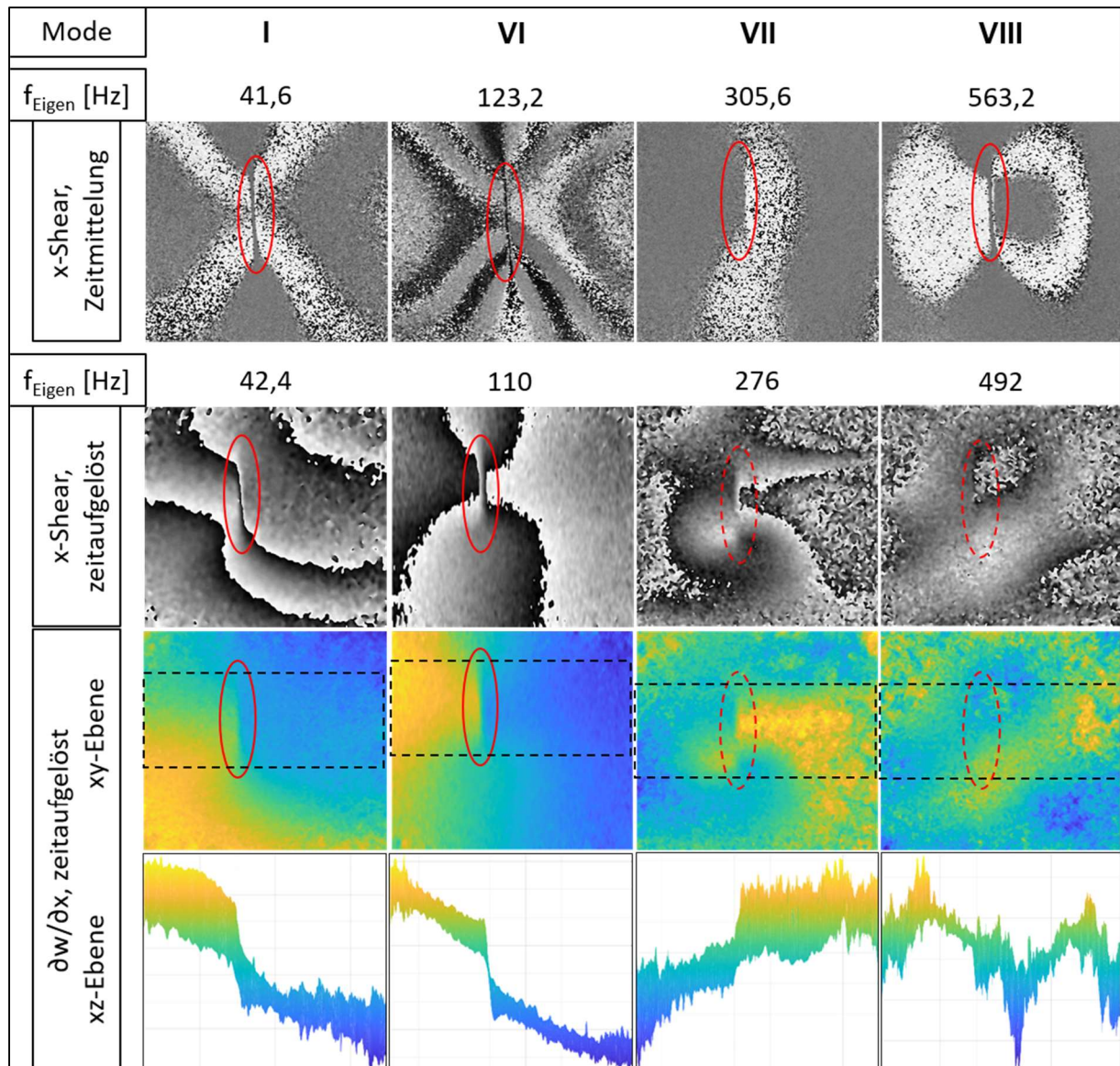


Abbildung 7.6: Zeitaufgelöste Shearogramme für vier ausgewählte Moden im Vergleich zu den Zeitmittlungs-shearogrammen aus Abbildung 7.5; durch die Belichtungszeit von nur 1 Millisekunde können höhere Phasenordnungen noch bis 110 Hz Anregungsfrequenz ausgewertet werden. Darüber hinaus tritt lokales Rauschen auf. Die Zeitauflösung lässt eine gewöhnliche Demodulation zur Evaluation des Risses zu. Für die Moden 1 bis 6 ergibt sich ein Indikator, welcher aussagekräftiger als der thermografisch erfassbare ist, vgl. Abbildung 7.4 unten rechts.

¹⁴⁷ 1 Schwingung / 110 Schwingungen pro Sekunde $\approx$ 0,009 Sekunden.

Die zeitaufgelöste, schnelle SPS Messung erlaubt eine typische Ergebnisdemodulation, s. Abbildung 7.6 dritte Zeile. Mit höherer Anregungsfrequenz nimmt das Rauschen zu und die Aussagesicherheit zur Fehlstelle ab. Dennoch zeigen die Verformungssprünge auf der xz-Ebene im Bereich des Risses für die Moden 1 und 6 die Anomalie eindeutig an. Verglichen zum thermografischen Ergebnis in Abbildung 7.4 weist der jeweilige Verlauf einen stärkeren Sprung (Signal) bei geringerem Einfluss des globalen Umfelds (Rauschen) auf. Die Aussagesicherheit der Prüfung durch den shearografisch ermittelten Indikator ist somit höher.

Darüber hinaus ist die Dauer des Messvorgangs sehr kurz, da die mechanische Schwingungsbelastung sich nahezu unmittelbar mit dem Einschalten des Lautsprechers einstellt. Automatisiert würde mittels Anregungssweep gearbeitet werden, da sich die Eigenfrequenzen allein durch Toleranzen bei der Messobjektlagerung leicht verschieben können. Innerhalb einer Anregungsfrequenz von 20 Hz bis 120 Hz sind in 0,2 Hz Schritten 6 Moden auffindbar (oben nur 2 dargestellt), welche alle einen aussagekräftigen Rissindikator liefern. Auf Kosten der Belichtungszeit, wie oben dargestellt, kann eine Kamerataktzeit von 200 Hz erreicht werden. Die 500 Messungen je Anregungsfrequenzschritt werden also in nur 2,5 Sekunden erfasst, was über 20-mal schneller als die thermografische Messdauer von 55 Sekunden ist. Hingegen muss jedoch beachtet werden, dass die Schwingungsanregung stark strukturabhängig ist. Dickere, kleinere sowie steifere Platten besitzen höhere Eigenfrequenzen, wodurch eine zeitaufgelöste Messung problematisch werden kann. Darüber hinaus spielt die Risslänge, -position und -orientierung ebenfalls eine entscheidende Rolle für den periodisch-akustisch erzeugbaren Fehlstellenkontrast (s. Kapitel 6). Kürzere Risse sind mit höheren Anregungsleistungen und ggf. nur in höherfrequenten Schwingungsmoden detektierbar. Für Risse im Randbereich des Messobjektes muss ggf. die Messobjekt-Lagerung angepasst werden. Die Problematik, die sich durch die Orientierung des Risses ergibt, kann mittels dual-shear gelöst werden (s. Kapitel 4.3.b). Falls eine zeitaufgelöste Messung nicht möglich ist, könnten auch automatische Evaluationsalgorithmen für Zeitmittelungsshearogramme entwickelt werden (s. auch Kapitel 8.1.b).

7.3.b.MZ 4f, Waben-Komposit Platte, Schlagschäden, mechanisch

Anhand des folgenden Versuchs wird die Leistungsfähigkeit des MZ Messgeräts mit 4f Modul für große Messobjekte aufgezeigt. Dabei wird keine vollständige ZfP-Betrachtung oder Evaluation angestellt. Stattdessen wird der praktische Einsatz der DS für große und kleine Messflächen verglichen, um das Potential für automatisierte Messungen zu erörtern.

Abbildung 7.7 oben zeigt die Specklebildaufnahme¹⁴⁸ einer 1400 mm breiten und 1220 mm hohen Waben-Komposit Platte. Der Wabenkern hat eine Dicke von ca. 9 mm, die Gesamtdicke beträgt ca. 10 mm. Die Platte besitzt diverse Montagebohrungen und ist annähernd rechteckig, jedoch mit einigen Ausschnitten versehen, wie es in den folgenden Darstellungen erkennbar wird. Visuell sind keine Fehlstellen an der Platte feststellbar. Zur möglichst schnellen shearografischen Prüfung kommt das 4f Modul am MZ Messgerät zum Einsatz. Auf diese Weise wird die vollflächige Specklebildaufnahme nach Abbildung 7.7 oben mit einer Auflösung von 2,3 Megapixeln in einem Messabstand von nur 850 mm erfasst. Das Messgerät wird orthogonal zur oberen Kante der Platte aufgestellt, während die Platte auf dem Boden liegt. Durch die kurze Brennweite von ca. 10 mm ergibt sich typischerweise eine Bildverzerrung, wie sie an den eigentlich parallel verlaufenden Objektkanten links und rechts erkennbar ist.

¹⁴⁸ Aus Geheimhaltungsgründen sind detaillierte Bildaufnahmen sowie genauere Material- oder Strukturbeschreibungen nicht erlaubt.

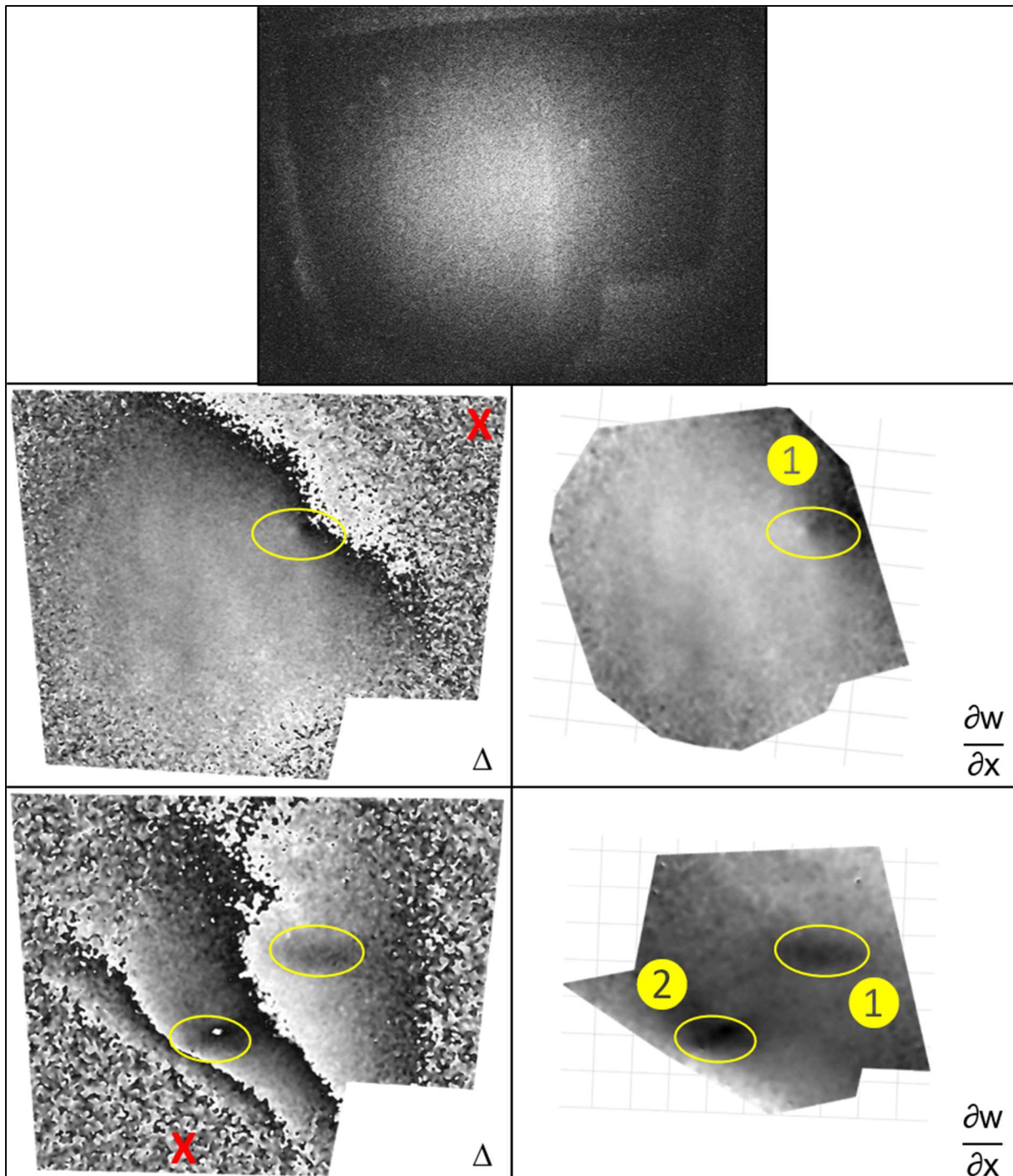


Abbildung 7.7: (Oben) Specklebildaufnahme einer 1400 mm breiten, 1220 mm hohen und 10 mm dicken Waben-Komposit-Platte, welche mittels MZ Messgerät mit 4f Modul untersucht wird; durch die geringe Objektiv-Brennweite treten Verzerrungen bei der Abbildung der rechteckigen Platte auf. Bei der Beaufschlagung einer mechanischen Belastung mittels 20 g Gewicht an verschiedenen Positionen (mit „X“ markiert) fallen insgesamt zwei Fehlstellenindikatoren „1“ und „2“ auf, s. mittlere und untere Zeile, gelb markiert. Aufgrund von Verkippungen der eben aufliegenden, leicht tordierten Platte bei der Belastung kommt es zum Verrauschen der Randbereiche.

Die Plattenoberfläche ist schwarz-matt, sodass mit dem stark aufgeweiteten, lediglich 23 mW starken Laser eine Kamerabelichtungszeit von 0,4 Sekunden eingestellt werden muss. Eine ausreichend starke und vollflächige thermische Messobjektbelastung würde eine sehr hohe Anregungsleistung erfordern. Darüber hinaus haben Versuche gezeigt, dass die geringe Wärmeleitfähigkeit des Materials eine hohe Messdauer von ca. 60 Sekunden bei einer thermografischen Prüfung zur Folge hat. Reproduzierbare

Nachmessungen sind entsprechend erst nach noch längeren Abkühlzeiten möglich. Aus diesem Grund wird stattdessen eine mechanische Belastung durch das Auflegen eines 20 g Gewichts an diversen Positionen beaufschlagt. Der Shearbetrag in x-Richtung beträgt ca. 10 mm, da die Einstellung kleinerer Werte aufgrund der Bildverzerrung und der großen Messbreite problematisch ist (s. auch Kapitel 2.6.b).

Abbildung 7.7 mittig und unten zeigen zwei ausgewählte Messergebnisse für zwei von zehn verschiedenen Belastungspositionen am Messobjektrand (mit „X“ markiert). Innerhalb der zehn Ergebnisse fallen insgesamt zwei Anomalien auf (gelb markiert), welche in den Demodulationsergebnissen als Fehlstellenindikatoren „1“ und „2“ bezeichnet werden. An den Randbereichen sind die Shearogramme je nach Belastungsposition z. T. verrauscht. Dies resultiert vor allem aus der leicht unebenen Platte, welche bei der Belastung verkippt und lokal hohe Verformungen erfährt. Nichtsdestotrotz kann aufgrund der geringen lateralen Auflösung eine stark erhöhte Robustheit¹⁴⁹ gegen Dekorrelation bei der manuellen Belastungsbeaufschlagung festgestellt werden, wie in Kapitel 2.6.d erläutert. Darüber hinaus liegt die Objektivfokusebene auf der Oberkante der Platte, wodurch beispielsweise die Unterkante unscharf abgebildet wird. Ebenso ist der Beobachtungswinkel nur an der Oberkante orthogonal zur Platte, wodurch die oop Verformungen der Platte auch in Messanteile hervorrufen, welche Dekorrelationen begünstigen.

Die Platte wird nun mit einer höheren lateralen Auflösung untersucht. Dazu wird das MZ Messgerät mit einer 25 mm Objektivbrennweite ausgestattet und das 4f Modul demontiert. Die Platte wird unterteilt in acht überlappende Messflächen mit einer Breite von 450 mm und einer Höhe von 400 mm (exkl. Überlappungsbereiche), während der Messabstand auf ca. 1370 mm erhöht und der Shearbetrag wieder auf 10 mm eingestellt wird. Abbildung 7.8 zeigt die Zusammenstellung der separat erfassten Shearogramme, jeweils für die aussagekräftigste Belastungsposition (nicht dargestellt). Zur Prüfung der Randbereiche können nun Belastungspositionen gewählt werden, welche dort höhere Verformungen verursachen. Die so entstehenden höheren Streifenkonzentrationen können ohne Auflösungsdekorrelation erfasst werden. Es zeigen sich vier Anomalien, welche mit größeren Bohrungen korreliert werden können (grün markiert). Sie werden von der weiteren Betrachtung durch eine entsprechende Maskierung ausgeschlossen, wie im zusammengestellten Demodulationsergebnis nach Abbildung 7.9 erkennbar. Darüber hinaus sind drei Anomalien erkennbar (gelb markiert), welche im zusammengestellten Demodulationsergebnis als Fehlstellenindikatoren „3“ und „4“ bezeichnet werden. Die Positionen der Indikatoren „1“ und „2“ aus Abbildung 7.7 sind ebenfalls angedeutet (gelb gestrichelt). Der Abstand aller Indikatoren „1“ bis „4“ zum nächsten Indikator beträgt mindestens 150 mm, wodurch sichergestellt ist, dass es keine Überlagerungen bei den Messungen gibt. Es fällt auf, dass der Indikator „1“ im Überlappungsbereich von vier Shearogrammen liegt. Die Shearogramme sind jeweils am Bildrand verrauscht und die Demodulation nicht fehlerfrei möglich, wodurch der Indikator hier nicht feststellbar ist. Darüber hinaus ist Indikator „2“ trotz der lokal ausreichenden Messqualität nicht sichtbar, da die Belastungsposition bei der Messung so gewählt wird, dass der Indikator „4“ stärker hervortritt. Hingegen sind die beiden Indikatoren „3“ und „4“ nicht in den Messungen mit 4f Modul feststellbar. Dies ist vor allem auf die erhöhte kleinste detektierbare Fehlstellengröße zurückzuführen, s. Kapitel 6.1.c.

¹⁴⁹ Der Dekorrelationsgrenzwert beträgt knapp 0,4 mm.

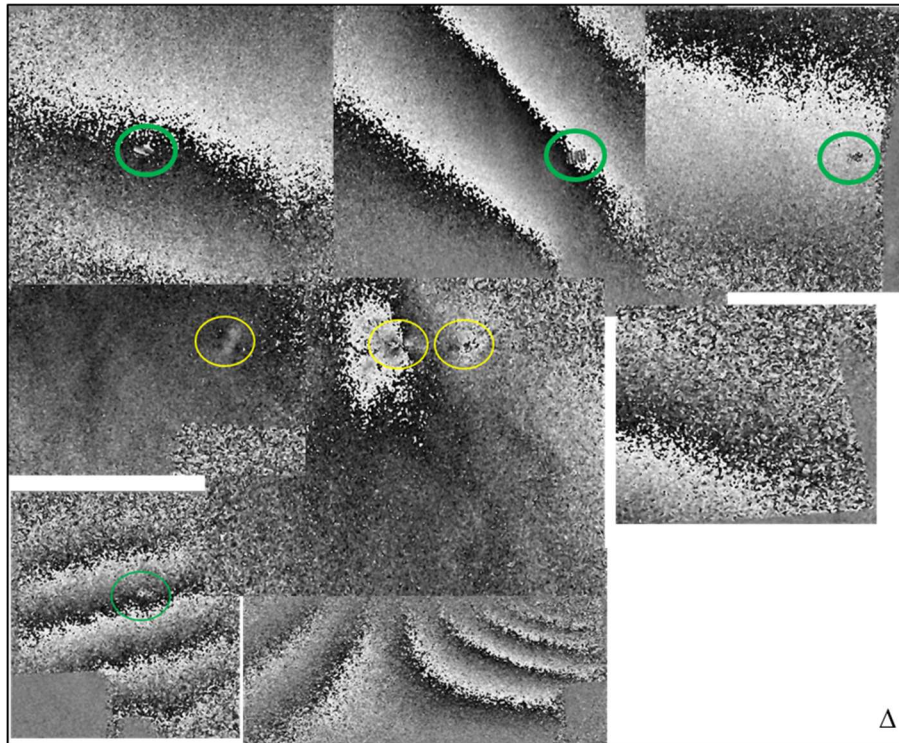


Abbildung 7.8: Aus acht Messungen zusammengestelltes Shearogramm der Platte nach Abbildung 7.7 oben; die Messflächen betragen ca. 450 mm x 400 mm, jeweils ohne Überlappungsbereich. Durch die höhere laterale Auflösung zeigen sich nun vier Anomalien (grün markiert) aufgrund von Bohrungen in der Platte, welche von der Fehlstellen-Prüfung ausgeschlossen werden müssen. Darüber hinaus zeigen sich 3 weitere Anomalien (gelb markiert), die weiter untersucht werden.

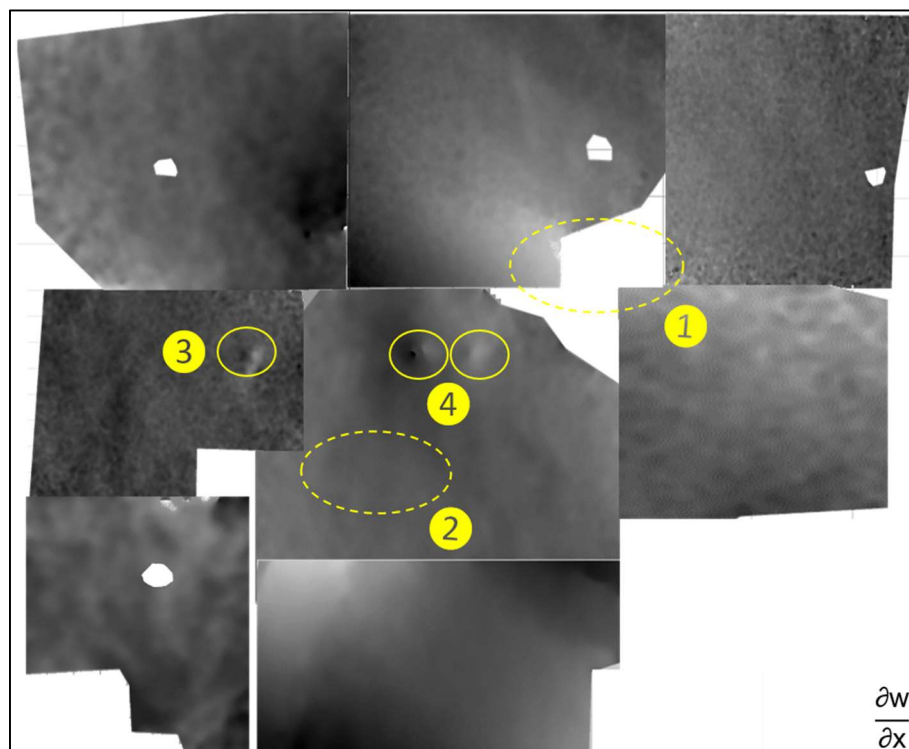


Abbildung 7.9: Zusammengesetztes Verformungsergebnis aus dem Shearogramm nach Abbildung 7.8; es werden zwei weitere Fehlstellenindikatoren „3“ und „4“ definiert (gelb markiert). Die Position der Indikatoren „1“ und „2“ wird dargestellt (gelb gestrichelt). Indikator „1“ ist aufgrund von Rauschen in den Überlappungsbereichen nicht detektierbar. Indikator „2“ zeigt keinen Ausschlag aufgrund der gewählten Belastungsposition zugunsten der Sichtbarkeit von Indikator „4“.

Die Bereiche mit Fehlstellenindikator werden abschließend mit einer 400 mm breiten und 250 mm hohen Messfläche untersucht, wobei der Messabstand auf ca. 600 mm reduziert wird. Der Shearbetrag wird zur verbesserten Darstellung kleinerer Fehlstellen auf 5 mm gesenkt. Abbildung 7.10 zeigt die Ergebnisse für die vier Indikatoren, jeweils für die aussagekräftigste Belastungsposition (nicht dargestellt).

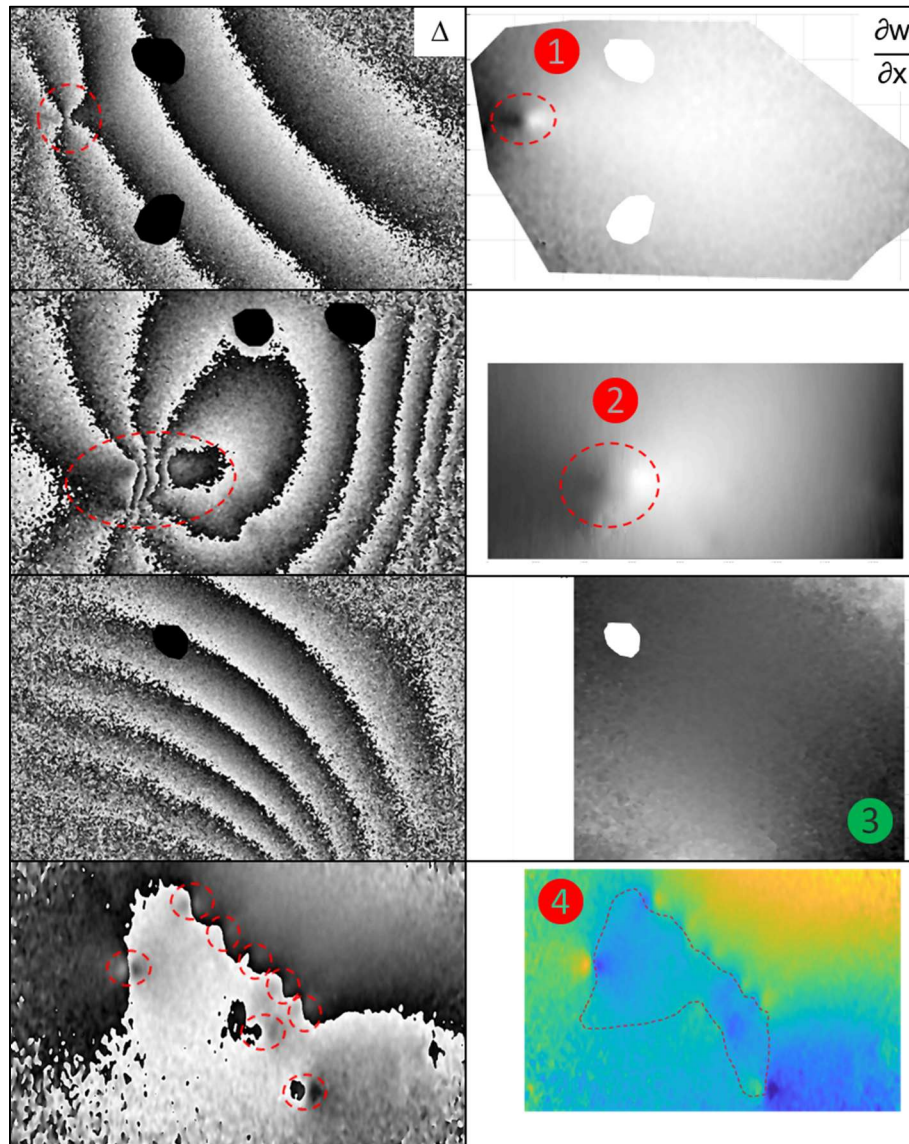


Abbildung 7.10: Nachmessungen mit einer kleinen Messfläche von ca. 400 mm x 250 mm für die vier Bereiche mit Fehlstellenindikator aus Abbildung 7.7 und Abbildung 7.9, Shearogramme links, Verformungsergebnisse rechts; die Indikatoren „1“ und „2“ können bestätigt werden. Der Indikator „3“ ist nicht detektierbar. Hier wird ein Messfehler vermutet. Der Indikator „4“ zeigt für die kleinere Messfläche ein komplexes Verformungsbild, welches auf einen größeren Schaden vermuten lässt (rot gestrichelt markiert). Als Fehlstellen in der Platte werden Schlagschäden vermutet.

Insgesamt ist feststellbar, dass auch höhere Streifenkonzentrationen mit hohem Kontrast erfasst werden können. Es zeigen sich weitere Anomalien durch kleinere Bohrungen in den Shearogrammen, welche mittels Maske ausgeschlossen werden müssen. Die Fehlstellenindikatoren „1“ und „2“ aus der Messung mit dem 4f Modul können durch die Messung mit der kleinen Messfläche bestätigt werden. Der Fehlstellenindikator „3“ aus der Messung mit der größeren Messfläche ist hingegen nicht nachweisbar. Es wird ein Messfehler vermutet, was beispielsweise mittels Röntgen bestätigt werden

könnte. Für den Fehlstellenindikator „4“ aus der Messung mit der größeren Messfläche zeigt sich für die kleine Messfläche ein interessantes Verformungsergebnis. Insgesamt werden acht benachbarte shearografische Fehlstellenindikatoren sichtbar, welche auf einen größeren Schaden schließen lassen (rot gestrichelt im Verformungsergebnis markiert).

Als Fehlstellen, welche die drei Indikatoren „1“, „2“ und „4“ verursachen, werden Schlagschäden vermutet. Mittels thermografischer Prüfungen können die drei Fehlstellen bei einer Messdauer von je ca. 60 Sekunden bestätigt werden. Shearografische Prüfungen mit thermischer Anregung sind nicht möglich. Bei einer stehenden Platte führt die Wärmeausdehnung der Platte zur ip Verschiebung und damit zu starkem Rauschen. Bei einer liegenden Platte ergibt sich ein die Messung stark störender Effekt durch die Wärmeschlieren.

Vergleichend zwischen großen und kleinen Messflächen bei der shearografischen Prüfung können folgende Vor- und Nachteile für große Messflächen festgehalten werden. Die Auflistung erfolgt jeweils mit sinkender Priorität.

- + Es sind sehr **schnelle Bewertungen** großer Messobjekte möglich. Während in Abbildung 7.7 bereits in der ersten Messung ein Fehlstellenindikator sichtbar wird, wären mit einer rasternden¹⁵⁰ Messung mit der kleinsten Messfläche nach Abbildung 7.10 zumindest sieben Messungen notwendig. Sofern bereits eine Fehlstelle zum Ausschuss des Bauteils führt, wie es in der Automobilindustrie z. T. üblich ist, wäre die Prüfung mit der großen Messfläche 7-mal schneller erfolgt.
- + Für eine thermische Belastung ergeben sich **keine langen Abkühlzeiten**, wie es für mehrere benachbarte Messungen mit kleiner Messfläche nötig ist, um eine einheitliche Anregungsmechanik zu gewährleisten, s. Kapitel 6.2.
- + **Große Fehlstellen** können eindeutig identifiziert werden, während sie mit kleinen Messflächen z. T. nur durch eine Ergebnis-Zusammenstellung mit visueller Evaluation feststellbar sind.
- + Die **globale Verformung** bei kleinen Messflächen lässt nur wenige Rückschlüsse auf Anomalien zu, während sie mit großen Messflächen übergeordnet bewertet werden kann.
- + Der **Maskierungsaufwand** ist **geringer**, da kleine geometrische Merkmale wie Bohrungen oder Abschattungsbereiche nicht aufgelöst und in der Messung geglättet dargestellt werden.
- Zur Ausleuchtung sind **starke Laser** notwendig, was die Systemkosten und die Lasersicherheitsanforderungen steigert. Alternativ muss mit hohen Belichtungszeiten gearbeitet werden, wodurch die Verfahrensrobustheit stark abnimmt, s. Kapitel 2.6.d und 2.6.e.
- **Hohe Anregungsleistungen** zur homogenen, vollflächigen Belastung sind notwendig, ggf. auch große Anregungseinheiten (z. B. Unterdruckkammer). Bei der thermischen Belastung kann eine lokale Anregungseinheit kontinuierlich Verfahren werden, wobei jedoch eine aufwändige Messprozedur notwendig ist (zeitlich-synchronisierte Messung des angeregten Messflächenanteils).
- Die **kleinste detektierbare Fehlstellengröße** ist **herabgesetzt**, wodurch ggf. nicht alle Fehlstellen detektierbar sind, vgl. Kapitel 6.1.c.
- Höhere Belastungen sorgen schneller für **Auflösungsdekorrelation**, wodurch der maximale Fehlstellenkontrast ggf. nicht erfassbar ist, s. Kapitel 6.1.a. Darüber hinaus treten optische **Abbildungsfehler** verstärkt auf, was die Ergebnisqualität herabsetzt.
- Bei kleinen Messflächen kann die **Anregungsmechanik** je Messobjektposition variiert werden, beispielsweise wenn komplexe 3D-geformte Objekte mit verschiedenen Steifigkeitsbereichen vorliegen (Fahrzeugkarosserie, Flugzeug-Außenhaut etc.).

Abschließend sei für den Messversuch oben angemerkt, dass aufgrund der schnellen mechanischen Anregung eine optimierte robotergeführte Messung mit kleiner Messfläche nicht ausschlaggebend viel länger gedauert hätte als die vollflächige Messung mit dem 4f Modul. Die Messqualität hingegen fiel

¹⁵⁰ Von oben links nach unten rechts, typischerweise inkl. Überlappungsbereiche.

dann um ein Vielfaches höher aus. Mittels einer digitalen Ansteuerung der Brennweite und der Fokuseinstellung am Objektiv (s. Kapitel 8.1.a) könnte zudem eine vollflächige und eine anschließende rasternde Messung kombiniert werden. Auf diese Weise wären die Vorteile beider Messungen bei minimal erhöhter Messdauer nutzbar.

In Anbetracht der physikalischen Sensitivitätsgrenze der Speckle-Messtechniken, s. Kapitel 2.6.a, sei nochmals auf den praktisch beschränkten Messbereich hingedeutet, s. Kapitel 2.6.b. Seitens des Autors wird ebenfalls eine physikalische Obergrenze vermutet, welche die Messfläche auch bei Überwindung der praktischen Hürden (Laserleistung, optische Abbildung, Umgebungsbedingungen) beschränkt. Hierzu werden systematische Untersuchungen angeraten, bevor kostspielige Anschaffungen erworben werden.

7.3.c. MZ 3D, Aluminiumstrebe und Keramikbecher, Bruch/Risse, mechanisch/thermisch

Um die gesteigerten Auswertemöglichkeiten durch die 3D ESPSI Methode bei der shearografischen Prüfung aufzuzeigen, werden im Folgenden zwei anschauliche Messergebnisse vorgestellt. In beiden Fällen sind die Fehlstellen, ein Bruch bzw. Risse mit unterschiedlicher Orientierung, z. T. visuell erkennbar. Für eine automatische Fehlstellendetektion mittels einfacher Kamerabilderfassung und nachgeschalteten Bildverarbeitungsalgorithmen bedeutet dies jedoch noch nicht, dass die Fehlstellen sicher aufgefunden werden können. Hier spielen eine passende Belichtung sowie eine saubere Oberfläche die entscheidende Rolle. Darüber hinaus können Fehlstellen, die eine Auswirkung auf die technisch relevante Bauteilsteifigkeit haben, nicht von oberflächlichen Kratzern bzw. „Schönheitsfehlern“ unterschieden werden. Hier kommt die shearografische Prüfung zum Einsatz. Mittels 3D ESPSI sind erstmals auch dynamische ip Messungen möglich, wie für das zweite Beispiel mit thermischer Belastung dargestellt.

Aluminiumstrebe, mechanische Belastung

Abbildung 7.11 oben links zeigt eine ca. 83 mm hohe, 55 mm breite und 4 mm dicke Aluminiumstrebe, welche an einem Motorrad den Zylinderkopf mit der Rahmenstrebe unter dem Tank befestigt. Zur shearografischen Prüfung wird die Strebe an der Bohrung oben links mittels Schraube eingespannt, während an der unteren Bohrung eine Gewichtskraft angehängen wird. Auf diese Weise wird eine betriebsähnliche Verformung der Strebe hervorgerufen. Die Strebe wird von oben mit rotem und von unten mit blauem Laser beleuchtet¹⁵¹.

Abbildung 7.11 oben mittig und oben rechts zeigt die beiden erfassten Shearogramme mit Shear in y-Richtung. Unterhalb der Bohrung oben links tritt jeweils eine erhöhte Streifenkonzentration auf. Darüber hinaus zeigt sich ein inhomogener Streifenverlauf rechtsseitig am Mittelsteg zwischen den beiden oberen Bohrungen. Durch die Demodulation der beiden Shearogramme und Addition der Ergebnisse kann die reine oop Verformung nach Abbildung 7.11 unten links berechnet werden. An der Stelle der erhöhten Streifenkonzentration fällt lokal eine starke Erhöhung der Biegung auf. Die Biegung am Mittelsteg ist ebenfalls leicht inhomogen über dessen Höhe. Global gesehen verbiegt sich die Strebe von der Einspannstelle aus im Uhrzeigersinn immer stärker, vermutlich da die Belastung nicht rein in-plane eingeleitet wird.

¹⁵¹ Reduzierte Version der 3D RGB Beleuchtung, um die Messsensitivität für den relevanten Verformungsanteil zu maximieren, s. auch Kapitel 5.1.b.

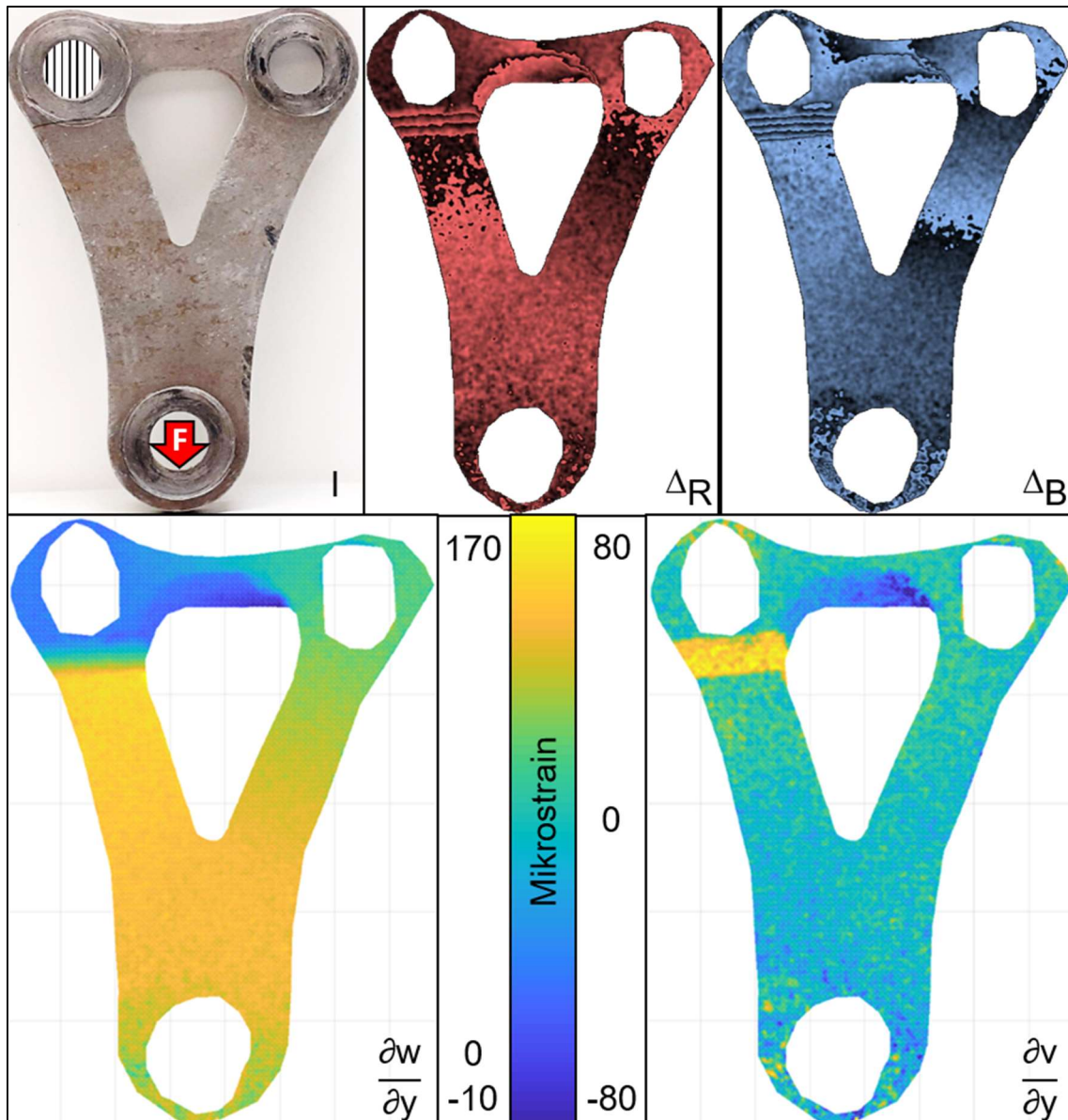


Abbildung 7.11: Eine 83 mm hohe, 55 mm breite und 4 mm dicke Aluminiumstrebe (oben links) wird an der Bohrung oben links mittels Schraube geklemmt und in der Bohrung unten mittels Gewichtskraft belastet. Für eine vertikale Beleuchtungssituation mit zwei Lasern ergeben sich zwei Shearogramme (oben mittig, roter Laser; oben rechts, blauer Laser). Unterhalb der Bohrung oben links und rechtsseitig am Mittelsteg sind erhöhte Streifenkonzentrationen feststellbar. In diesem Bereich weist das Messobjekt einen Bruch auf, vgl. mit Abbildung oben links. Das oop Verformungsergebnis (unten links) zeigt eine starke Biegungsänderung im Bereich der höheren Streifenkonzentration. Das ip Verformungsergebnis (unten rechts) zeigt ausschließlich für die Bereiche mit höherer Streifenkonzentration eine Dehnung und ist damit aussagekräftiger bzgl. der Fehlstellenanzeige.

Durch die Demodulation der beiden Shearogramme und Subtraktion der Ergebnisse kann die reine ip Verformung nach Abbildung 7.11 unten rechts berechnet werden, hier die Dehnung in y-Richtung. Zunächst fällt auf, dass das Ergebnis stärker verrauscht ist. Dies ist für ip Ergebnisse typisch, da die Sensitivität für oop Messungen oftmals doppelt so hoch ist wie für ip Messungen, s. Kapitel 2.4.b. Global gesehen weist die ip Verformung einen Wert von 0 auf. Einzig der Bereich unterhalb der Bohrung oben links und der Bereich am Mittelsteg zeigen abweichende Werte an. Unterhalb der Bohrung ist visuell ein Bruch des linken Stegs detektierbar. Bei der Gewichtskraftbelastung der Strebe ergibt sich dort demnach eine positive Dehnung, da der linke Steg der Kraftleitung keine Steifigkeit entgegenhalten kann.

Stattdessen stützt er sich am rechten Steg ab, was sich im Bereich des höchsten Hebelarms nahe der Einspannstelle im eher schmalen Mittelsteg durch eine Stauchung bemerkbar macht.

Der Indikator für den Bruch ist, verglichen zum shearografischen Schmetterlingsmuster (s. Kapitel 2.5.f), eher untypisch. Weitere Betrachtungen zur Deutung werden im folgenden Kapitel 7.3.d angestellt. Eine automatische Evaluation für oop Messungen müsste gezielt auf diese Art der Fehlstelle hin optimiert werden. Die typische, lineare Trendbereinigung wird ihren Zweck einer verbesserten Fehlstellen-Sichtbarkeit hier ebenfalls nicht erfüllen (s. Kapitel 2.5.e), da die Biegung im oop Ergebnis rotativ anwächst. Im Gegensatz dazu bietet das ip Verformungsergebnis im Falle des Bruchs eine sehr einfache Auswertemöglichkeit. Der Bruchbereich wird sprunghaft mit einem hohen Wert (Signal) angezeigt, während global nahezu keine Verformung (Rauschen) feststellbar ist. Das heißt der Bruch kann durch eine einfache Grenzwertabfrage automatisch gefunden werden. Zum Phänomen des ebenfalls auffälligen Stauchungsbereichs am Mittelsteg, welcher hier ohne Fehlstelle ist, muss es zukünftig jedoch weitere Untersuchungen geben, um eine sichere Datenevaluation zu gewährleisten.

Keramikbecher, thermische Belastung

Als zweites Messbeispiel zeigt Abbildung 7.12 oben links eine Messfläche von ca. 35 mm x 55 mm eines 110 mm hohen Keramikbechers mit einem Durchmesser von 90 mm und einer Wandstärke von 5 mm. Einige schwarze Linien mit mäßigem Kontrast deuten auf Risse hin. Zur shearografischen Prüfung wird der Becher mittels Heißluftfön für ca. 2 Sekunden von Innen belastet. Anschließend wird die Verformung für weitere 2 Sekunden erfasst, während der Becher von links mit rotem und von rechts mit grünem Laser beleuchtet¹⁵² wird.

Abbildung 7.12 oben mittig und oben rechts zeigt die beiden erfassten Shearogramme mit Shear in x-Richtung. Es ist jeweils ein verzerrter, globaler Phasensprung erkennbar. Darüber hinaus zeigen sich lokal einige Sprünge und auch linienförmige Bereiche mit höherer Phasenänderung, welche z. T. mit den Rissen in der Bildaufnahme korrelieren.

Durch die Demodulation der beiden Shearogramme und Addition der Ergebnisse kann die reine oop Verformung nach Abbildung 7.12 unten links berechnet werden. Sie ist global in x- und in y-Richtung trendbereinigt. Im unteren Teil des Verformungsbildes sind drei linienförmige Bereiche negativer (schwarz) und positiver (weiß) Verformung erkennbar. Sie weisen eine lokal starke, kontinuierliche Verformungsänderung auf. Durch sie sind Rückschlüsse auf den unteren Teil der Risse in der Bildaufnahme nach Abbildung 7.12 oben links möglich.

Durch die Demodulation der beiden Shearogramme und Subtraktion der Ergebnisse kann die ebenfalls trendbereinigte ip Verformung nach Abbildung 7.12 unten rechts berechnet werden, hier die Dehnung in x-Richtung. Das Ergebnis ist verfahrensbedingt stärker verrauscht als das oop Ergebnis. Während die globale, mittlere Verformung einen Wert von 0 aufweist, zeichnen sich mehrere Bereiche mit anderen Verformungswerten ab. Die Bereiche sind begrenzt durch Linien, an denen sich der Verformungswert sprunghaft ändert und innerhalb dessen er nahezu konstant bleibt. Die Linien korrelieren über die gesamte Messfläche sehr stark mit den erkennbaren Rissen in der Bildaufnahme.

Im Gegensatz zum oop Verformungsergebnis liefert das ip Ergebnis sprunghafte statt kontinuierliche Übergänge für die Rissufer. Zur automatischen Evaluation können einfache Kantenerkennungsalgorithmen der Bildverarbeitung eingesetzt werden. Zudem lässt das ip Ergebnis Rückschlüsse auf den Rissverlauf über die gesamte Messfläche zu, was eine gesteigerte POD bedeutet.

¹⁵² Reduzierte Version der 3D RGB Beleuchtung, um die Messsensitivität für den relevanten Verformungsanteil zu maximieren, s. auch Kapitel 5.1.b.

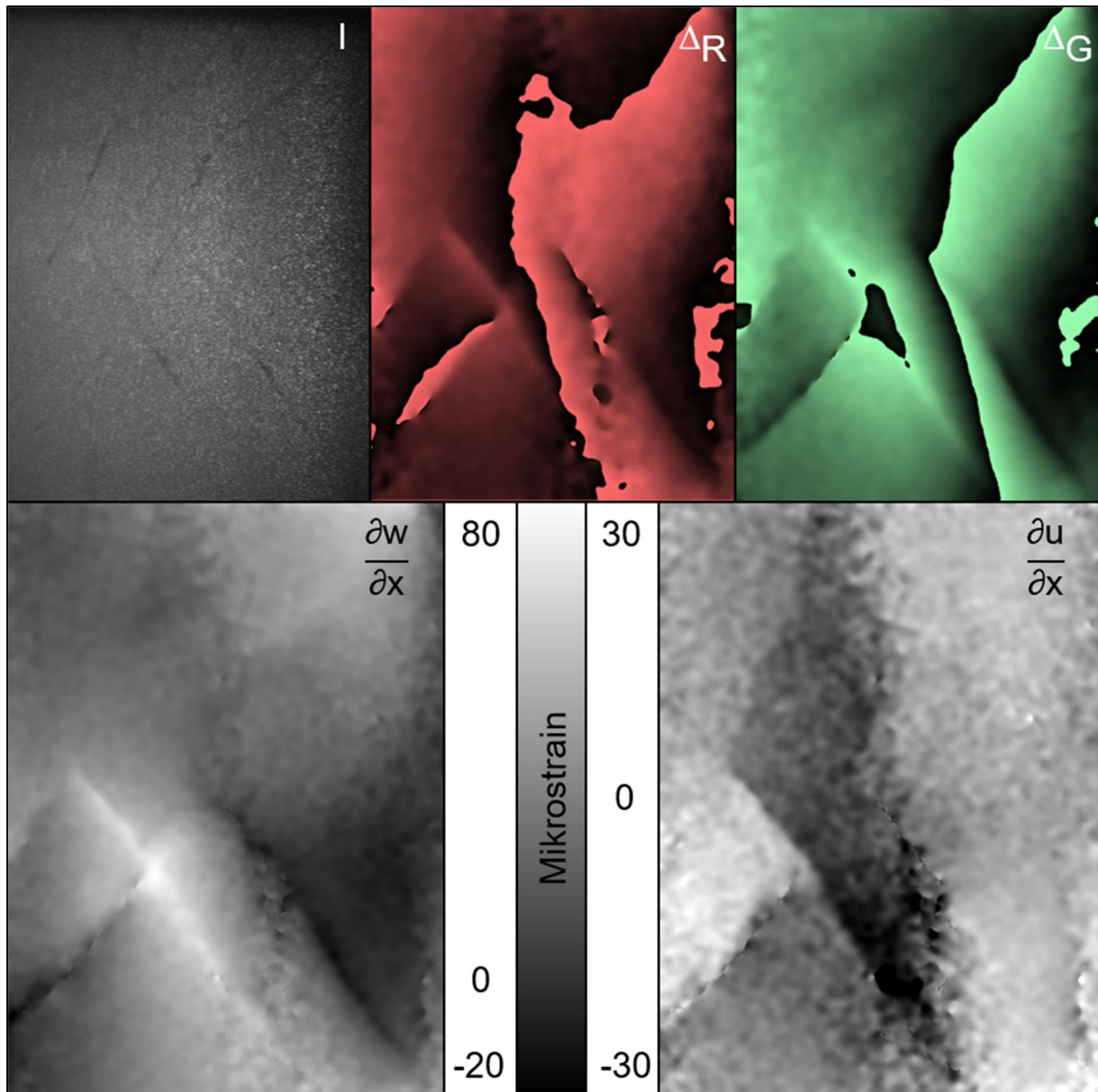


Abbildung 7.12: Ein Keramikbecher mit einer Wandstärke von 5 mm weist in einem Messbereich von ca. 35 mm x 55 mm (oben links) Risse auf. Der Becher wird von innen mittels Heißluftfön für 2 Sekunden belastet. Anschließend wird die Verformung für 2 Sekunden shearografisch erfasst. Für eine horizontale Beleuchtungssituation mit zwei Lasern ergeben sich zwei Shearogramme (oben mittig, roter Laser; oben rechts, grüner Laser). Es zeigen sich jeweils globale und lokale Phasensprünge sowie linienförmige Bereiche mit höherer Phasenänderung. Das oop Verformungsergebnis (unten links) zeigt starke, kontinuierliche Verformungsänderungen im unteren Bereich der Messfläche. Das ip Verformungsergebnis (unten rechts) zeigt sprunghafte Verformungsänderungen über die gesamte Messfläche, welche sehr stark mit den Rissverläufen im Messobjekt korrelieren, vgl. mit Abbildung oben links. Es ist damit aussagekräftiger bzgl. der Fehlstellenanzeige.

Zur sicheren automatischen Riss- und Bruchdetektion mittels DS (s. Kapitel 8.1.b) sind weitere Untersuchungen notwendig, auch im Vergleich zur dual-shear ESPSI, s. Kapitel 7.3.d.

7.3.d.MZ dual-shear (oop), Holzscheibe und Glasplatte, Risse/Bruch, thermisch

Um die Bedeutsamkeit der dual-shear Methode bei der shearografischen Prüfung aufzuzeigen, werden im Folgenden zwei anschauliche Messergebnisse vorgestellt. In beiden Fällen sind die Fehlstellen, Risse

bzw. ein Bruch mit unterschiedlicher Orientierung, z. T. visuell erkennbar. Eine shearografische Bewertung der Bauteilintaktheit ist dadurch jedoch nicht grundsätzlich zu ersetzen, wie oben bereits für die 3D ESPSI erläutert, s. Kapitel 7.3.c. Mittels dual-shear lässt sich die Messdauer zumindest halbieren. Für eine thermische Belastung, wie hier, entfällt zudem die notwendige Abkühlzeit zwischen den sonst erforderlichen zwei separaten oop Messungen in die beiden Shearrichtungen.

Holzzscheibe, thermische Belastung

Abbildung 7.13 oben links zeigt eine Holzzscheibe mit einem Durchmesser von ca. 165 mm, welche durch zu schnelle Trocknung vier radial verlaufende Risse und eine Aufklaffung oben rechts aufweist.

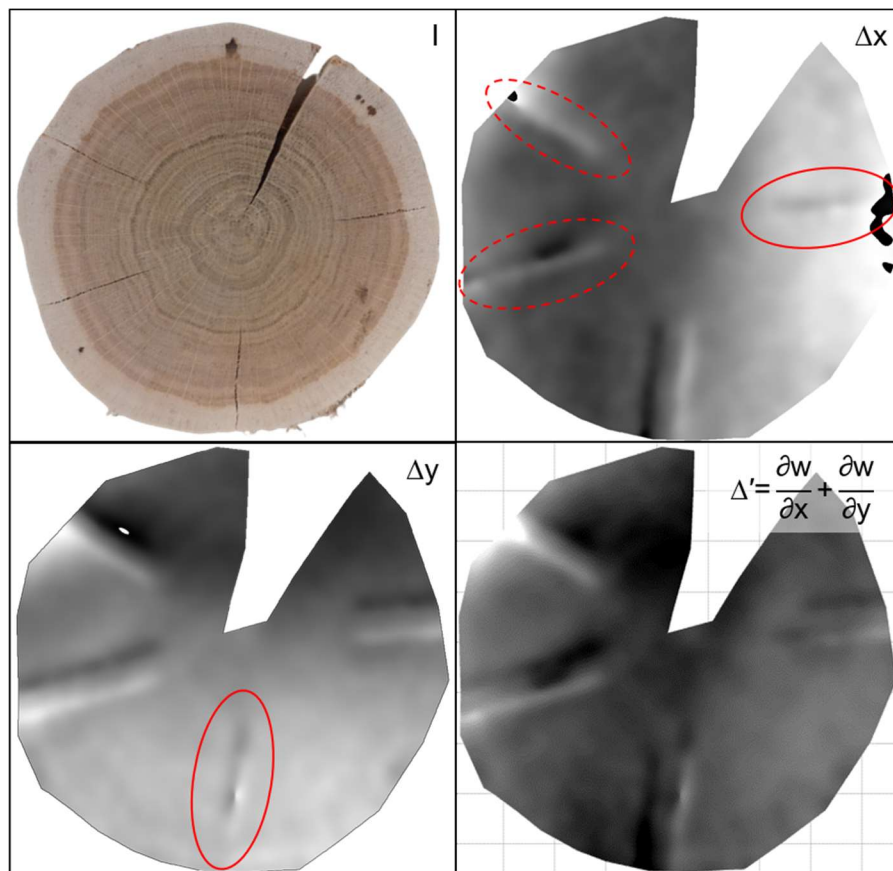


Abbildung 7.13: (Oben links) Holzzscheibe mit vier radial verlaufenden Rissen und einer Aufklaffung wird unter thermischer Belastung shearografisch geprüft; (oben rechts) oop Shearogramm mit Shear in x-Richtung zeigt die eher horizontal verlaufenden Rissindikatoren (rot markiert) nur schwach an; (unten links) oop Shearogramm mit Shear in y-Richtung zeigt den vertikal verlaufenden Rissindikator nur schwach an; (unten rechts) die Ergebnisaddition, welche mit dual-shear in nur einem Messvorgang erreichbar ist, ergibt ein Verformungsbild, in dem alle Rissindikatoren eindeutig erkennbar sind.

Abbildung 7.13 oben rechts zeigt das Shearogramm mit Shear in x-Richtung, welches beim Aufwärmen mittels Halogenstrahler erfasst wird. Die Aufklaffung muss aufgrund von Rauschen großzügig ausgeschnitten werden, damit bei der weiteren Datenverarbeitung keine Demodulationsfehler auftreten. Die vier Risse zeigen sich nahezu ohne Sprung jeweils durch eine lokale Phasenänderung. Dieser Indikator ist für den horizontalen Riss rechts nahezu unsichtbar und für die beiden Risse links nur sehr schwach ausgeprägt. Für den vertikalen Riss unten, welcher orthogonal zur Shearrichtung verläuft, zeigt sich ein gut sichtbarer Indikator. Abbildung 7.13 unten links zeigt das Shearogramm mit Shear in y-Richtung, welches mittels dual-shear gleichzeitig zum Shearogramm mit Shear in x-Richtung erfasst

wird. Hierbei ist der Indikator des Risses unten nahezu unsichtbar, alle anderen Rissindikatoren sind dagegen gut sichtbar. Abbildung 7.13 unten rechts zeigt die Addition der Demodulationsergebnisse beider Shearogramme. In dieser sind alle Indikatoren eindeutig sichtbar, wodurch ein sicherer Rückschluss auf die vier Risse in der Holzscheibe möglich ist.

Glasplatte, thermische Belastung

Als zweites Messbeispiel zeigt Abbildung 7.14 oben links das Bild einer 150 mm x 100 mm Glasplatte mit einer Dicke von 5 mm unter Laserbeleuchtung. Die Oberfläche wird zur Prüfung weiß-matt beschichtet.

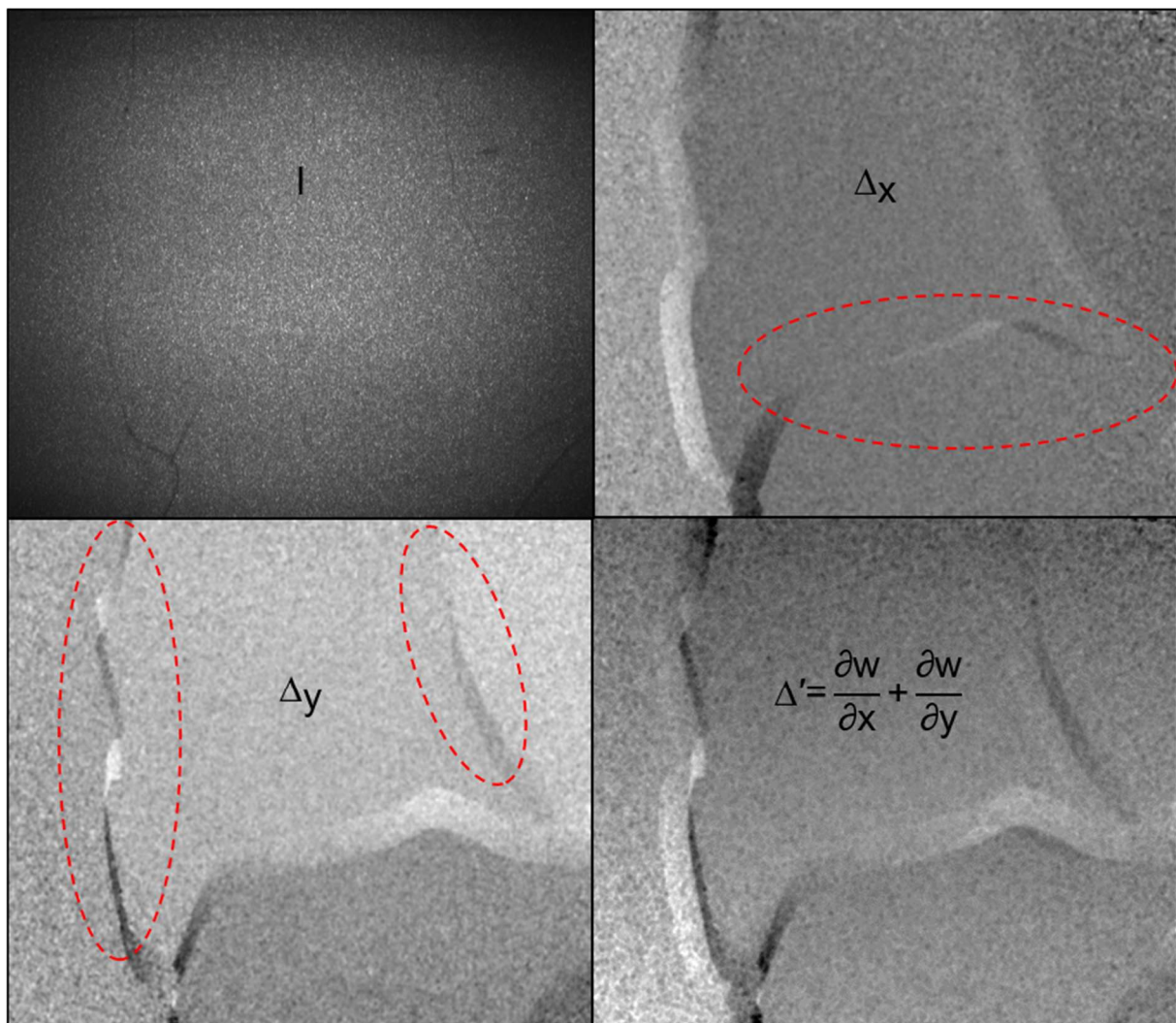


Abbildung 7.14: (Oben links) beschichtete Glasplatte mit komplexem Bruchverlauf wird unter thermischer Belastung shearografisch geprüft; (oben rechts) oop Shearogramm mit Shear in x-Richtung zeigt den horizontal verlaufenden Anteil des Bruchindikators (rot markiert) nur schwach an; (unten links) oop Shearogramm mit Shear in y-Richtung zeigt die vertikal verlaufenden Anteile des Bruchindikators nur schwach an; (unten rechts) die Ergebnisaddition, welche mit dual-shear in nur einem Messvorgang erreichbar ist, ergibt ein Verformungsbild, in dem der gesamte Bruchindikator eindeutig erkennbar ist.

Einige schwarze Linien mit mäßigem Kontrast deuten auf den Bruch hin. Abbildung 7.14 oben rechts zeigt das Shearogramm mit Shear in x-Richtung, welches beim Aufwärmen mittels Infrarotstrahler er-

fasst wird. Es zeigen sich längliche Phasenanomalien mit komplexem Verlauf über die gesamte Messfläche, was ein Indikator für einen zusammenhängenden Bruch ist. Der Indikator ist im horizontal verlaufenden Bereich z. T. nur sehr schmal und weist eine schwache Phasenänderung auf. Ein sicherer Rückschluss auf den Bruchverlauf ist hier nicht möglich. Für horizontal verlaufende Bereiche besitzt der Indikator hingegen größere laterale Abmaße und weist eine stärkere Phasenänderung auf. Abbildung 7.14 unten links zeigt das Shearogramm mit Shear in y-Richtung, welches mittels dual-shear gleichzeitig zum Shearogramm mit Shear in x-Richtung erfasst wird. Hierbei ist der Indikator für die beiden vertikal verlaufenden Bereiche nur schwach ausgeprägt, während er im horizontal verlaufenden Bereich gut sichtbar ist. Abbildung 7.14 unten rechts zeigt die Addition der Demodulationsergebnisse beider Shearogramme. Der Indikator ist über die gesamte Messfläche eindeutig erkennbar, wodurch ein sicherer Rückschluss auf den Bruchverlauf in der Glasplatte möglich ist.

Betrachtung zum shearografischen Riss- bzw. Bruchindikator

Abschließend zu diesen beiden Messergebnissen sei eine allgemeine, kurze Betrachtung zu Rissen bzw. Brüchen bei der shearografischen Prüfung angestellt. Risse und Brüche stellen eine besondere Form der Fehlstelle dar und sind nicht nur mittels DS schwer detektierbar. Allgemein werden Fehlstellen im Shearogramm aufgrund des versheararten Bilds doppelt dargestellt, wobei sich normalerweise ein Überlappungsbereich ergibt, s. dazu Kapitel 6.1.c. Im Falle von Rissen und Brüchen, deren Breite gegen 0 tendiert, wird der Riss- bzw. Bruchbereich im Abstand vom Shearbetrag doppelt sichtbar. Insgesamt resultiert dann bei orthogonalem Shear ein Fehlstellenindikator, welcher von einer Fehlstelle mit einer Breite des Shearbetrags nicht direkt unterschieden werden kann. Beispielsweise sei hier auf den Indikator der Nut (repräsentativ für eine längliche Delamination) verwiesen, s. dazu Kapitel 4.3.b Abbildung 4.24.

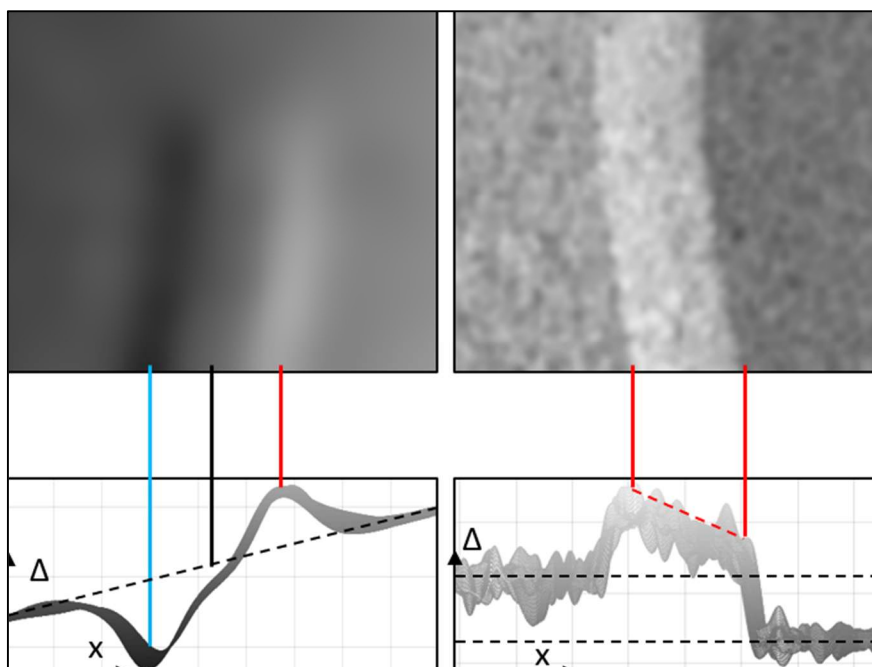


Abbildung 7.15: Darstellung zum Rissindikator im oop Shearogramm für die Holzscheibe nach Abbildung 7.13 (links) und zum Bruchindikator für die Glasplatte nach Abbildung 7.14 (rechts). Durch die Vershearung wird der Riss bzw. Bruch verdoppelt durch zwei Linien dargestellt, welche den Abstand des Shearbetrags zueinander aufweisen. Der Riss im Holz verursacht an den beiden Linien eine kontinuierliche negative und positive Phasenwertänderung um den globalen Phasenwert. Der Bruch im Glas verursacht zwischen den beiden Linien eine sprunghafte Phasenwertänderung gegenüber dem globalen Phasenwert.

Im Falle der Holzscheibe zeigen sich Risse durch eine schwarze und eine weiße Linie, also eine negative und eine positive Verformung, wie es beim shearografischen Fehlstellenindikator typisch ist (s. auch Kapitel 2.5.f). Der Bereich zwischen den beiden Linien ist grau und damit dem globalen Phasenwert entsprechend, s. Abbildung 7.15 links. Im Falle der Glasplatte zeigt sich der Bruch durch den Bereich zwischen den beiden Linien. An den Linien selbst existiert keine kontinuierliche Phasenänderung wie bei der Holzscheibe. Stattdessen ändert sich die Phase sprunghaft für den Zwischenbereich und springt für den darauffolgenden Bereich wieder auf einen globalen Grauwert zurück, s. Abbildung 7.15 rechts. Für stärkere Verformungen ergeben sich linienförmige Phasenstreifen in dem Zwischenbereich, s. dazu Kapitel 6.2.b Abbildung 6.7, wodurch eine Demodulation unmöglich wird. Der Unterschied der Indikatorscheinung zwischen Holzscheibe und Glasplatte resultiert daraus, dass die beiden Rissufer bei der Holzscheibe zusammenhängend, die Bruchufer bei der Platte gänzlich voneinander getrennt sind bzw. die Platte zerbrochen ist. Zur sicheren automatischen Riss- und Bruchdetektion mittels DS (s. Kapitel 8.1.b) sind weitere Untersuchungen zu diesem Phänomen notwendig, auch im Vergleich zur 3D ESPSI, s. Kapitel 7.3.c oben.

7.3.e. IFK 5, GFK COPV, Gaseinschluss, thermisch, DS

Verbundwerkstoff-umwickelte Druckbehälter (COPV¹⁵³) werden in der Luft- und Raumfahrt verwendet, da sie leichter als gleichgroße metallische Behälter sind. Ihre Verwendung im Automobil wird mit dem Einsatz der Brennstoffzelle als Antriebstechnologie zunehmen. Die Speicherung von hochreaktivem Wasserstoff unter Hochdruck ist mit Risiken verbunden, welche mittels ZfP minimiert werden können. Im schlimmsten Fall führt eine Materialfehlstelle zum Bauteilversagen. Bei der Explosion der *SpaceX Falcon 9* Rakete im Jahre 2016 wurden so Kosten von 90 Mio. US-Dollar verursacht und glücklicherweise niemand verletzt [154]. Beim Versagen eines COPVs im PKW sind Personenschäden fast unvermeidlich.



Abbildung 7.16: Mit Glasfaserbündeln umwickelter COPV mit einer Höhe von 340 mm, einem Durchmesser von 190 mm und einem Öffnungsdurchmesser von 70 mm; das Innenteil aus Kunststoff besitzt eine Wandstärke von ca. 10 mm, während die Umwicklungsstärke ca. 5 mm beträgt.

¹⁵³ Composit Overwrapped Pressure Vessel.

Abbildung 7.16 zeigt den COPV, welcher im Rahmen der Arbeit untersucht wird, um die gesteigerten Auswertemöglichkeiten durch zusätzliche Innenmessungen mit dem neuen IFK 5 zu demonstrieren. Der COPV hat eine Höhe von 340 mm, einen Durchmesser von 190 mm und einen Öffnungsdurchmesser von 70 mm. Er besteht im Inneren aus einem Kunststoffteil mit einer Wandstärke von 10 mm und ist mit mehreren Lagen GFK-Faserbündeln umwickelt. Jedes Faserbündel ist mit einer blauen, glänzenden Schutzfolie versiegelt. Die Umwicklung wurde zum Großteil mit Winkeln von -45° , 0° und 45° durchgeführt und weist eine Gesamtdicke von ca. 5 mm auf.

COPV, thermische Anregung

Die äußere Mantelfläche des COPVs wird shearografisch geprüft. Bei einer mechanischen Belastung mittels Innendruckanregung ist die Verformung der Faserlinien und der Winkelversatz der einzelnen Lagen erkennbar (s. auch Tabelle 7.1 oben). Hier zeigen sich keine Auffälligkeiten. Bei einer thermischen Belastung mittels Quarzstrahler und Shear in x-Richtung wird eine Anomalie sichtbar, wie Abbildung 7.17 links zeigt. Das IFK wird mit dem 90° Endoskop ausgestattet und der Mantelbereich mit der Anomalie von Innen vermessen, wie Abbildung 7.17 rechts zeigt. Die Shearogramm-Ränder sind verrauscht, was auf das leicht transparente Material des Innenteils zurückzuführen ist. Darüber hinaus lässt die gekrümmte Messfläche keine optimale Fokussierung der Ränder links und rechts zu, wodurch das Rauschen verstärkt wird. Ebenso problematisch ist die noch provisorische 90° Umlenkung des Anregungsrohrs, welche Strömungsverluste verursacht und damit die Anregungsleistung senkt. Die Messdauer fällt aufgrund der 10 mm Wandstärke des Innenteils verhältnismäßig hoch aus, wodurch Dekorrelationseffekte begünstigt werden. (Der Anregungsburst dauert ca. 5 Sekunden, währenddessen die Verformung erfasst wird.) Dennoch bestätigt der auswertbare Anteil mittig im Shearogramm den Indikator (rot umkreist). Global werden Verformungserscheinungen durch die Faserlinien sichtbar. Als Fehlstelle wird ein Gaseinschluss zwischen Innenteil und Umwicklung angenommen.

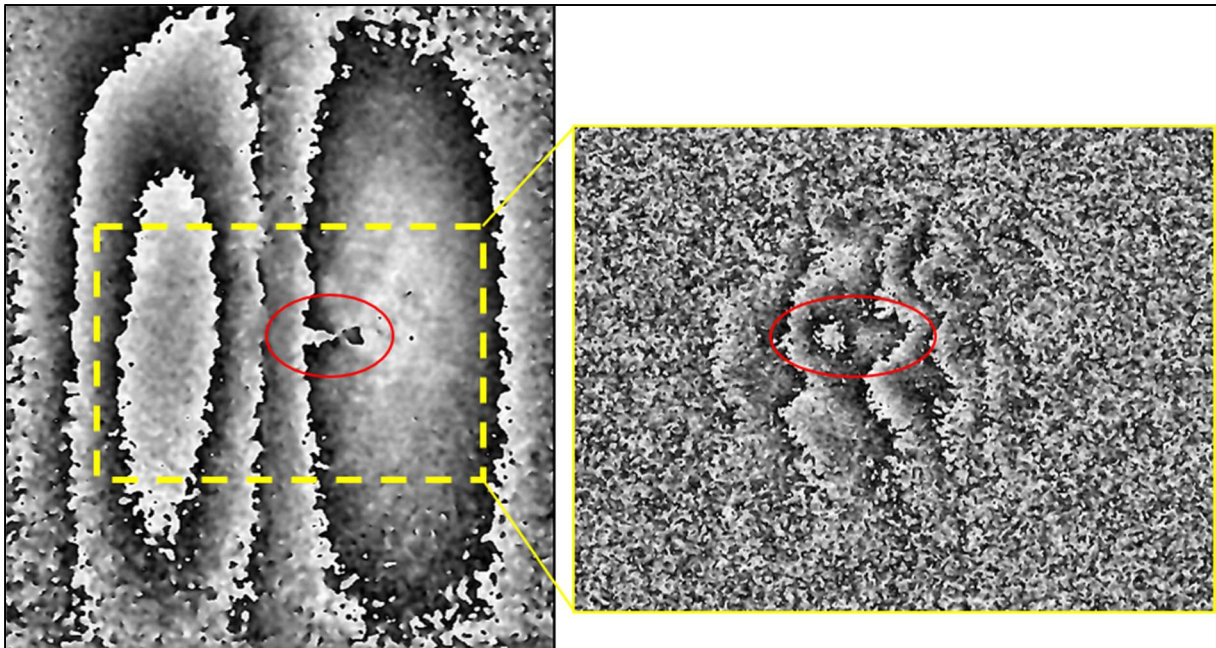
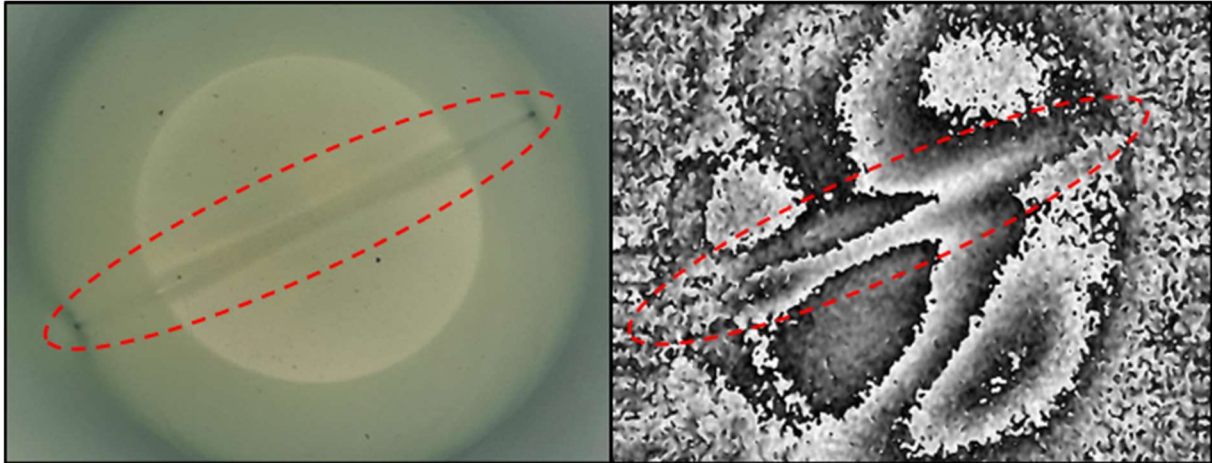


Abbildung 7.17: (Links) shearografische Prüfung der Außenfläche des COPVs mit thermischer Belastung zeigt eine Anomalie (rot markiert); diese kann durch eine Innenmessung mit IFK (rechts) bestätigt werden. Die Shearogramm-Ränder sind dabei verrauscht, vor allem da das Innenteil aus leicht transparentem Material besteht.

Neben der Innenprüfung der Mantelfläche kann mit dem IFK, ausgestattet mit 0° Endoskop, die Füge-
stelle am Boden des Innenteils bewertet werden. Aufgrund der ebenen Messfläche und einer ausrei-
chend hohen Anregungsleistung durch das gerade Anregungsrohr ergibt sich ein qualitatives
Shearogramm, s. Abbildung 7.18. Die lokale Verformung der Fügestelle ist eindeutig erkennbar. Der
insgesamt komplexe Verformungsverlauf wird nicht weiter diskutiert.



*Abbildung 7.18: Vermessung der Fügestelle am Boden des COPVs (links) mittels IFK ergibt ein Shearogramm mit hohem Pha-
senkontrast (rechts); die lokale Verformung der Fügestelle ist erkennbar. Die komplexe Verformung des Bodens wird nicht
weiter diskutiert.*

Kunststoffprüfbehälter, thermische Anregung

Um die Ergebnisse der Innenprüfung mittels IFK zu validieren, wird ein Behälter mit künstlichen Fehl-
stellen gefertigt (s. auch Kapitel 6.1.c). Die Fehlstellen repräsentieren dabei Gaseinschlüsse, wie sie im
COPV zwischen dem Innenteil und der Faserumwicklung oder in der Wandung des Innenteils beim
Spritzgießen auftreten können. Der Behälter hat eine Höhe von 165 mm, einen Durchmesser von
125 mm, einen Öffnungsdurchmesser von 60 mm und eine Wandstärke von 3 mm. Er wird mittels 3D
Druck aus PLA-Kunststoff gefertigt. Es werden zylindrische Aussparungen mit einer Höhe von 1 mm
mittig in der Wandung mit verschiedenen Durchmessern eingebracht, wie Abbildung 7.19 zeigt.

Der Behälter wird mittels IFK von innen geprüft. Die Fehlstelle im Behälterboden mit einem Zylinder-
durchmesser von 10 mm kann mit einem hohen Phasenkontrast detektiert werden (unten). Im Mantel
können ebenfalls alle Fehlstellen detektiert werden. Die kleinste weist einen Durchmesser von 5 mm
auf, wobei die erzielte Ergebnisqualität akzeptabel ist (rechts). Problematisch hierbei ist abermals die
geringe Anregungsleistung durch die noch provisorische Umlenkung des Anregungsrohres. Nichtsdes-
trotz sind die Shearogramm-Ränder trotz der gekrümmten Messfläche deutlich schwächer ver-
rauscht als bei der Messung des COPVs. Dies ist auf die nicht-transparente Oberfläche zurückzuführen.
Die allgemeine Einsatztauglichkeit des IFKs kann damit bestätigt werden.

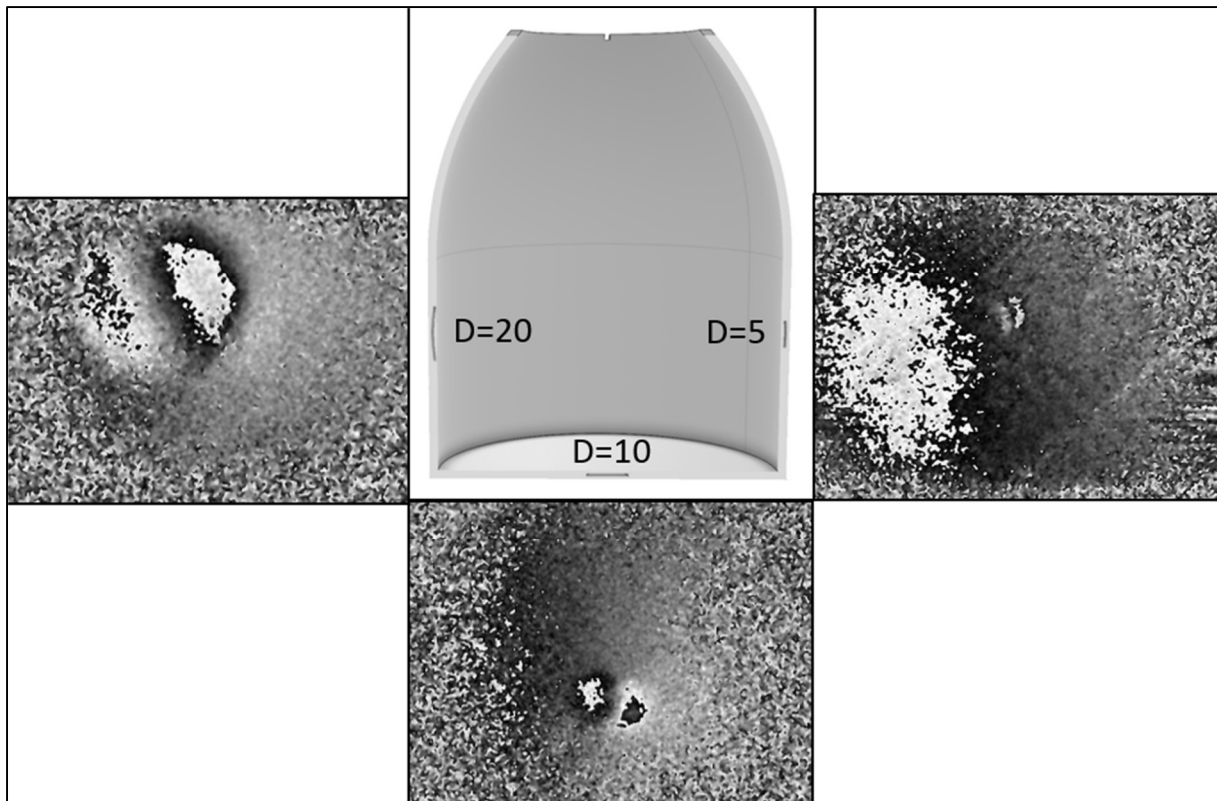


Abbildung 7.19: (Oben mittig) CAD-Modell des 3D-gedruckten Behälters aus PLA-Kunststoff mit einer Höhe von 165 mm, einem Durchmesser von 125 mm, einem Öffnungsdurchmesser von 60 mm und einer Wandstärke von 3 mm, Halbschnitt-Ansicht; mittig in die Wandung werden künstliche Fehlstellen in Form von 1 mm hohen Zylindern mit unterschiedlichen Positionen und Durchmessern D eingebracht. Die Innenprüfung mittels IFK liefert eine gute Ergebnisqualität mit wenig Rauschen an den Shearogramm-Rändern. Alle Indikatoren können detektiert werden. Der Indikator für die Fehlstelle mit dem Durchmesser $D = 5$ mm (rechts) ist nur schwach ausgeprägt. Dies ist auf die reduzierte Anregungsleistung aufgrund der noch provisorischen 90° Umlenkung des Anregungsrohres zurückzuführen.

7.3.f. MFK 2, Rasierer-Schermesser, Bruch, mechanisch, VT

Elektrische Rasierer sind heutzutage komplexe, verhältnismäßig teure Produkte, welche mit Feinmechanik ausgestattet sind. Der Scherkopf eines Rasierers besteht aus filigranen metallischen Bauteilen, welche mit hoher Stückzahl in Serie produziert werden. Abbildung 7.20 zeigt beispielsweise ein sog. Schermesser. Die ca. 9 mm langen, 0,3 mm breiten und 0,3 mm dicken Stege können bei der Herstellung oder Montage beschädigt werden, was auch unter Zuhilfenahme eines Mikroskops visuell nicht sicher erkannt werden kann. In dem Fall kann ein Defekt des Rasierers auftreten und auch ein Verletzungsrisiko für den Kunden entstehen. Die Problematik kann mittels ZfP verhindert werden.

Ein Schermesser wird mittels MFK 2 holografisch untersucht. Aufgrund der glänzend-metallischen, gekrümmten Oberfläche muss es mit einer Prüfbeschichtung versehen werden. Mittels Schraubstocks mit gummierten Spannbacken wird das Verbindungselement der 28 Stege unter einen geringfügigen Druck gesetzt, was eine homogene, mechanische Biegebelastung in den Stegen hervorruft. Das Messergebnis zeigt Abbildung 7.21. Die vier Stege im Messbereich werden maskiert, um entkoppelt vom globalen Phasenverlauf des Verbindungselements betrachtet werden zu können. Steg 1 zeigt eine hohe Streifenkonzentration im linken Bereich, eine geringe im rechten Bereich. Die Bereiche sind begrenzt durch eine Auffälligkeit im Hologramm, welche durch den roten Pfeil markiert ist. Alle anderen Stege weisen eine homogene Streifenkonzentration unter der Belastung auf. Die demodulierten Verformungsergebnisse für die vier Stege weisen aufgrund der homogenen Anregung alle einen Extremwert von $-2,5 \mu\text{m}$ auf. Der Verformungsverlauf von Steg 1 auf der xz-Ebene unterscheidet sich jedoch

durch eine nichtlineare, sprunghafte Veränderung der Verformung an der Stelle mit der Auffälligkeit. Sie kann durch eine zerstörende Prüfung mittels Einzelbelastung jedes Stegs als Bruch identifiziert werden.

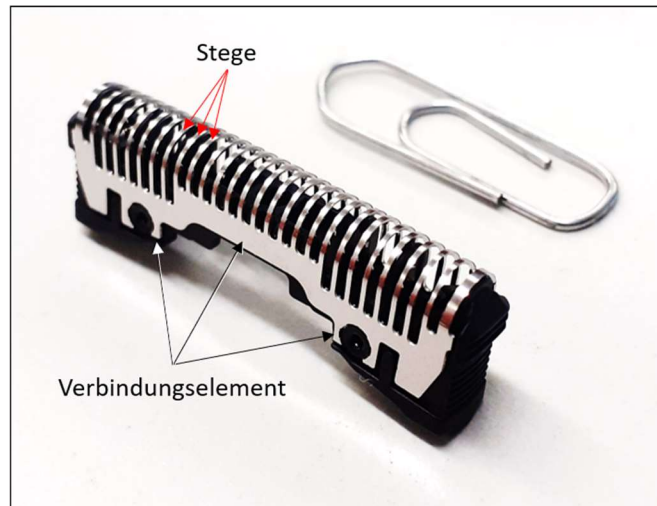


Abbildung 7.20: Schermesser eines elektrischen Rasierers im Größenvergleich zu einer Büroklammer; das filigrane Bauteil hat eine Länge von 30 mm, eine Breite von 6 mm und eine Höhe von 10 mm. Die 28 Stege haben eine Länge von ca. 9 mm und eine Breite und Dicke von ca. 0,3 mm.

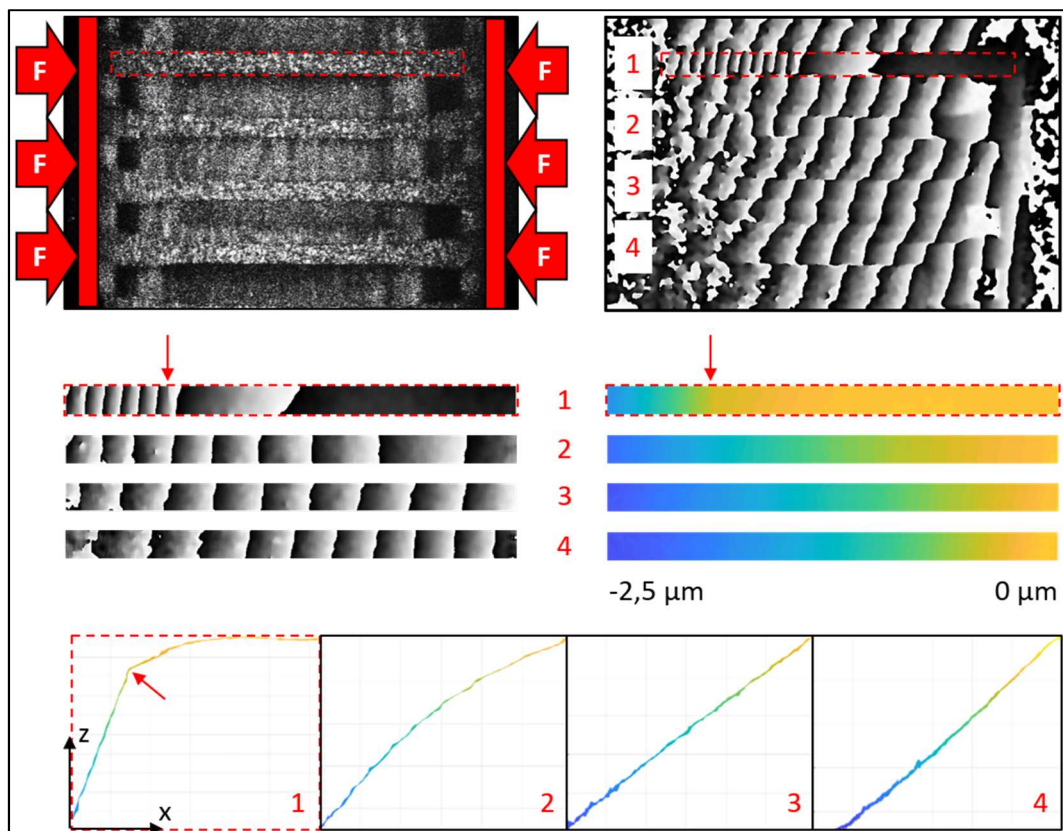


Abbildung 7.21: Druckbelastung eines filigranen Rasierer-Schermessers bei der Vermessung mit dem MFK 2 (oben links) ergibt das Hologramm (oben rechts), mithilfe dessen die Intaktheit der vier nummerierten Stege geprüft wird; je Steg wird ein zugeschnittenes Hologramm maskiert (mittig links), demoduliert (mittig rechts) und der Verformungsverlauf auf der xz-Ebene dargestellt (unten). Die inhomogene Streifenkonzentration bzw. der nicht-lineare Verformungsverlauf von Steg 1 deuten auf einen Bruch des Stegs hin.

7.3.g. MFK 2, Schaftfräser, Riss, thermisch, VT

Bei der Härtebeschichtung von Werkzeugen können Risse auftreten, welche beispielsweise bei der Fertigung von teuren oder großen Teilen ein Kostenrisiko aufgrund eines Werkzeugdefekts verursachen. Darüber hinaus ergibt sich eine akute Verletzungsgefahr im Umgang mit dem Werkzeug, welches beim Bruch beispielsweise zum Geschoss werden kann.

Abbildung 7.22 zeigt einen Schaftfräser aus Werkzeugstahl mit einem Durchmesser von 25 mm, einer Höhe von 100 mm und einer Schneidenlänge von 11 mm, welcher auf Risse geprüft wird. Unter mikroskopischer Betrachtung (VT¹⁵⁴) kann ein Indikator für einen horizontal verlaufenden Riss in einer Schneide und ein Indikator für einen etwas schräg verlaufenden Riss in einer benachbarten Schneidefläche gefunden werden, s. Abbildung 7.23 oben. Die Fläche zwischen den beiden Schneiden kann aufgrund des verwendeten Ringlichts am Mikroskop infolge von Abschattungen nicht beleuchtet werden. Für eine sichere, automatische Prüfung wäre diese einfache Bildinformation womöglich unzureichend. Daher wird sie um eine holografische Prüfung mittels MFK 2 ergänzt.

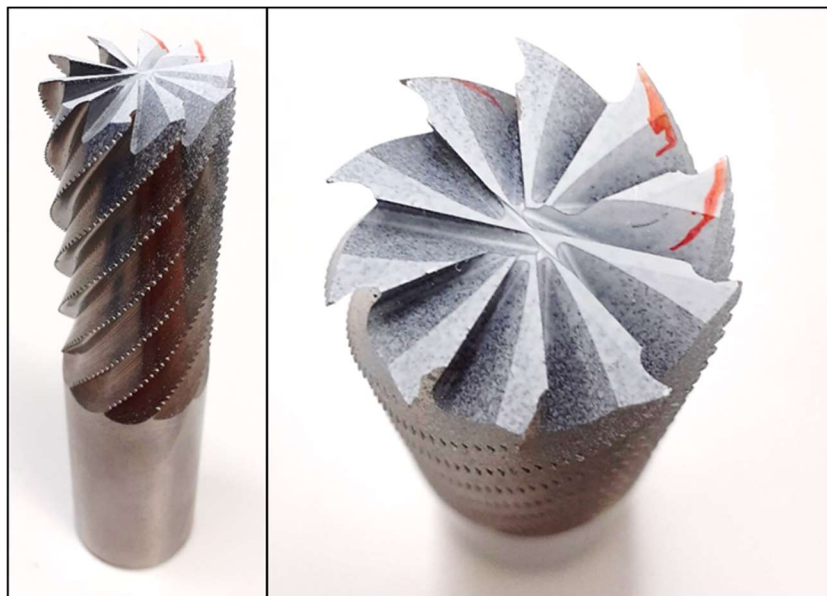


Abbildung 7.22: Schaftfräser aus Werkzeugstahl mit einem Durchmesser von 25 mm; drei der zehn Schneiden wurden stirnseitig rot markiert, da sich visuell Indikatoren für Risse abzeichnen. Zur holografischen Prüfung muss die metallisch-glänzende Oberfläche weiß-matt beschichtet werden.

Aufgrund der glänzend metallischen Oberfläche muss der Fräser mit einer Prüfbeschichtung versehen werden. Anschließend wird er induktiv mittels einer ihn umschließenden Spule mit einem 2 Sekunden andauernden Burst angeregt. Währenddessen werden kontinuierlich Bildaufnahmen mit einer 20 Hz Kamerataktzeit erfasst. Der höchste Fehlstellenkontrast wird nach ca. 1 Sekunde, demnach noch während der Anregung, für die Verformung in dem Zeitintervall von 0,1 Sekunden erreicht. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit und der hohen Wärmekapazität des Werkzeugstahls sinkt der anfänglich hohe Temperaturgradient daraufhin wieder (s. Kapitel 6). Das ermittelte Hologramm zeigt Abbildung 7.23 mittig. Links ist eine annähernd horizontale Verformungsanomalie erkennbar, welche sich in der Fläche zwischen den beiden Schneiden fortsetzt und eine Länge von ca. 3,5 mm aufweist. Die achsparrallele Einkopplung des Lasers in den Beobachtungsstrahlengang am MFK 2 oop Modul liefert hier das

¹⁵⁴ Visuelle Sichtprüfung, Abkürzung nach [149].

nötige Messlicht. Das Hologramm ist zur rechten Schneide hin verrauscht, da dieser tieferliegende Bereich nicht mehr ausreichend fokussiert wird. Eine Anomalie ist dort nicht erkennbar. Das demodulierte Verformungsergebnis zeigt einen maximalen Sprung von nur 70 nm für den Rissindikator, s. Abbildung 7.23 unten. Der geringe Ausschlag trotz der 1 kW Anregungsleistung ist der geringen Wärmeausdehnung von Werkzeugstahl geschuldet. Das SNR liegt bei knapp 2, was zwar gering ist, jedoch in Kombination mit dem gleichen Indikator durch die VT mittels mikroskopischer Bildaufnahme zu einer gewissen Aussagesicherheit führt. Stattdessen kann es sich bei dem Indikator in der rechten Schneide auch um einen Oberflächenkratzer handeln, da er im Hologramm keinen Ausschlag zeigt.

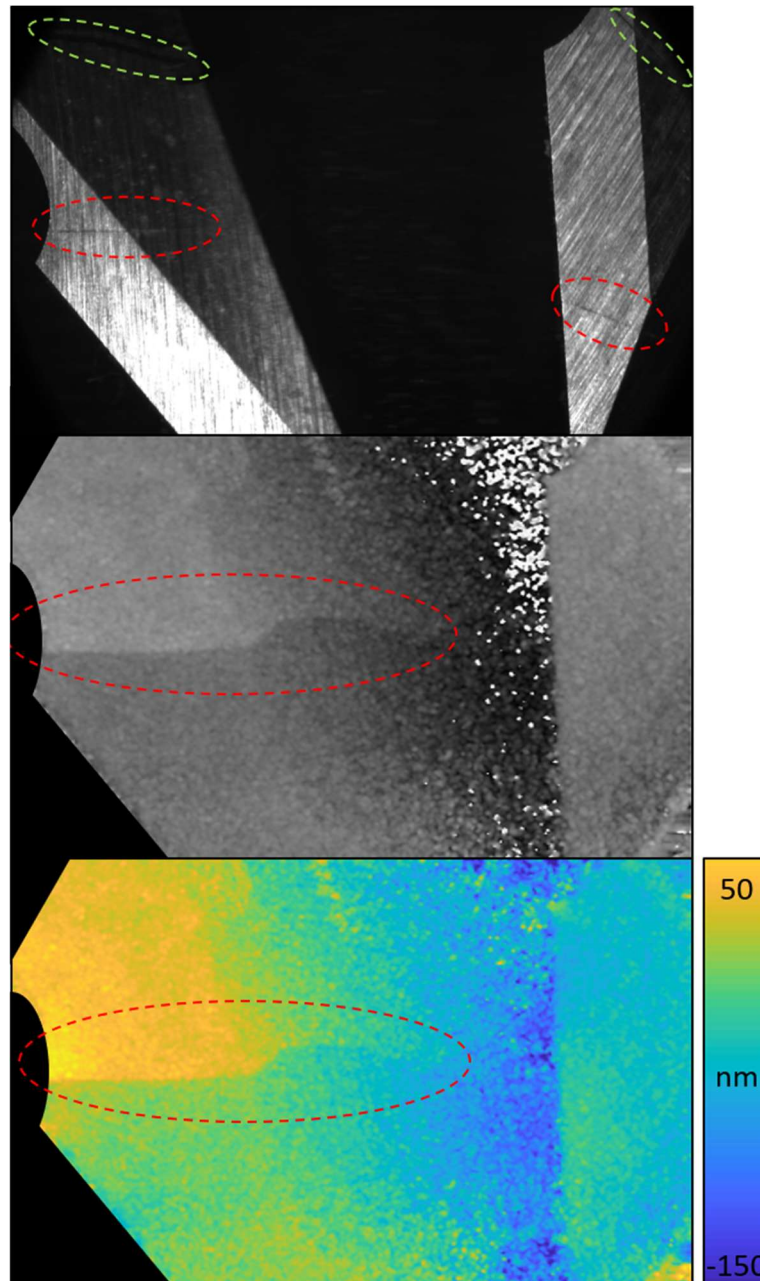


Abbildung 7.23: (Oben) mikroskopische Bildaufnahme zweier unbeschichteter Schäftfräser-Schneiden unter Weißlicht-Ringbeleuchtung und Laserbeleuchtung mittels MFK 2 oop Modul; die Speckles sind auch in der Fläche zwischen den beiden Schneiden schwach sichtbar, wo es mit dem Ringlicht geometriebedingt zu Abschattungen kommt. Die Bildaufnahme zeigt je Schneide einen Rissindikator (rot umkreist). (Die Linien weiter oben an den Schneiden, grün umkreist, resultieren aus der roten Farbmarkierung, s. Abbildung 7.22 oben.) (Mitte) das Hologramm der Werkzeugverformung unter thermischer Belastung mit umschließender Induktionsspule bestätigt den linken Indikator. (Unten) die demodulierte Verformung zeigt hier einen 70 nm Sprung bei einem SNR von 2.

8. Automatisierung der Shearografie

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Weiterentwicklung der SPS Shearografie zum Einsatz in der automatisierten Serienüberwachung. Die neuen Methoden und Aufbauten, welche in Kapitel 4 theoretisch und in Kapitel 5 praktisch vorgestellt werden, stehen dabei im Fokus. Die verbesserte Anwendbarkeit wird mit den Messungen in Kapitel 7 aufgezeigt. Hier, in Kapitel 8, sollen abschließend noch ein Beitrag zur Automatisierung der Shearografie geleistet und die Einsatztauglichkeit der neuen Messgeräte unter Beweis gestellt werden. Zunächst wird die entwickelte Automatisierungssoftware beschrieben, anschließend werden ausgewählte Prüfergebnisse vorgestellt.

Die automatische shearografische Datenerfassung und -evaluation stellt einen notwendigen Schritt des zukünftig weiterwachsenden Einsatzes der DS in der Automobilproduktion dar, s. Kapitel 1.5. Shearografische Automationslösungen sind zwar nicht neu, jedoch bisher eher selten und sehr speziell. Es sei auf die wenigen offiziell bekannten Quellen verwiesen [155] [156] [130]. In vielen Fällen läuft ausschließlich die Datenerfassung automatisch ab, während die Evaluation manuell erfolgt. Weitere Betrachtungen finden sich in Kapitel 8.1.b. Zum besseren Verständnis werden hier die klassischen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt bei der Anwendung der DS beschrieben. Die entscheidenden Unterschiede zur Automobilindustrie sind die Stückzahl, die Produktionstaktzeit, die Produktkosten und der Sicherheitsaspekt beim Bauteilversagen.

DIN EN ISO 9712 [149] regelt die Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der ZfP allgemein, während DIN EN 4179 [83] weitere Anforderungen für den Bereich Luft- und Raumfahrt definiert. Spezielle Anforderungen an Personal beim Einsatz der Shearografie sind in DIN 54180-1 [14] zu finden. Grundsätzlich werden bei der ZfP drei Qualifizierungsstufen unterschieden. Personal der Stufe 1 ist (u. a.) in der Lage, die Datenerfassung nach einer Einweisung fachgerecht durchzuführen und zu dokumentieren. Personal der Stufe 2 führt (u. a.) die Datenevaluation durch und dokumentiert das Ergebnis. Darüber hinaus ist es dafür zuständig, Prüfanweisungen und Verfahrensbeschreibungen passend zu neuen Prüfaufgaben auszulegen. Dazu werden beispielsweise das Messgerät und die Einstellparameter festgelegt sowie die verfahrensbedingten Prüfgrenzen definiert. Letzteres erfolgt durch systematisches Herantasten an möglichst realitätsnahe Prüfobjekte. Je nach Anforderung werden dabei Bauteile mit künstlichen Fehlstellen, fehlstellenbehaftet-gefertigte Bauteile oder Produktionsbauteile mit CT-validierten¹⁵⁵ Fehlstellen verwendet ([65] Teil 2.5). Das Ziel dieser Analyse ist oftmals die Bestimmung des kleinsten detektierbaren Fehlstellendurchmessers und die dabei erreichbare Aussagesicherheit durch einen hohen SNR-Wert, s. auch Kapitel 6.1.c und 2.5.f. Die Prüfdokumentation wird allgemein nach der DIN EN ISO/IEC 17025 [157] geregelt. Spezielle Anforderungen zur DS finden sich in DIN 54180-1 [14]. Personal der Stufe 3 leitet (u. a.) Personal aller Stufen an und prüft die Richtigkeit von Prüfanweisungen und Verfahrensbeschreibungen.

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Datenerfassung und -evaluation entsprechend einer Qualifizierungsstufe 1 und 2 automatisch erfolgen kann. Die Rüstung einer shearografischen Serienüberwachung sollte aus Sicht des Autors zumindest von Personal der Stufe 1 durchgeführt werden, die Einrichtung und Inbetriebnahme zumindest von Personal der Stufe 2. Personal der Stufe 3 sollte weiterhin die Richtigkeit des automatischen Verfahrens zum Betriebsbeginn sowie nach einer gewissen Betriebsdauer prüfen.

¹⁵⁵ CT wird hier als beispielhaftes ZfP-Verfahren genannt, da mit ihr typischerweise sehr viele Fehlstellen detektierbar sind, s. Kapitel 1.3.

8.1. Automatisierungssoftware

Im Folgenden wird die entwickelte Automatisierungssoftware vorgestellt. Sie wird für aufeinanderfolgende, gleiche Prüfungen (rasternde Prüfung eines großen Objektes, s. Kapitel 8.2.a und 8.2.b) bzw. für Prüfreihe (viele gleiche Prüfobjekte, s. Kapitel 8.2.c) eingesetzt. Zunächst wird die Gesamtstruktur der Software vorgestellt (Kapitel 8.1.a). Anschließend werden die entwickelten Evaluationsalgorithmen genauer beschrieben (Kapitel 8.1.b).

8.1.a. Automatische Datenerfassung und Datenevaluation

Zur Automatisierung der optischen Prüfung wurde eine Software entwickelt, welche auf der Datenerfassung und -nachbearbeitung von OPTIS 4 basiert (s. Kapitel 5.5). Sie ermöglicht, holografische, shearografische und thermografische Prüfungen automatisch zu starten (Trigger), das Prüfobjekt zu erkennen (Detect), die Messung durchzuführen (Measure), die Evaluation vorzunehmen (Decide) und die Statistik darüber zu führen (Statistics). Dieser Ablauf wird in einer Dauerschleife wiederholt (Loop), s. Abbildung 8.1. Die Einrichtung der Software erfolgt durch einmaliges, manuelles Durchlaufen einer Prüfiteration.

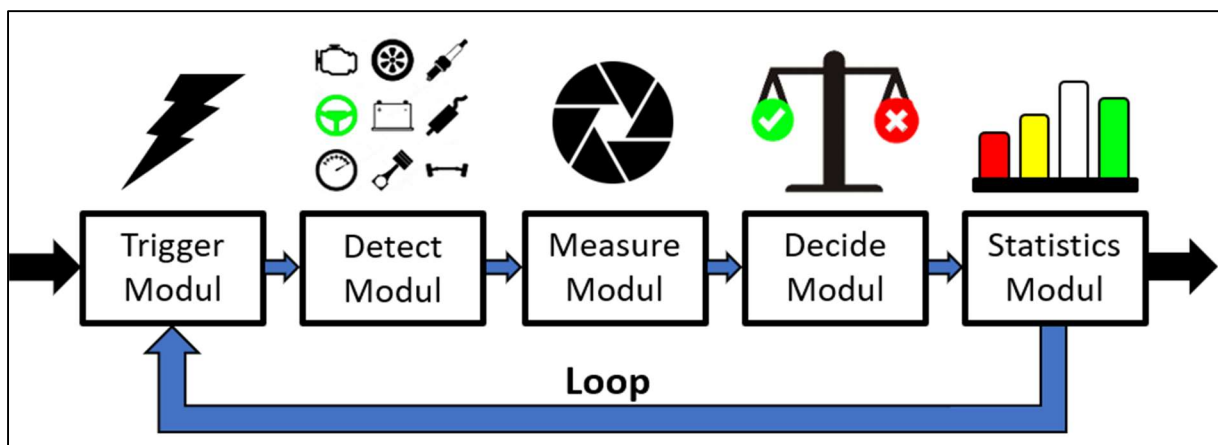


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung des Prüfablaufs mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Automatisierungssoftware, basierend auf OPTIS 4; wird ein Prüfobjekt vor dem Messgerät positioniert (schwarzer Pfeil links), löst das Trigger Modul den weiteren Ablauf aus. Das Prüfobjekt wird durch das Detect Modul erkannt und voreingestellte Evaluationsparameter eingerichtet. Anschließend erfolgt die Messung und die automatische Evaluation mittels Measure Modul und Decide Modul. Das Statistics Modul sammelt die Daten über den Prüfungsfortschritt und die Dauerschleife („Loop“) beginnt von vorne, während das Prüfobjekt weitergeführt wird (schwarzer Pfeil rechts).

Das Trigger Modul arbeitet wie eine erweiterte, bildhafte Lichtschranke und nutzt dazu die im Messgerät vorhandene Kamera¹⁵⁶, welche vorab initialisiert wird (s. Kapitel 5.5). Es stehen unterschiedliche Einstellmöglichkeiten zur Verfügung, wie das Auslösen bei einer Bewegung im Bild oder bei einer Bildabweichung von einem Referenzbild. Hierbei werden Feinabstimmungen durch die Markierung eines bestimmten Bildbereichs (ROI¹⁵⁷), die Festlegung einer Grenzintensitätsänderung und einer prozentualen flächenhaften Änderung vorgenommen. Auf diese Weise wird der Prüfvorgang gestartet, sobald

¹⁵⁶ Im Falle der Thermografie wird die Thermografiekamera verwendet und der Wärmekontrast ausgewertet.

¹⁵⁷ Region Of Interest.

ein Prüfobjekt beispielsweise mittels Roboterhandhabung vor dem Messgerät positioniert oder eine optische Anregung gestartet wird.

Das Detect Modul ermöglicht eine Unterscheidung von Objekten durch die Kamera im Messgerät¹⁵⁶. Die Idee dahinter ist die Anpassung der Prüfparameter¹⁵⁸ an das Objekt. Auf diese Weise ist eine flexible, adaptive Qualitätsüberwachung möglich, wie sie in einer Zukunftsproduktion mit der Losgröße 1 notwendig wird. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt lediglich eine beispielhafte Unterscheidung von hellen und dunklen Objekten mittels ROI und Intensitätsbewertung. Zukünftig denkbar sind jedoch optische 2D Formerfassungen, Barcode-Scans oder sogar eine Unterscheidung anhand des Shearogramms. Darüber hinaus sind derzeit lediglich die Grenzwerte bei der Evaluation für die unterschiedlichen Objekte anpassbar. Zukünftig sollen ebenfalls die Parameter der Datenerfassung adaptiv auf ein Objekt eingerichtet werden, wie beispielsweise der Zoom¹⁵⁹ für Anwendungen des MZ Messgerätes mit installiertem 4f Modul, s. Kapitel 7.3.b.

Das Measure Modul entspricht der Software zur Datenerfassung und -nachbearbeitung von OPTIS 4 (s. Kapitel 5.5). Hier werden alle vorhandenen Funktionen genutzt, um die Erstprüfung des Objektes vorzunehmen. Die passenden Parameter, von der Festlegung der SPS-Kanäle bis zur Wahl der Demodulationsmethode, werden eingestellt und Fehlstellenindikatoren sowie Grenzwerte anhand der Ergebnisse durch den Prüfer bestimmt.

Diese Grenzwerte werden im Decide Modul hinterlegt. Die vorhandenen, neuen Evaluationsalgorithmen werden gesondert im folgenden Kapitel 8.1.b beschrieben.

Das Statistics Modul führt typische Kennzahlen der Serienprüfung auf, wie beispielsweise die Anzahl an geprüften Teilen, die Anzahl fehlstellenbehafteter Teile oder der prozentuale Anteil bestimmter Grenzwertüberschreitungen¹⁶⁰.

Wenn diese Einrichtung der Software erfolgt ist, werden alle getroffenen Einstellungen abgespeichert, um zu einem späteren Zeitpunkt reproduzierbar und für eine zweite, gleiche Prüfreihe abrufbar zu sein. Anschließend startet die Dauerschleife. Dabei werden am Messrechner verschiedene Schritte des Prüfablaufs in Echtzeit angezeigt, s. Abbildung 8.2. Alle Bildaufnahmen und Ergebnisse werden parallel zur Prüfung abgespeichert, sodass sie im Nachhinein abrufbar sind und ggf. weiterverarbeitet werden können.

Die Automatisierungssoftware wurde modular entwickelt. Die Module können erweitert, ersetzt und die Ablaufreihenfolge vertauscht werden. Beispielsweise könnte das Trigger Modul gegen das Eingangssignal einer nicht-kamerabasierten Lichtschranke oder das Detect Modul gegen eine Funktion mit RFID¹⁶¹-Technik zur Objekterkennung abgelöst werden. Zudem kann die Datenevaluation auch erst im Nachgang erfolgen, um Zeit bei der Datenerfassung einzusparen. Darüber hinaus soll es zukünftig Ausgangssignale des Decide Moduls geben, um im Sinne der *intelligenten Fabrik* eine nachgeschaltete Selektion zu koordinieren oder eine vorgelagerte Fertigungsmaschine zu kalibrieren.

¹⁵⁸ Shear, Messabstand, Anregungsmechanik, Indikatoren-Grenzwerte usw.

¹⁵⁹ Siehe auch ([68] Kapitel 5.1 und 5.2).

¹⁶⁰ Beispiel: 30 % aller fehlstellenbehafteten hellen Prüfteile werden als „nicht in Ordnung“ (NIO) deklariert, da sie zumindest den maximalen Verformungsgrenzwert von 100 Mikrostrain lokal überschreiten.

¹⁶¹ Radiofrequenz-Identifikation.

8. Automatisierung der Shearografie

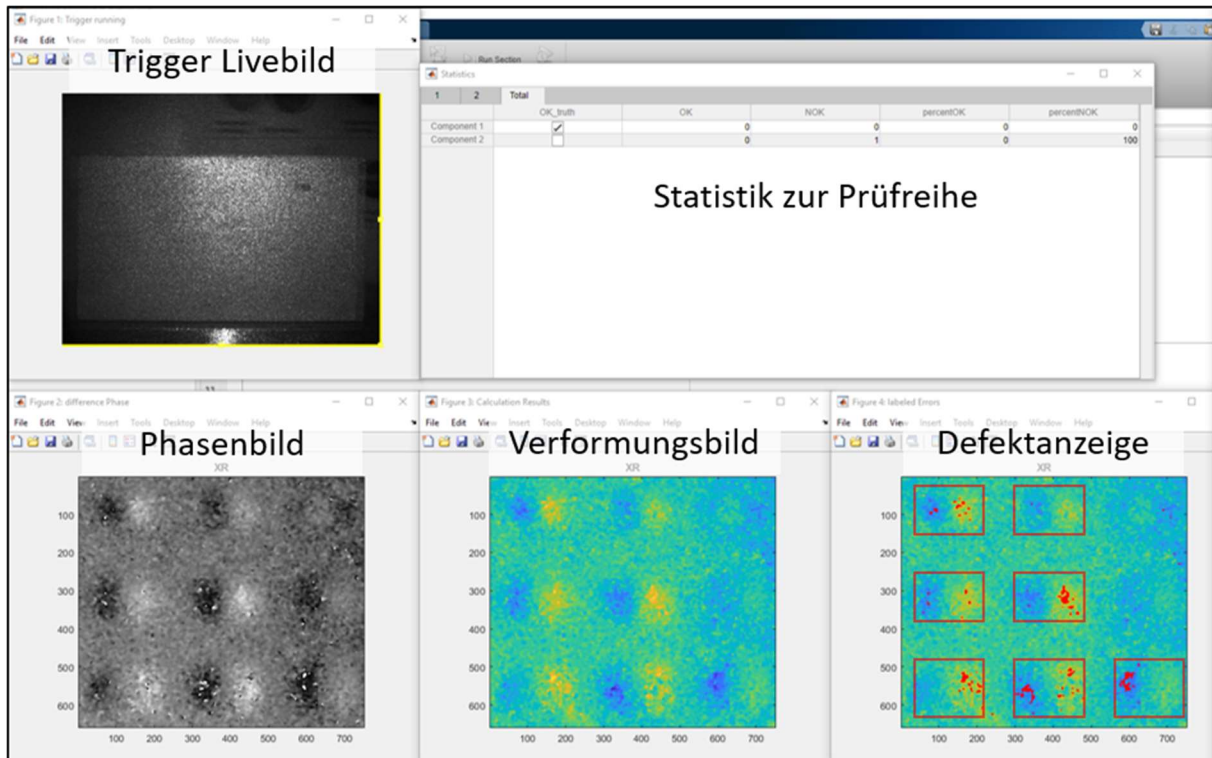


Abbildung 8.2: Echtzeitanzeige des Prüfablaufs mit der Automatisierungssoftware; das Verformungsbild kann mittels Bildverarbeitungswerkzeugen weiter analysiert (punktuelle oder linienhafte Verformungswerte usw.) und die Anzeige angepasst werden (Zoom, Farbskala usw.). Die Statistik kann durch Registerkarten hin zu spezifischen Grenzwertüberschreitungen bei der Prüfung umgeschaltet werden.

8.1.b. Entwickelte Evaluationsalgorithmen

Als Bestandteil der Automatisierungssoftware (s. auch Kapitel 8.1.a) wurden vier neue Evaluationsalgorithmen für die Shearografie entwickelt. Davon wurden zwei in einer Originalveröffentlichung des Autors et al. [153] vorgestellt. Diese sollen hier ebenfalls nochmals zusammengefasst aufgezeigt werden.

Parallel zu den in jüngster Zeit zunehmenden Arbeiten zur Automatisierung der Shearografie, steigt die Anzahl an Veröffentlichungen speziell zur automatisierten Datenevaluation ([68] Kapitel 3.4, [107], [118], [127], [133], [134], [147], [148], [150]). Entsprechend des Entwicklungsziels dieser Arbeit, schnelles SPS anstatt genauer arbeitendes TPS effizient nutzbar zu machen (s. Kapitel 1.5), wurden Evaluationsalgorithmen mit möglichst geringer Auswertedauer entwickelt. Dies ist nur auf Kosten der Auswertequalität erreichbar. Anhand der in diesem Kapitel 8.1.b aufgezeigten Ergebnisse wird dargestellt, dass dieser Schritt im Rahmen der Serienproduktion der Automobilindustrie zielführend ist. Die Qualitätsansprüche sind zwar bekanntermaßen hoch, jedoch spielen die im Vergleich zur Luftfahrtindustrie viel kürzere Taktzeit, die geringeren Produktkosten und das niedrige Risiko beim Bauteilversagen eine ebenso relevante Rolle.

Die Verwendung von künstlicher Intelligenz, speziell der Methode des *Deep Learnings*¹⁶² auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen, zeigt bereits jetzt ein enormes Potential im Bereich der optischen Messtechnik [91]. Die Programme zur Implementierung dieser Methoden für spezielle Aufgaben, z. B. zur Datenevaluation bei der Shearografie, werden zunehmend anwenderfreundlicher (s. z. B. [87]). Die Methoden werden aus Sicht des Autors zweifelsfrei das Instrument der Zukunft sein. Zum aktuellen

¹⁶² Mehrschichtiges bzw. „tiefes“ Lernen, eine Art des maschinellen Lernens.

Zeitpunkt sind jedoch noch erweiterte Kenntnisse beim Anlernen und beim Einrichten der Methoden notwendig ([68] Kapitel 6). Zur einfachen, schnellen und kostengünstigen Einrichtung wurden daher Algorithmen auf der Basis etablierter Bildverarbeitungswerkzeuge entwickelt. Sie dienen der Evaluation typischer Fehlstellenindikatoren. Zur einfachen Einrichtung stehen einem Prüfer lediglich wenige Einstellungen zur Verfügung. Die Evaluation kann beispielsweise für Prüfaufgaben mit kleinen, großen oder gerichteten Fehlstellen angepasst werden. Die Anpassung erfolgt durch voreingestellte, interne Programmparameter¹⁶³, welche im Rahmen der Algorithmenentwicklung definiert wurden und vom Prüfer lediglich als Einstellprofil geladen werden.

Datensatz

Zur Erzeugung von Shearogrammen und demodulierten Verformungsbildern mit typischen Fehlstellenindikatoren wurden 50 mm x 50 mm x 10 mm POM Kunststoffplatten mit künstlichen Fehlstellen versehen (s. auch Kapitel 6.1.c). Abbildung 8.3 zeigt die rückseitig mit Plansenkungen und Nuten versehenen Platten. Die Fehlstellen-Geometrien können Tabelle 8.1 entnommen werden.

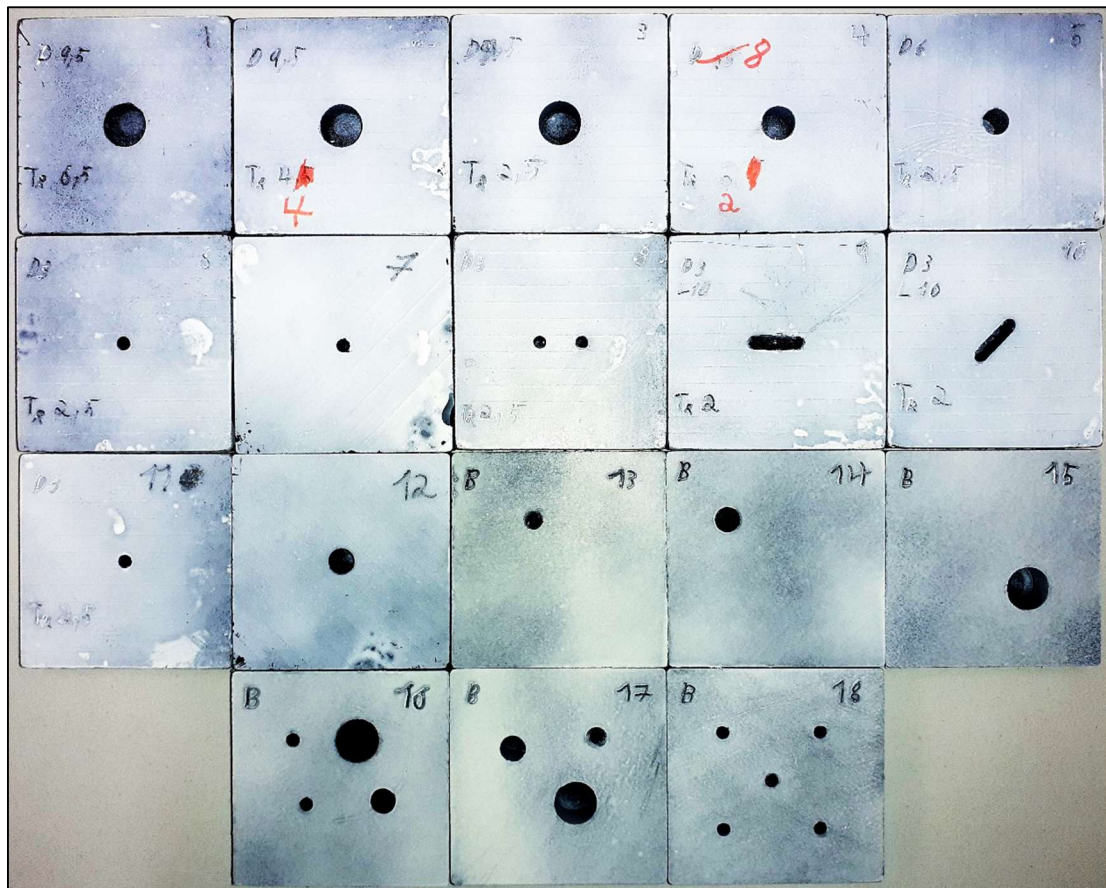


Abbildung 8.3: Die 18 POM Kunststoffplatten (je 50 mm x 50 mm x 10 mm), welche rückseitig mit diversen künstlichen Fehlstellen versehen wurden, um einen shearografischen Datensatz mit typischen Indikatoren für die Entwicklung der automatischen Evaluationsalgorithmen zu erzeugen. Geometrische Details finden sich in Tabelle 8.1.

¹⁶³ Nicht aufgeführt, s. Originalveröffentlichung des Autors et al. [153].

8. Automatisierung der Shearografie

Tabelle 8.1: Geometrische Angaben zu den künstlichen Fehlstellen in den 18 POM Kunststoffplatten, s. Abbildung 8.3.

Nr.	Durchmesser (Plan-senkung) [mm]	Nut-Gesamtlänge [mm], Nutbreite [mm]	Restwandstärke [mm]	Fehlstellenposition oder -orientierung
1	10	-	7	Mittig
2	10	-	4	Mittig
3	10	-	2	Mittig
4	8	-	2	Mittig
5	6	-	2	Mittig
6	3	-	2	Mittig
7	3	-	2	Mittig
8	3; 3	-	2; 2	Horizontal nebeneinander, mittig
9	-	12, 3	2	Mittig 0° (horizontal); wird auch um 90° rotiert
10	-	12, 3	2	Mittig 45°; wird auch um 90° rotiert
11	3	-	1	Mittig
12	6	-	1	Mittig
13	3	-	1	Dezentral
14	6	-	1	Dezentral
15	10	-	2	Dezentral
16	3; 10; 3; 6	-	2; 1; 1; 2	Inhomogen verteilt
17	6; 3; 10	-	1; 1; 1	Inhomogen verteilt
18	3; 3; 3; 3; 3	-	1; 1; 1; 2; 1	Homogen verteilt

Die Platten werden einzeln mittels 750 W Quarzstrahler und MZ Messgerät (Shearbetrag 3,5 mm in x-Richtung, Laserwellenlänge 532 nm) in einem Abstand von 365 mm angeregt bzw. erfasst. Die Prüffläche entspricht dabei dem 6-fachen der Plattenfläche¹⁶⁴. Zur Variation des thermodynamischen Fehlstellenkontrasts (s. Kapitel 6.1.b), und damit der Indikatoren-Sichtbarkeit bzw. des SNR, werden (u. a.) die Anregungsdauer und der Zeitpunkt des Messintervalls variiert. Die Anregungsdauer beträgt 5, 10 und 15 Sekunden. Anschließend wird die Verformung für 5, 10, 15 und 20 Sekunden erfasst. Auf diese Weise wird anhand der 18 fehlstellenbehafteten und 8 fehlstellenlosen Platten ein Datensatz mit 40 Shearogrammen und 48 Verformungsbildern mit gut¹⁶⁵ sichtbarem Indikator, 42 Shearogrammen und 38 Verformungsbildern mit schlecht¹⁶⁶ sichtbarem Indikator und 34 Shearogrammen und Verformungsbildern ohne Indikator erzeugt. Die Sichtbarkeit wird manuell bewertet, wie sie ein geschulter Prüfer vornehmen würde (s. Anfang Kapitel 8; Beispiel s. Originalveröffentlichung [153]). Bilder von fehlstellenbehafteten Platten, welche keinen Indikator zeigen, werden dabei nicht betrachtet. Denn im Rahmen einer Systemeinrichtung mit vorgegebener Anregungs- und Messdauer würden entsprechende Fehlstellen bei der Feststellung der Prüfgrenzen ausgeschlossen werden (s. Anfang Kapitel 8). Anhand dieses Datensatzes kann die Effektivität der entwickelten Algorithmen getestet werden. Abschließend sei angemerkt, dass es zukünftig einen vereinheitlichten Datensatz für die weltweite Forschung und Entwicklung geben sollte, um Algorithmen eindeutig vergleichbar zu machen.

¹⁶⁴ Für erweiterte Untersuchungen können so bis zu sechs Platten in der Prüffläche angeordnet werden. Drei Platten werden in einer Reihe horizontal nebeneinandergestellt und eine zweite Reihe aus drei Platten oben auf der ersten Reihe positioniert.

¹⁶⁵ Im Falle mehrerer Fehlstellen muss mindestens ein Indikator gut sichtbar sein.

¹⁶⁶ Im Falle mehrerer Fehlstellen muss mindestens ein Indikator schlecht sichtbar sein, während keiner gut sichtbar ist.

Defekterkennung

Der erste Algorithmus *MinMaxRoiMatching* basiert auf einer erweiterten Grenzwertüberschreitung der demodulierten Verformungsbilder, s. Abbildung 8.4. Zunächst wird das Bild global oder mittels Fensterfunktion lokal trendbereinigt. Anschließend erfolgt eine Mittelwertkorrektur. Nun werden Bereiche mit Grenzwertüber- und -unterschreitung ausfindig gemacht. Mittels morphologischer *Open-Operation*¹⁶⁷ wird das Rauschen verringert. Es folgt eine sog. *BlobDetection*¹⁶⁸, bei der Bereiche mit einer ausreichend großen Pixelfläche als Kreisfläche zusammengefasst werden. Im letzten Schritt wird mittels *BlobMatching* geprüft, ob zwei Blobs gegenläufiger Grenzwerte im Abstand des Shearbetrags und in Shearrichtung zueinander liegen. Ist dies der Fall, wird das Rechteck, welches die beiden Blobs enthält, als fehlstellenbehafteter Bereich deklariert.

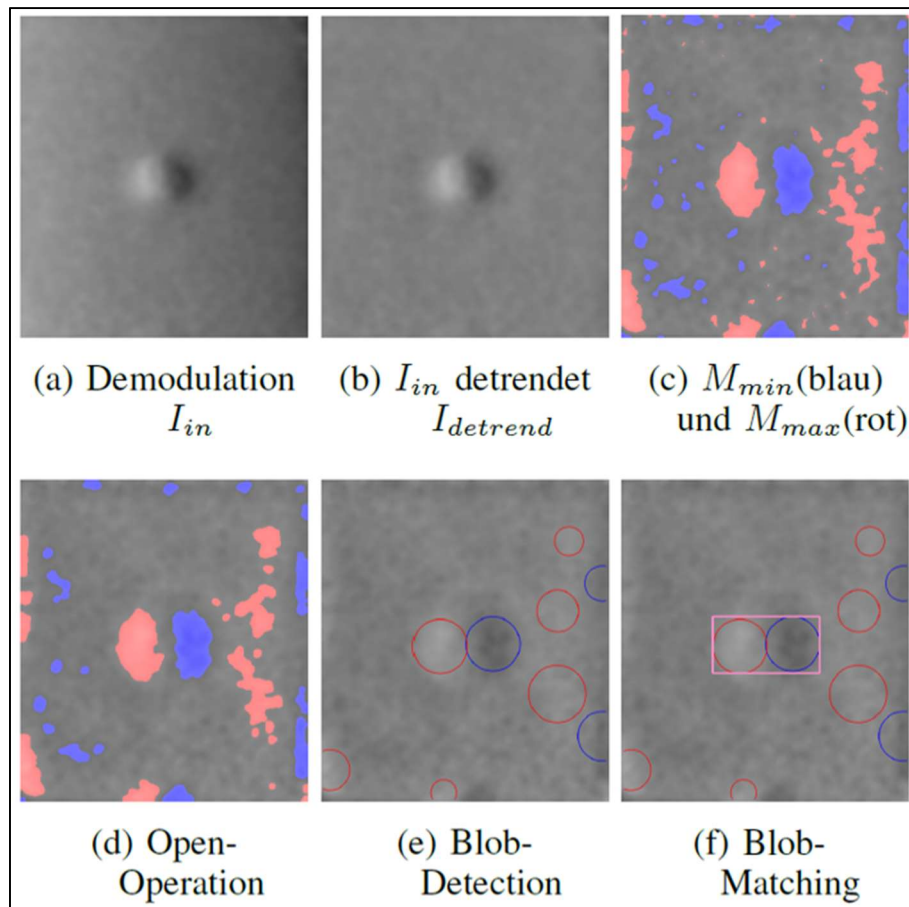


Abbildung 8.4: Die sechs Bildverarbeitungsschritte des entwickelten MinMaxRoiMatching Evaluationsalgorithmus vom demodulierten Verformungsergebnis (oben links) bis zur Anzeige des fehlstellenbehafteten Bereichs (unten rechts). Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].

Der zweite Algorithmus *StDShift* basiert auf einer erweiterten Betrachtung der Standardabweichung fehlstellenbehafteter Bildbereiche eines Shearogramms. Durch die Evaluation direkt am Shearogramm kann die Rechenzeit von ca. 1 Sekunde¹⁶⁹ für die Demodulation eingespart werden. Zunächst wird ein lokales Fenster bestimmt, innerhalb dessen eine vordefinierte Grenzwertüberschreitung der Stan-

¹⁶⁷ Basis-Operation der Bildverarbeitung, s. Originalveröffentlichung [153].

¹⁶⁸ Binary Large Object, dt.: binäres großes Objekt.

¹⁶⁹ Siehe Kapitel 2.5.d.

Standardabweichung angezeigt wird. Diese tritt typischerweise für Bereiche mit hohen globalen und lokalen Phasenänderungen oder -sprüngen auf, s. Abbildung 8.5. Mit dem Ziel, dass lediglich die lokalen Phasensprünge (oftmals Fehlstellenindikatoren) angezeigt werden, wird eine künstliche, globale Phasenverschiebung im Bild verursacht. Das heißt jeder Bildwert wird um den Bruchteil eines Phasensprungs¹⁷⁰ erhöht¹⁷¹. Wird dies in mehreren Schritten durchgeführt, wandern die globalen Phasenstreifen durch das Bild, während die lokalen örtlich nahezu gleichbleiben. Werden alle phasenverschobenen Bilder nun danach bewertet, wie oft eine Grenzwertüberschreitung an einem Ort auftritt, können die Bereiche mit lokalen Phasenstreifen durch eine abermalige Grenzwertdefinition separiert werden.

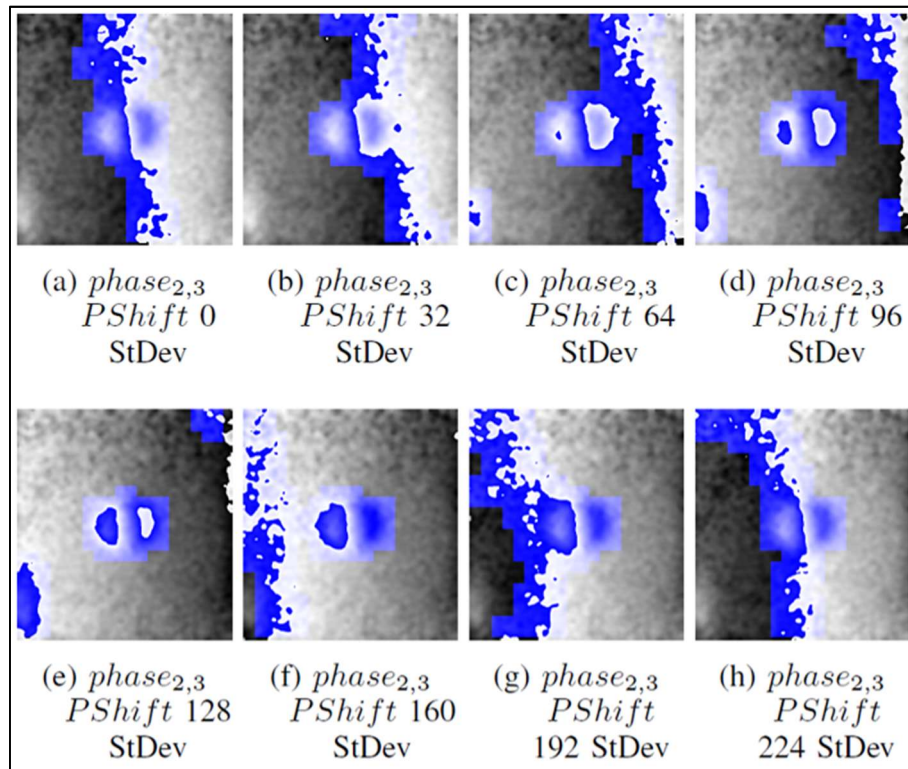


Abbildung 8.5: Der künstliche Phasenverschiebungsvorgang des entwickelten StDShift Evaluationsalgorithmus in acht Schritten vom gemessenen Shearogramm (oben links) zum fast vollständig um eine Phase verschobenen Shearogramm (unten rechts). Blau angezeigt werden lokale Bereiche mit einer Grenzwertüberschreitung der Standardabweichung, typischerweise im Bereich von Phasensprüngen. Die Phasenverschiebung verursacht in Bereichen mit lokalen Phasensprüngen (oftmals Fehlstellenindikatoren) keine örtliche Wanderung der blauen Bereiche, wodurch diese separiert werden können. Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].

Der dritte Algorithmus *GradShift* basiert auf der Bewertung der Steigungen im Shearogramm, welche für Bereiche mit Fehlstellenindikatoren (beispielsweise ausgeprägte Streifenkonzentrationen) erhöht ist. Durch die Evaluation direkt am Shearogramm kann die Rechenzeit von ca. 1 Sekunde¹⁷² für die Demodulation eingespart werden. Zunächst wird das Bild 2-fach phasenverschoben (vgl. *StDShift* oben). Anschließend werden die drei erzeugten Bilder lokal abgeleitet, vgl. Abbildung 8.6. Der Gradient

¹⁷⁰ Für eine 8 Bit Tiefenaufösung ergeben sich 256 Werte. Eine Erhöhung der Werte um beispielsweise 32 verursacht somit eine Phasenverschiebung um $1/8$.

¹⁷¹ Beachte: Anwendung einer Modulo-Operation für Werte über 256, s. auch Kapitel 2.5.d.

¹⁷² Siehe Kapitel 2.5.d.

eines Bildwerts wird in maximal einem der Gradientenbilder durch einen Phasensprung verfälscht, wo er je nach Sprungrichtung entweder sehr hoch oder sehr tief ist (schwarze und weiße Streifen).

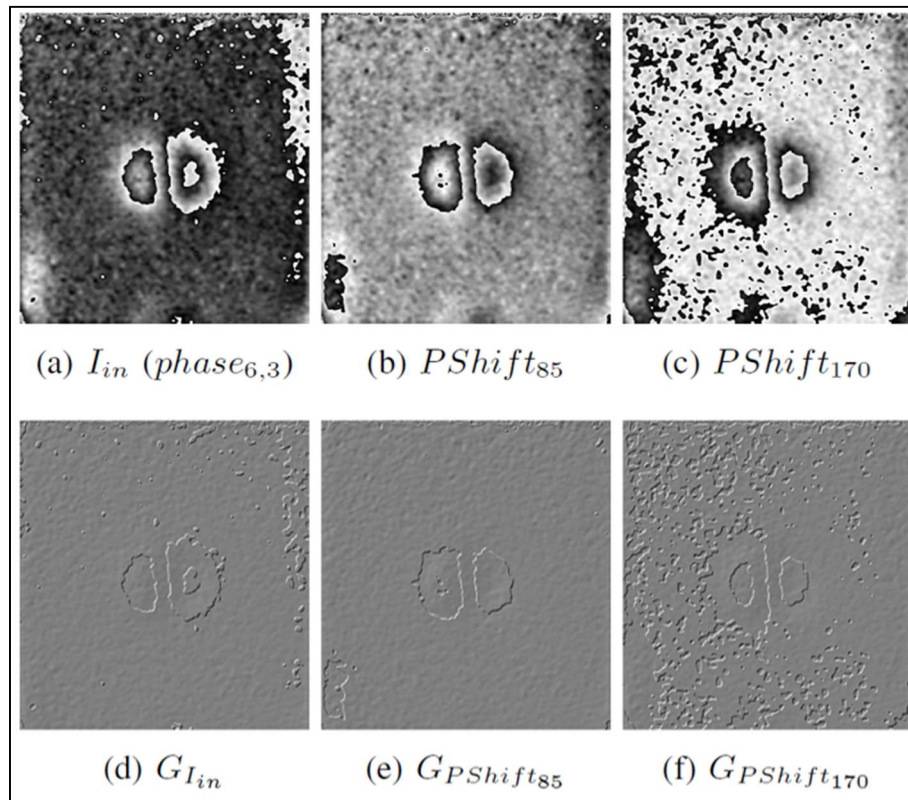


Abbildung 8.6: Der künstliche Phasenverschiebungsvorgang des entwickelten GradShift Evaluationsalgorithmus in drei Schritten (oben links nach oben rechts, s. auch StDShift Abbildung 8.5) und der jeweilige lokale Gradient des Shearogramms (untere Zeile). Er wird je Bildwert in maximal einem der Gradientenbilder durch einen Phasensprung verfälscht. Auf diese Weise kann ein unverfälschtes Gradientenbild erzeugt werden, s. Abbildung 8.7. Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].

Um ein Gradientenbild zu erzeugen, in dem kein Bildwert verfälscht ist, wird zunächst ein Maximalwert-Bild, ein Minimalwert-Bild und ein Summationsbild aus den drei Gradientenbildern berechnet¹⁷³. Werden die beiden ersten vom letzten subtrahiert, entsteht das unverfälschte Differenzbild, s. Abbildung 8.7. Dieses kann analog zum *MinMaxRoiMatching* (s. oben) mittels Grenzwertbetrachtung, *OpenOperation*, *BlobDetection* und *BlobMatching* evaluiert werden. Bei letzterem Schritt ist zu beachten, dass typischerweise drei Blobs in einem bestimmten Abstand zueinander einen fehlerstellenbehafteten Bereich deklarieren.

¹⁷³ Siehe Originalveröffentlichung [153].

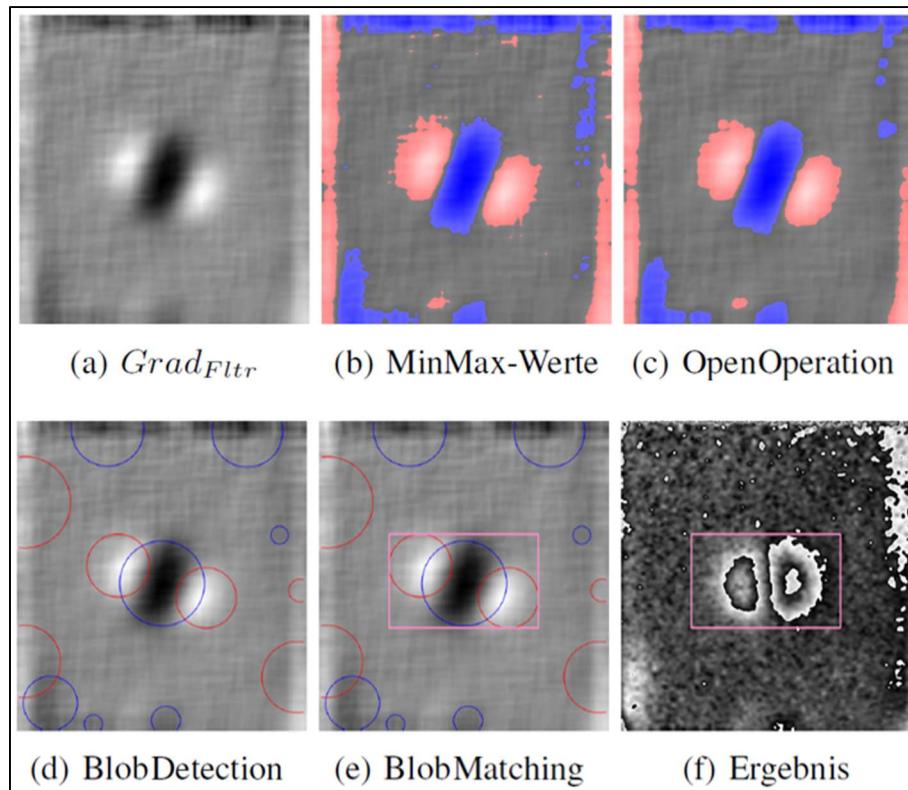


Abbildung 8.7: (Oben links) unverfälschtes Gradientenbild des Shearogramms, s. auch Abbildung 8.6; dieses kann analog zum MinMaxRoiMatching (s. Abbildung 8.4) (von oben mittig nach unten rechts) mittels Grenzwertbetrachtung, OpenOperation, BlobDetection und BlobMatching evaluiert werden. Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].

Mit *MinMaxRoiMatching* beträgt die durchschnittliche Evaluationsdauer für ein Bild 0,33 Sekunden, mit *StDShift* 0,45 Sekunden und mit *GradShift* 0,59 Sekunden, wobei die Algorithmen bisher nicht hinsichtlich ihrer zeitlichen Leistung optimiert wurden. Die Matrixgröße beträgt in den Versuchen lediglich ca. 0,4 Megapixel, was nur 1/6 der sonst vollflächigen Messung mit 2,3 Megapixel entspricht. Unter der Annahme, dass die Evaluationszeit linear zur Matrixgröße steigt, beträgt sie mit *MinMaxRoiMatching* 2 Sekunden, mit *StDShift* 2,7 Sekunden und mit *GradShift* 3,54 Sekunden. Im letzten Falle ergibt sich somit keine Zeitersparnis aufgrund der direkten Bewertung des Shearogramms anstatt der Demodulation, welche ca. 1 zusätzliche Sekunde¹⁷⁴ in Anspruch nimmt. Jedoch könnten auftretende Demodulationsproblematiken somit umgangen werden. Die angenommenen Zeiten zur Evaluation einer 2,3 Megapixel Matrixgröße werden zur Bewertung der Algorithmen in Tabelle 8.3 gegenübergestellt.

Tabelle 8.2 definiert die Bewertungskriterien für die Qualität einer Evaluation. Hierbei ist vor allem ein geringes Maß an falsch klassifizierten Bildern (rechte Spalte) entscheidend für die Einsatztauglichkeit eines Algorithmus. Im Fachjargon spricht man von „Pseudo“-(-Ausschuss), wenn Gutteile fälschlicherweise aussortiert werden, was vermeidbare Produktionskosten verursacht ([80] S. 25). Hingegen spricht man von „Schlupf“, wenn Schlechteile fälschlicherweise nicht aussortiert werden ([80] S. 21). Schlupf muss soweit wie möglich reduziert werden, da sich ansonsten ein Risiko des Bauteilversagens bei der weiteren Montage oder im Betrieb beim Kunden ergibt (für den Bereich Automobilbau). Im Bereich der Luft- und Raumfahrt ist Schlupf weitestgehend unzulässig, aufgrund dessen automatische Evaluationen nicht verwendet werden (vgl. Kapitel 1.5).

¹⁷⁴ Siehe Kapitel 2.5.d.

8. Automatisierung der Shearografie

Tabelle 8.2: Bewertungskriterien für die Qualität einer Evaluation nach [80]; problematisch sind falsch klassifizierte Teile, wobei „Pseudo“ die Produktionskosten steigert, „Schlupf“ jedoch ein Risiko des Bauteilversagens beim Kunden mit sich bringt.

Definition	Richtig klassifiziert	Falsch klassifiziert
In Ordnung (IO)	Spezifität ¹⁷⁵	FN ¹⁷⁶ / „Pseudo“
Nicht in Ordnung ¹⁷⁷ (NIO)	Sensitivität ¹⁷⁸	FP ¹⁷⁹ / „Schlupf“

Tabelle 8.3 stellt die Kennzahlen der Qualität und die Dauer der drei entwickelten Algorithmen, ermittelt auf Basis des Datensatzes (s. oben) gegenüber. Während *MinMaxRoiMatching* und *GradShift* kein Pseudo verursacht, ist der Schlupf mit *GradShift* am geringsten, die Evaluationsdauer jedoch am höchsten. *StDShift* liefert die geringste Evaluationsqualität, arbeitet jedoch am schnellsten. Aufgrund der vorhandenen Unterschiede kann ein Algorithmus beispielsweise je nach Anforderung der Prüfaufgabe (Produktionskosten, erforderliche Qualität oder verfügbare Zeit) eingesetzt werden. Optional könnte es eine Reihen- oder Parallelschaltung mehrerer Algorithmen geben.

Tabelle 8.3: Klassifikationsergebnisse und Evaluationsdauer der drei entwickelten Algorithmen für Bilder mit gut und schlecht sichtbarem Fehlstellenindikator (die Algorithmen wurden bisher nicht hinsichtlich ihrer zeitlichen Leistung optimiert); während MinMaxRoiMatching und GradShift kein Pseudo verursachen, ist der Schlupf mit GradShift am geringsten, die Evaluationsdauer jedoch am höchsten (Begriffe s. Tabelle 8.2). StDShift liefert die geringste Evaluationsqualität, arbeitet jedoch am schnellsten. Details s. Originalveröffentlichung [153].

Bewertung	Pseudo [%]	Schlupf [%]	Evaluationsdauer ¹⁸⁰ [s]
MinMaxRoiMatching	0	15,8	3 ¹⁸¹
StDShift	11,8	13,9	2,7
GradShift	0	12,5	3,54

Es ist offensichtlich, dass die Leistung aller drei Algorithmen ausbaufähig ist, was in zukünftigen Untersuchungen auch weiterverfolgt wird. Nichtsdestotrotz wird deutlich, dass sich eine automatische, shearografische Serienüberwachung mit einfachen Mitteln der Bildverarbeitung implementieren lässt. Dies wird durch die Kennzahlen in Tabelle 8.4 für die Evaluation von Bildern mit ausschließlich gut sichtbarem¹⁸² Indikator bekräftigt. *MinMaxRoiMatching* liefert perfekte Ergebnisse, während *StDShift* schneller arbeitet, jedoch Pseudo verursacht. Mit *GradShift* ergibt sich Schlupf, zudem arbeitet der Algorithmus am langsamsten. Infolgedessen ist er für diese Anwendung nicht vorteilhaft.

¹⁷⁵ Anteil der korrekt als IO klassifizierten Gutteile.

¹⁷⁶ False Negative, dt.: fälschlicherweise als NIO klassifiziertes Gutteil.

¹⁷⁷ Im Falle mehrerer Fehlstellen, wenn mindestens ein Indikator als NIO bewertet wird.

¹⁷⁸ Anteil der korrekt als NIO klassifizierten Schlechteile.

¹⁷⁹ False Positive, dt.: fälschlicherweise als IO klassifiziertes Schlechteil.

¹⁸⁰ Details s. Text unterhalb von Abbildung 8.7.

¹⁸¹ Inklusive 1 Sekunde für die Demodulation, s. Kapitel 2.5.d.

¹⁸² Die Sichtbarkeit wird manuell bewertet, wie sie ein geschulter Prüfer vornehmen würde (s. Anfang Kapitel 8; Beispiel s. Originalveröffentlichung [153]).

8. Automatisierung der Shearografie

Tabelle 8.4: Klassifikationsergebnisse und Evaluationsdauer der drei entwickelten Algorithmen für Bilder mit gut sichtbarem Fehlstellenindikator (die Algorithmen wurden bisher nicht hinsichtlich ihrer zeitlichen Leistung optimiert); MinMaxRoiMatching liefert perfekte Ergebnisse, während StDShift schneller arbeitet, jedoch Pseudo verursacht (Begriffe s. Tabelle 8.2). GradShift ist für diese Anwendung nicht optimal. Details s. Originalveröffentlichung [153].

Bewertung	Pseudo [%]	Schlupf [%]	Evaluationsdauer ¹⁸⁰ [s]
MinMaxRoiMatching	0	0	3 ¹⁸¹
StDShift	11,8	0	2,7
GradShift	0	2,5	3,54

Dekorrelationserkennung

Neben den drei Evaluationsalgorithmen wurde ein Algorithmus zur Dekorrelationserkennung (s. Kapitel 2.6.d) in Phasenbildern entwickelt. Die damit verbundene Idee ist eine Sortierung der Rohdaten vor der eher zeitaufwändigen Evaluation. SPS ermöglicht die Erfassung von Bildern in der Taktzeit der Kamera, wodurch große Datenmengen innerhalb kürzester Zeit angesammelt werden können. Fehlerhafte Messungen, beispielsweise durch zufällige Störungen wie Vibrationen o. Ä., würden durch eine Dekorrelationserkennung einfach verworfen. Stattdessen wird in dem Falle ein Messergebnis unmittelbar vor oder nach diesem Zeitpunkt evaluiert. Der Algorithmus kann auch genutzt werden, um die Anwendung des Interferoskops (IFK) zu verbessern. Wird das IFK bei der Messung von Hand geführt, ist der Großteil der erfassten Ergebnisse prinzipbedingt dekorreliert, s. Kapitel 5.2.b. Diese Daten könnten für einen Prüfer automatisch vorselektiert werden.

Um den entwickelten Algorithmus zu testen, wird ein Datensatz mit 68 Bildern mit wenig oder keinem und 30 Bildern mit starkem Dekorrelationsanteil erzeugt, wobei der Anteil kontinuierlich zunimmt. Die Matrixgröße beträgt 2,3 Megapixel entsprechend einem vollflächig erfassten Bild mit dem MZ Messgerät. Die Nutzbarkeit eines Bildes für eine darauffolgende Evaluation wird manuell bewertet, wie sie ein geschulter Prüfer vornehmen würde (s. Anfang Kapitel 8).

Der entwickelte Algorithmus *GradShiftDekor* basiert auf dem *GradShift* Algorithmus (s. oben), wobei das unverfälschte Gradientenbild mittels Fensterfunktion nach der lokalen Standardabweichung bewertet wird. Diese fällt für dekorrelierte Bereiche höher aus, wodurch ein Grenzwert definiert werden kann. Es ist zu beachten, dass Bereiche mit Fehlstellenindikator ebenfalls höhere Standardabweichungen aufweisen, s. Abbildung 8.8 linke Spalte. Von daher wird ein definierter Prozentsatz der Bildfläche mit zu hoher Standardabweichung festgelegt, ab dem das Bild als NIO klassifiziert wird, s. Abbildung 8.8 mittlere und rechte Spalte.

Der Algorithmus klassifiziert lediglich eines der 98 Bilder falsch. Dies ist auf die subjektive Bewertung des kontinuierlich zunehmenden Dekorrelationsanteils in den Bildern des Datensatzes zurückzuführen. Sie entspricht nicht der objektiven Bewertung des Algorithmus am Rande zur Grenzflächenüberschreitung, was durch eine einfache Feineinstellung der Programmparameter vermeidbar ist. Qualitativ gesehen ist der Algorithmus damit einsatztauglich. Die Bewertungsdauer je Bild beträgt jedoch durchschnittlich 0,49 Sekunden, da er bisher nicht hinsichtlich seiner zeitlichen Leistung optimiert wurde. Das verfolgte Zielszenario bei der Anwendung des handgeführten IFK ist die Erfassung von 100 Bildern in 2 Sekunden, worauf eine Dekorrelationserkennung in darauffolgenden 2 Sekunden abgeschlossen ist. Demnach wäre eine Bewertung in 0,02 Sekunden pro Bild, hier also entsprechend der Kamerataktzeit, erforderlich.

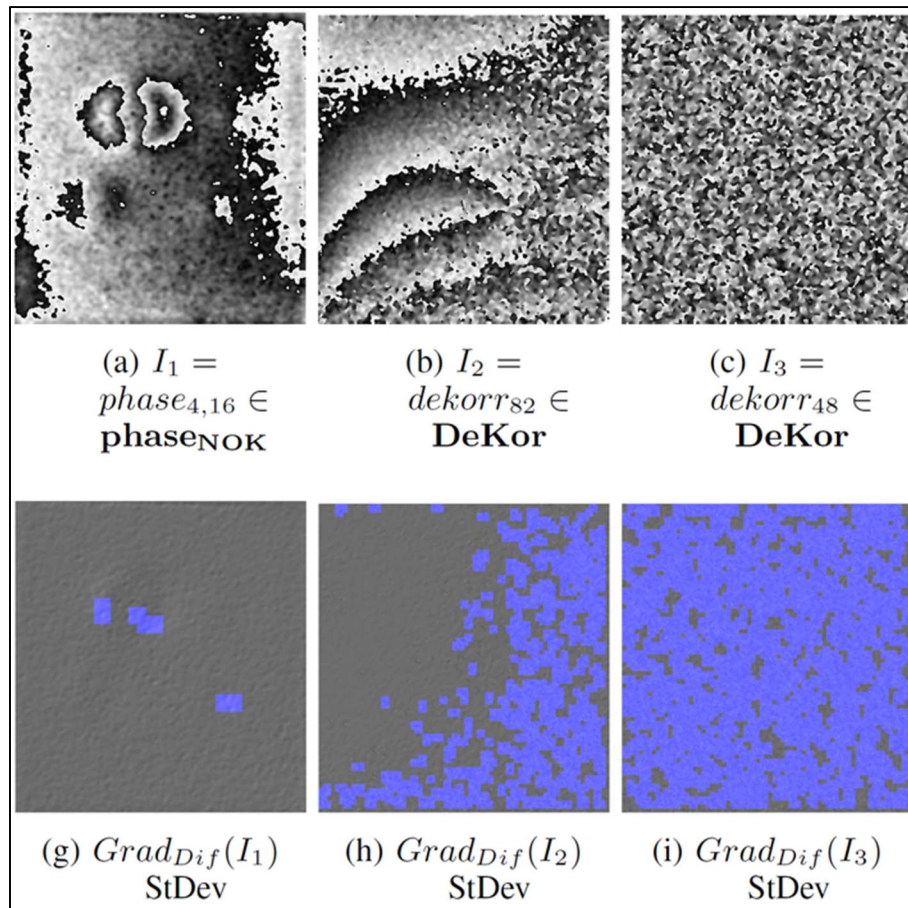


Abbildung 8.8: (Obere Zeile) diverse Shearogramme mit von links nach rechts zunehmendem Dekorrelationsanteil; (untere Zeile) jeweiliges Gradientenbild mit Dekorrelationsanzeige (blau), ausgewertet mithilfe des entwickelten GradShiftDekor Algorithmus (s. auch GradShift Algorithmus, Abbildung 8.7); für Fehlstellenindikatoren (linke Spalte) und Dekorrelationen (mittige und rechte Spalte) ergeben sich lokale Bereiche mit erhöhter Standardabweichung (Grenzüberschreitung blau markiert). Ist der prozentuale Flächenanteil der grenzüberschreitenden Standardabweichung zu hoch (untere Zeile, kontinuierlicher Übergang von links nach rechts), wird das Bild verworfen und nicht evaluiert. Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].

8.2. Ausgewählte Prüfergebnisse aus dem Bereich der Automatisierung

Im Folgenden werden zunächst zwei anschauliche Anwendungen der neuen Messtechnik vorgestellt. Dabei wird die Flexibilität und die Verfahrensrobustheit mit der entwickelten automatischen Datenerfassung unter Beweis gestellt. Abschließend folgt eine Betrachtung zur automatischen Evaluation für Objekte mit einer ausgeprägten Geometrie. Die Evaluation in einer entsprechenden Prüfreihe kann mittels Vergleich zu einem „Gutteil-Shearogramm“ vereinfacht werden. Die Kapitelüberschriften gliedern sich in „Messgerät, Bauteil, Automatisierungsschritt¹⁸³“.

8.2.a. MZ, NFK Monocoque (proTRon EVOLUTION), Datenerfassung

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messtechnik (s. Kapitel 5 und 6) wurde in einem einwöchigen Test in der Maschinenhalle der Hochschule Trier eingesetzt. Sie wurde ca. 8 Stunden pro Tag verwendet, teilweise zur automatisierten Prüfung, teilweise bei individueller, robotergeführter Handhabung. Im Gegensatz zum Labor herrschen dort schwierigere Umgebungsbedingungen wie Temperatur- und

¹⁸³ Es wird nach „Datenerfassung“ und „Datenevaluation“ unterschieden.

8. Automatisierung der Shearografie

Luftfeuchteänderungen, Fremdlicht- und Staubeinflüsse sowie Vibrationen durch Maschinen und Fahrzeuge. Insgesamt wurden drei unterschiedliche Kfz und ein GFK Boot geprüft. Dabei wurden u. a. die Karosserien, Crashelemente, Sitze, Armaturenbretter, Verkleidungen und der Bootsrumpf erfasst. Die Prüfung bezieht sich auf Schlag-, Klebe- und Beschichtungsschäden sowie Risse, Ondulationen, Delaminationen und Laminierfehler. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse am NFK Monocoque des Kraftfahrzeugs *proTRon EVOLUTION* vorgestellt.

Der *EVOLUTION* ist das neueste von *Team proTRon* (Hochschule Trier) entwickelte Leichtbaufahrzeug. „Hauptaugenmerk liegt dabei auf einer klima- und umweltverträglichen Mobilität.“ „Durch konsequenten Leichtbau und ein innovatives Sicherheitskonzept erfüllt das Fahrzeug mit einem Gesamtgewicht von nur 550kg (inklusive Akku) alle Vorgaben für die Zulassung [...] und wird mit Blick auf eine mögliche Serienfertigung entwickelt.“ [71] Das Herzstück des Fahrzeugs ist das ca. 2,4 m lange, 1,3 m breite und 1,35 m hohe Monocoque, welches nahezu vollständig aus NFK besteht und in studentischer Handarbeit gefertigt wurde, s. Abbildung 8.9.

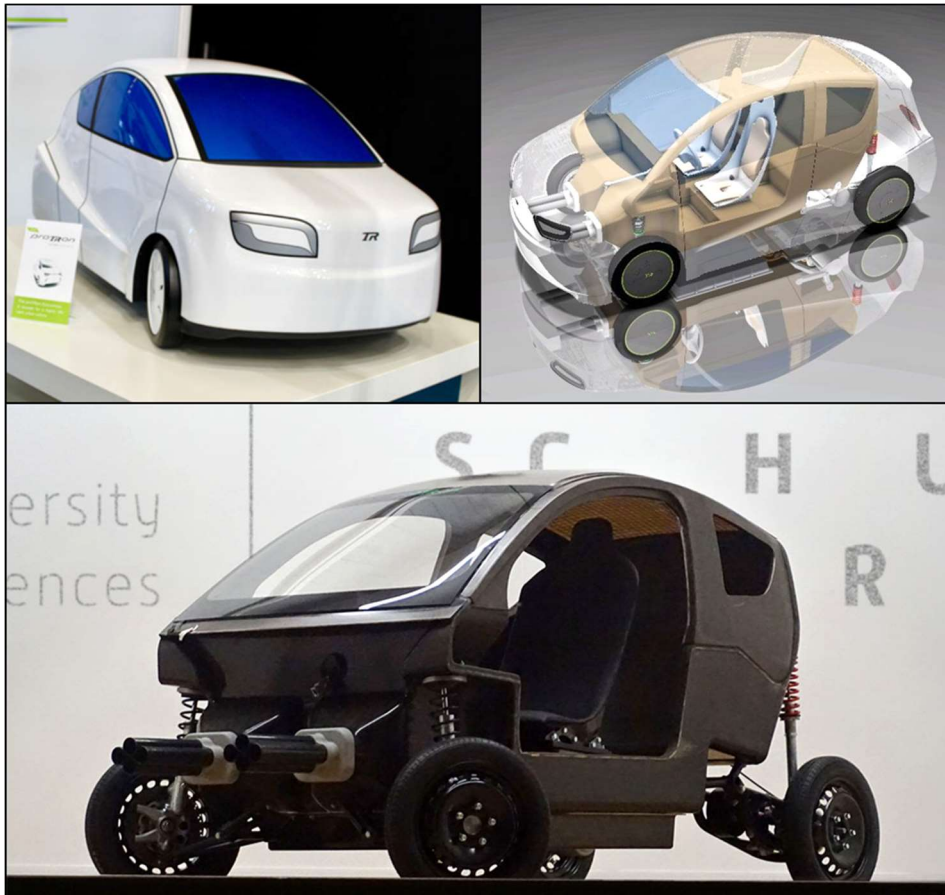


Abbildung 8.9: [71] (Oben links) verkleidetes Modell des Leichtbaufahrzeugs *proTRon EVOLUTION*; (oben rechts) halbtransparente CAD-Ansicht mit hervorgehobenem Monocoque im Fahrzeug; (unten) das NFK Monocoque mit Fahrwerkskomponenten als „Rolling Chassis“.

Für die unterschiedlichen Prüfungen wird ein „Messkopf“ an einem kollaborierenden Roboterarm angebracht, s. Abbildung 8.10. Der Messkopf besteht aus dem MZ Messgerät, einer Thermografiekamera und zwei 500 W Halogenstrahlern. Der Arm ist an einem Rollentisch befestigt, an dem der Robotercontroller und ein Messrechner mit der Software OPTIS 4 bedient wird. Neben den Halogenstrahlern wird auch die Vakuumhaube zur Anregung verwendet. Durch die programmierbare Roboterführung

kann das Monocoque von fast allen Seiten und auch von innen geprüft werden. Die Prüffläche beträgt 0,4 m x 0,3 m bei einem Abstand von 0,5 m. Die beiden AA Batterien der Laserdioden-Versorgung werden vorsorglich alle 12 Betriebsstunden ausgetauscht. Aufgrund der teilweise stark lichtabsorbierenden oder glänzenden NFK Oberflächen muss die Belichtungszeit des MZ Messgerätes in einigen Fällen auf bis zu 0,1 Sekunden erhöht werden. Zudem begünstigt der bewegliche Rollentisch sowie der lange Hebelarm des Roboters Vibrationen und damit Dekorrelationseinflüsse. Dennoch können unter allen Umständen stabile Prüfungen durchgeführt werden, sofern kurze Einschwingzeiten von bis zu 1 Sekunde nach dem Anfahren einer Prüfposition eingehalten werden. Andere Vibrationseinflüsse in der Maschinenhalle (Insassenschutz-Crashprüfstand, Motorenprüfstand, Gabelstapler- und Personenbetrieb, Dreh-, Fräs- und Wasserstrahlschneidmaschine, Schweißroboter etc.) sind aufgrund des Betonfundaments unproblematisch. Einflussreicher sind die dabei entstehenden akustischen Schwingungen, welche die große Monocoque-Struktur anregen können. Durch eine passendere Prüfobjekt-Lagerung¹⁸⁴ könnte dies jedoch vermieden werden.

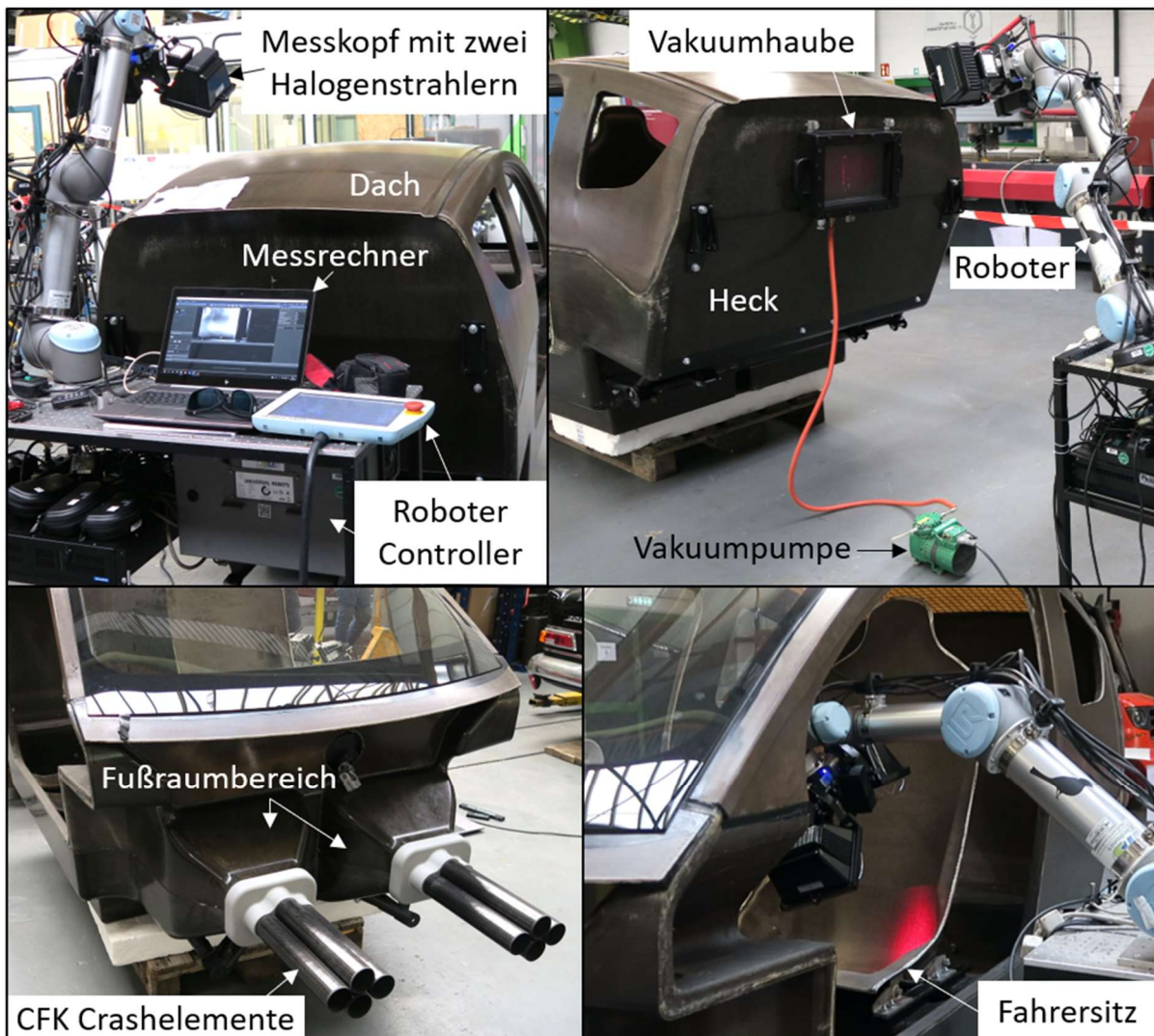


Abbildung 8.10: Prüfung des NFK Monocoques mittels Messkopf an einem Roboterarm; der Messkopf besteht aus dem MZ Messgerät, einer Thermografiekamera und zwei Halogenstrahlern. Von fast allen Seiten können unterschiedliche thermografische und shearografische Prüfungen mit Halogenstrahler- und Vakuumbauben-Anregung durchgeführt werden. Am Rollentisch wird der Robotercontroller und der Messrechner mit OPTIS 4 bedient.

¹⁸⁴ Derzeit: Holzpalette + Dämmschaumpanel, s. Abbildung 8.10 oben rechts und unten links.

8. Automatisierung der Shearografie

Zur Prüfung der Dachstruktur wird der Messkopf an einem Stativ angebracht. Auf diese Weise wird die Intaktheit des Verbunds von NFK Laminat und powerRibs™¹⁸⁵ unter thermischer Belastung geprüft. Die Vakuumhaube wird zur Prüfung des ca. 21 mm dicken Dachholms¹⁸⁶ auf Delaminationen eingesetzt, s. Abbildung 8.11. Die wechselnde Sonnenlichteinstrahlung durch die Dachfenster der Maschinenhalle sind bei der Erfassung der shearografischen Messergebnisse unproblematisch. Sie bewirkt jedoch eine bemerkbare Anregung der Monocoque-Dachstruktur, die bei der Prüfung beachtet werden muss.

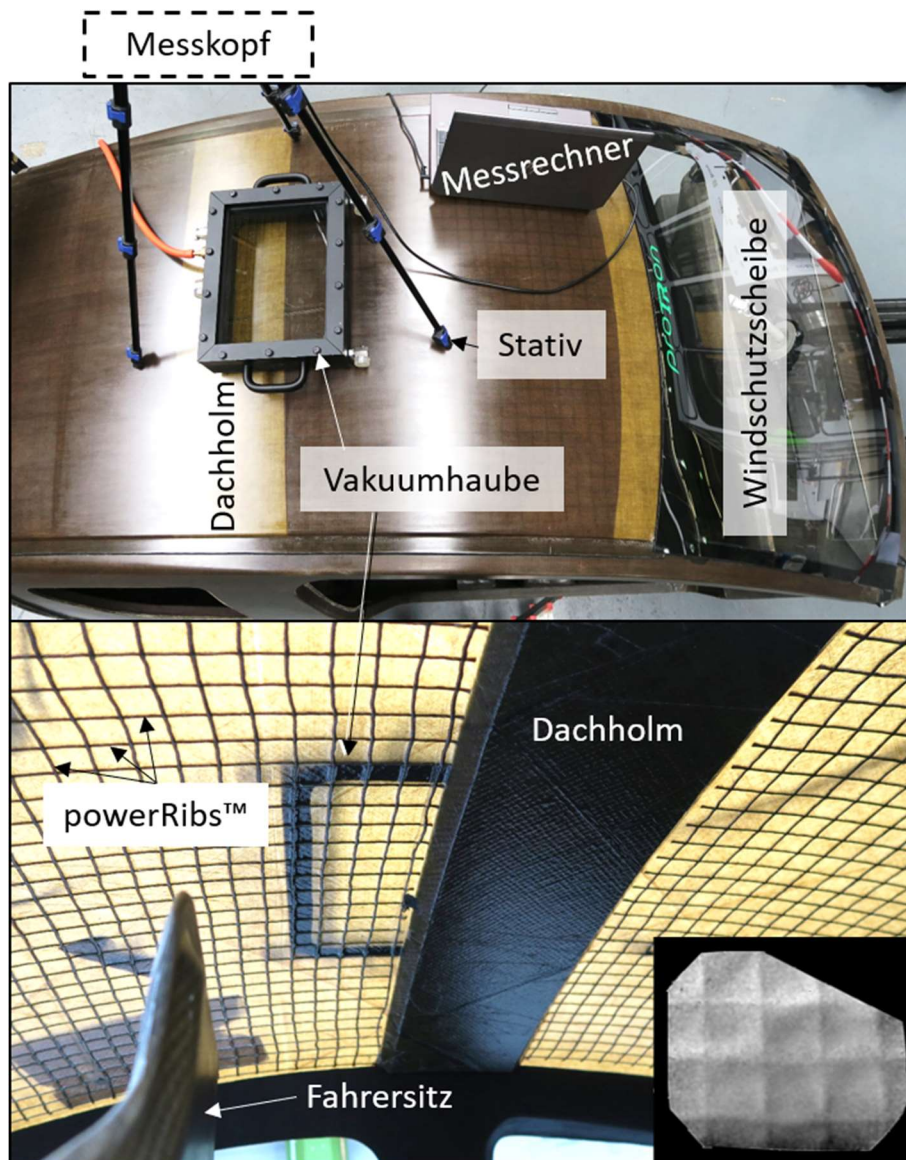


Abbildung 8.11: Prüfung des Laminat-powerRibs™¹⁸⁵-Verbunds der Dachstruktur mittels thermischer Anregung und Prüfung des ca. 21 mm dicken Dachholms mittels Vakuumhaube; der Messkopf, bestehend aus dem MZ Messgerät, einer Thermografiekamera und zwei Halogenstrahlern, wird dabei an einem Stativ installiert (hier nur schematisch angedeutet). (Unten rechts) beispielhaftes dual-shear Verformungsbild des Laminat-powerRibs™¹⁸⁵-Verbunds.

¹⁸⁵ Schnüre aus Naturfasern zur Strukturverstärkung.

¹⁸⁶ Schaumkern-Sandwich-Aufbau.

8. Automatisierung der Shearografie

Die ca. 950 mm hohe, 750 mm breite und 25 mm dicke Seitenwand¹⁸⁶ hinten links wird mittels Roboterprogramm und automatischer Datenerfassung durch den Messkopf rasternd geprüft, s. Abbildung 8.12. Es werden knapp 70 Prüfpositionen mit sich überlappenden Prüfflächen angefahren. Die Anfahrts- und Haltezeit je Prüfposition beläuft sich auf durchschnittlich 2,5 Sekunden. Die Gesamtdauer der Datenerfassung beträgt somit ca. 3 Minuten. Aus der Evaluation ergeben sich 4 Indikatoren, s. Abbildung 8.12 rechts (rot markiert), welche in Absprache mit der Fertigung näher untersucht werden müssen¹⁸⁷.

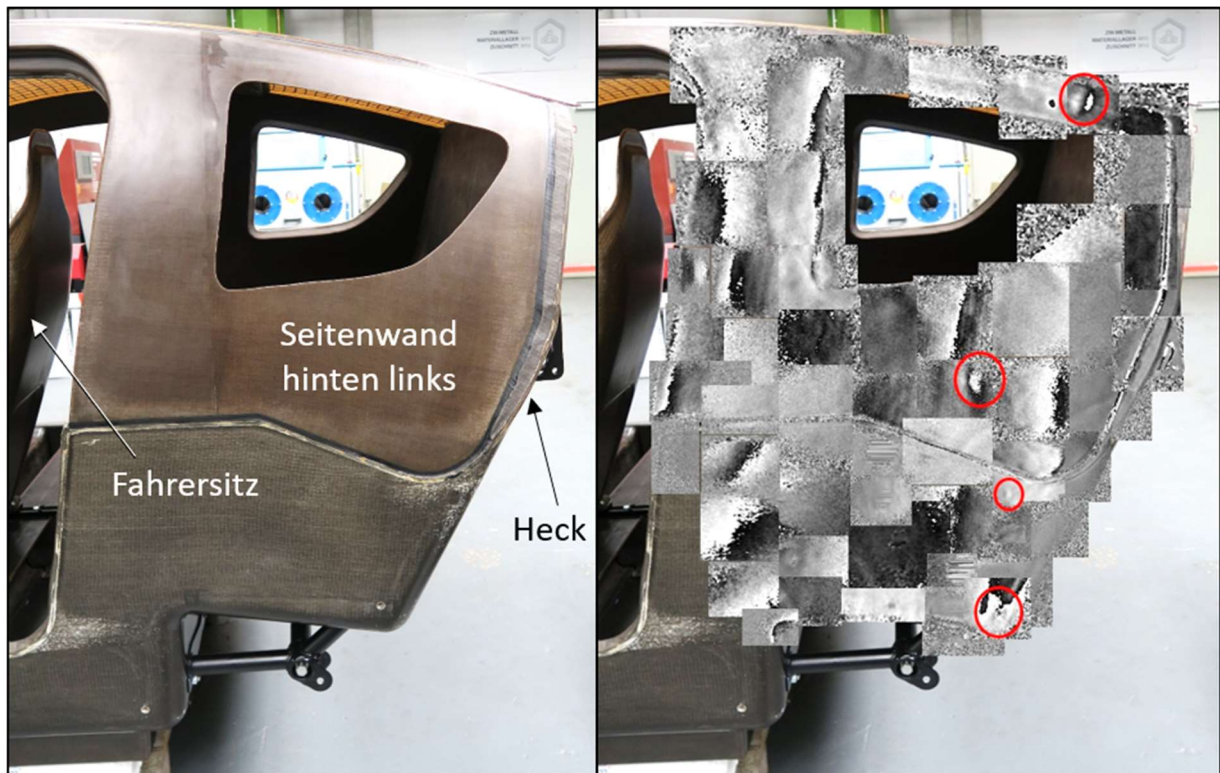


Abbildung 8.12: Automatische Datenerfassung der ca. 950 mm x 750 mm großen Seitenwand hinten links mit robotergeführtem Messkopf; der Messkopf besteht aus dem MZ Messgerät, einer Thermografiekamera und zwei Halogenstrahlern. 70 Positionen mit überlappenden Prüfflächen werden mittels einprogrammiertem Verfahrensweg abgefahren und in jeweils ca. 2,5 Sekunden geprüft. Die Gesamtprüfdauer beträgt ca. 3 Minuten. Aus der Evaluation ergeben sich 4 Indikatoren (rot markiert), welche näher untersucht werden müssen.

Aus dem einwöchigen Test in der Maschinenhalle kann geschlossen werden, dass die entwickelte SPS Messtechnik sowohl automatisiert einsatztauglich ist, als auch bei der individuellen Verwendung flexibel und robust arbeitet. Die automatische Evaluation richtet sich nach der speziellen Prüfaufgabe und muss gezielt vorbereitet werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig. Während der gesamten Prüfzeit sind keine bemerkenswerten Problematiken aufgetreten. Einzig die Belichtungsbedingungen bei unvorbereiteten Oberflächen, vor allem im Falle von dunklem NFK, setzen der shearografischen Lasermesstechnik Grenzen bei der Verfahrensrobustheit. Höhere Lasersicherheitsanforderungen können bei der Prüfung „im Feld“ z. T. nur mit hohem Aufwand umgesetzt werden, beispielsweise durch das Abstecken eines Laserbereichs oder den Einsatz von Laserschutzwänden. Im vorliegenden Falle wird daher¹⁸⁸ zur Verfahrensstabilisierung bei der robotergeführten Datenerfassung mit kurzen

¹⁸⁷ Im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter diskutiert.

¹⁸⁸ Ein Laserschutzbereich wird dennoch abgesteckt, nicht zuletzt um auch die sensible Prototypen-Messtechnik gegen Unvorhergesehenes zu schützen.

Einschwingzeiten gearbeitet, welche die Gesamtprüfdauer steigern. (Bei einer industriellen Serienprüfung mit Prüfzelle entfällt diese Problematik gänzlich.) Nichtsdestotrotz hat sich abermals bestätigt, dass die shearografische Prüfung schneller auf eine Anregung anspricht als die thermografische, wie bereits in Kapitel 6.1.b beschrieben. Somit ist die Gesamtprüfdauer trotz Einschwingzeiten oftmals geringer, z. T. sogar halbiert. Ebenfalls kann der universelle Einsatz der Halogenstrahler und der Vakuumbaube für viele unterschiedliche Fehlstellenarten bestätigt werden, wie bereits in 6.2.a aufgezeigt. Die industrienahen Umgebungsbedingungen in der Maschinenhalle haben sich als unproblematisch für die neue SPS Messtechnik erwiesen. Die Umgebungsanforderungen für spezielle Einsatzfälle (z. B. Gießerei, Fließbandfertigung usw.) werden seitens des Autors als „pragmatisch und wirtschaftlich lösbar“ bewertet. Eine zukünftige Erweiterung, welche im Rahmen des Tests definiert wird, ist die Kopplung der Shearografie mit einer optischen Messtechnik zur absoluten 3D-Formerfassung. Auf diese Weise wäre die Referenzierung der Prüfpositionen, die Ergebniszusammensetzung sowie die Ergebnisdarstellung bei großen Objekten einfacher, reproduzierbar und aussagekräftiger bzgl. der Geometrieinflüsse des Prüfobjektes.

Abschließend zu diesem Fazit kann festgehalten werden, dass der Bau des *proTRon Evolution* ein innovatives Forschungs- und Entwicklungsprojekt ist. Er repräsentiert bereits jetzt die Leichtbauphilosophie, welche im Automobil der Zukunft Einzug finden wird (vgl. auch Kapitel 1.1). Die notwendige Qualitätssicherung der eingesetzten Werkstoffe mittels ZfP kann weitestgehend shearografisch erfolgen. Dabei liefert die weiterentwickelte SPS DS die Kernvorteile einer schnellen, robusten und flexiblen Prüfung.

8.2.b. IFK 5, GFK COPV, Datenerfassung

Aufgrund der Stabilisierung des IFK 5 mittels VDS MZ Aufbau ist die COPV Innenprüfung (s. Kapitel 7.3.e) automatisiert durchführbar, wobei keine besonderen Umgebungsbedingungen vorausgesetzt werden. Das IFK wird von dem Robotergreifer geführt und das Endoskop in den COPV bewegt, s. Abbildung 8.13. Dort werden 12 Prüfpositionen durch das Roboterprogramm angefahren, wodurch die gesamte Mantelfläche abgebildet wird. Jeder Prüfungsvorgang dauert ca. 8 Sekunden. Doch zunächst wird 1 Sekunde als Einschwingzeit vorgesehen, um Schwingungen des Roboterarms aufgrund seines großen Hebelarms auszugleichen. (Das IFK selbst reagiert unempfindlich auf Bewegungen in Richtung der Endoskop-Achse.) Folglich wird die Verformung während dem 5 Sekunden Anregungsburst erfasst. Die automatische Evaluation ist anschließend in 3 Sekunden abgeschlossen. Gleichzeitig wird die nächste Prüfposition (inkl. Einschwingzeit) angefahren. Das Ein- und Ausfahren¹⁸⁹ des Endoskops in den COPV dauert jeweils ca. 2 Sekunden, wodurch die Mantelinnenprüfung in knapp 1,5 Minuten¹⁹⁰ abgeschlossen ist. Bezüglich Informationen zur Datenevaluation sei auf Kapitel 7.3.e verwiesen. Zukünftig soll die Umrüstung der Endoskope am IFK ebenfalls automatisch erfolgen, sodass die Prüfung der Mantelinnen- und der Bodenfläche im selben Prüfungsvorgang möglich ist. Für eine Serienprüfung ist auch der Einsatz eines zweiten Messgeräts denkbar, um die Taktzeit weiter zu reduzieren. Darüber hinaus ergeben sich Zeitvorteile und eine erhöhte Aussagesicherheit durch eine gekoppelte, gleichzeitige Innen- und Außenprüfung.

¹⁸⁹ Ohne Erreichen der in Abbildung 8.13 dargestellten Ausgangsposition, da diese bei einer Prüfreihe mit automatischer COPV-Zuführung hinfällig wäre.

¹⁹⁰ 3 Sekunden (Einfahren inkl. Einschwingzeit) + 12 Prüfpositionen x 8 Sekunden (je Prüfung) - 3 Sekunde (Evaluation der letzten Prüfung erfolgt parallel zum Ausfahren).

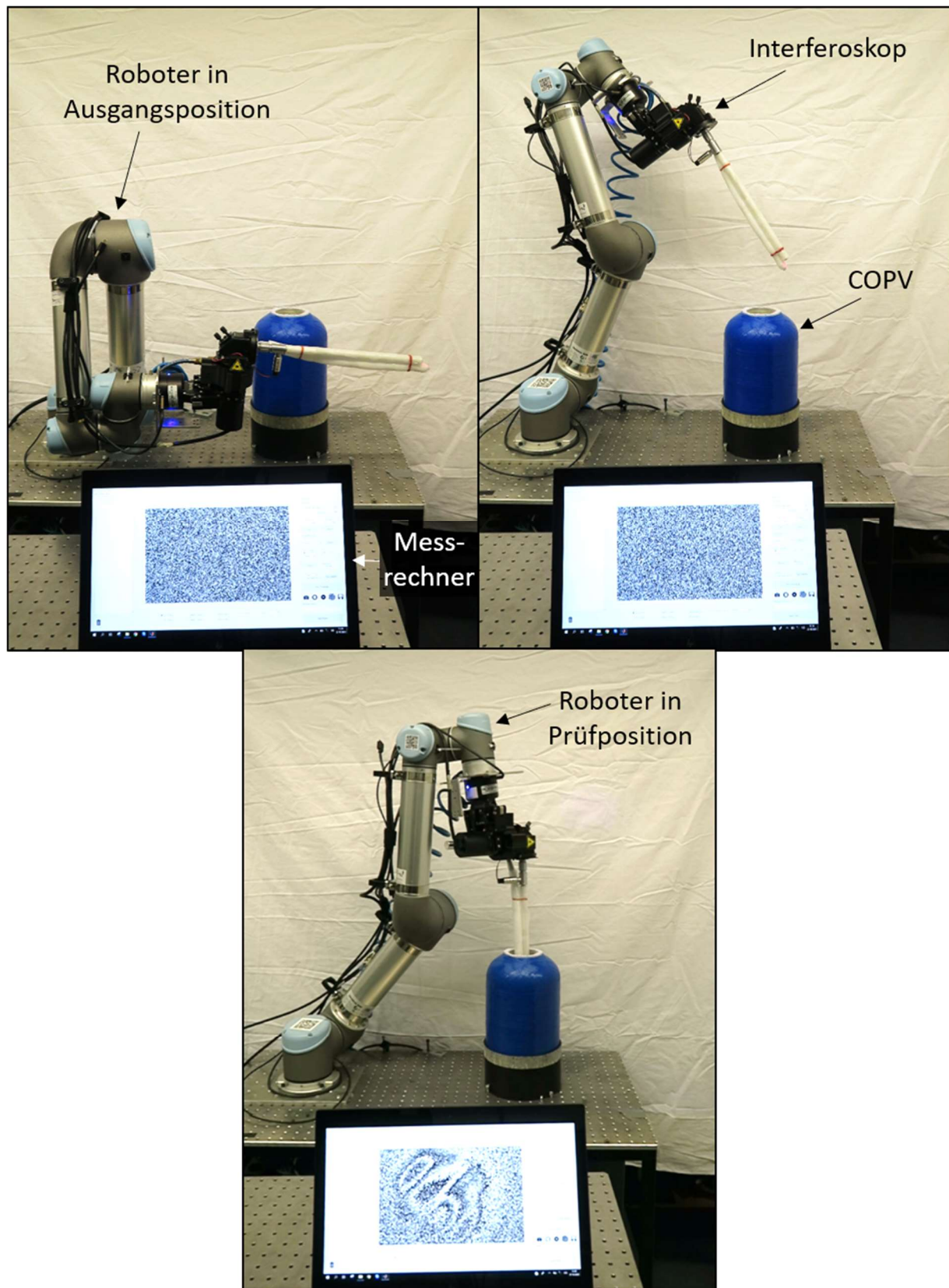


Abbildung 8.13: Automatische Innenprüfung eines COPV mittels robotergeführtem IFK; mit dem 90° Endoskop werden 12 Prüfpositionen angefahren, wodurch die gesamte Mantelinnenfläche erfasst wird. Die Gesamtprüfdauer beträgt knapp 1,5 Minuten. Weitere Informationen finden sich in Kapitel 7.3.e.

8.2.c. MZ, Kunststoff Kfz-Türgriffe, Datenevaluation

Beim Spritzguss von Kfz-Türgriffen können Problematiken mit der Formfüllung auftreten. Es resultieren unsichtbare Gaseinschlüsse oder bis zur Oberfläche reichende Hohlräume in den Bauteilen. Aufgrund der komplexen Griffgeometrien können beide Fehlstellenarten bei einer Sichtprüfung unentdeckt bleiben. Durch Feuchtigkeitseinflüsse in den Hohlräumen werden Fehler bei der Beschichtung (z. B. Chromieren) verursacht. Beschichtungsablösung aufgrund von Gaseinschlüssen ergibt sich jedoch erst nach der Materialalterung durch andauernde Temperaturschwankungen beim Kunden (s. auch Kapitel 6.1.a). Eine shearografische Prüfung kann dem Spritzgießen nachgeschaltet werden, um fehlerstellenbehaftete Teile frühzeitig zu erkennen. Hierbei könnte sogar die Prozesswärme der abkühlenden Teile als Anregung genutzt werden. Abbildung 8.14 zeigt die ca. 200 mm langen, 45 mm breiten und 40 mm hohen¹⁹¹ Griffe, die im Folgenden untersucht werden. Sie sind unbeschichtet und weisen eine variable Wandstärke auf, welche im Mittel ca. 3 mm beträgt. Es ist zunächst unbekannt, welche der Teile fehlerstellenbehaftet sind.



Abbildung 8.14: Vier gleiche Spritzguss Kfz-Türgriffe mit einer Länge von ca. 200 mm; Firmenlogos etc. wurden durch schwarze Rechtecke unkenntlich gemacht. Die Griffe weisen komplizierte Geometrien auf, welche bei einer thermischen Belastung zu komplexen Verformungen führen, vor allem für den Bereich mit rückseitig angebundenem Steg (s. Detailansicht links).

Die Griffe werden mit zwei 500 W Halogenstrahlern für 3 Sekunden angeregt. Anschließend wird die oop Verzerrung $\partial w / \partial x$ bei der Abkühlung für 3 Sekunden shearografisch erfasst. Abbildung 8.15 zeigt die jeweiligen Shearogramme (S) und die demodulierten Verzerrungsbilder (V). Alle Shearogramme weisen im oberen linken Bereich zwei annähernd halbkreisförmige, vertikal verlaufende Streifen auf. Darüber hinaus zeigt sich in S1, S2 und S3 mittig vertikal verlaufend eine linienförmige Phasenänderung, welche in S1 oben kürzer ist (gelb markiert). Die Änderung besitzt jeweils oben und unten einen länglichen Phasensprung, woraus der typische shearografische Fehlstellenindikator (Schmetterlingsmuster) resultiert. In S4 ist die linienförmige Phasenänderung nur sehr schwach ausgeprägt. Das entsprechende Verzerrungsbild V4 lässt darauf schließen, dass sich dieses Bauteil bei der Abkühlung ins-

¹⁹¹ Exklusive der Stege.

gesamt am geringsten verzerrt. Aufgrund der komplexen Bauteilgeometrie kann die Position des relativen Verzerrungsnullpunkts sowie die übergeordnete Gesamtverformung¹⁹² nicht ohne weiteres abgeschätzt werden.

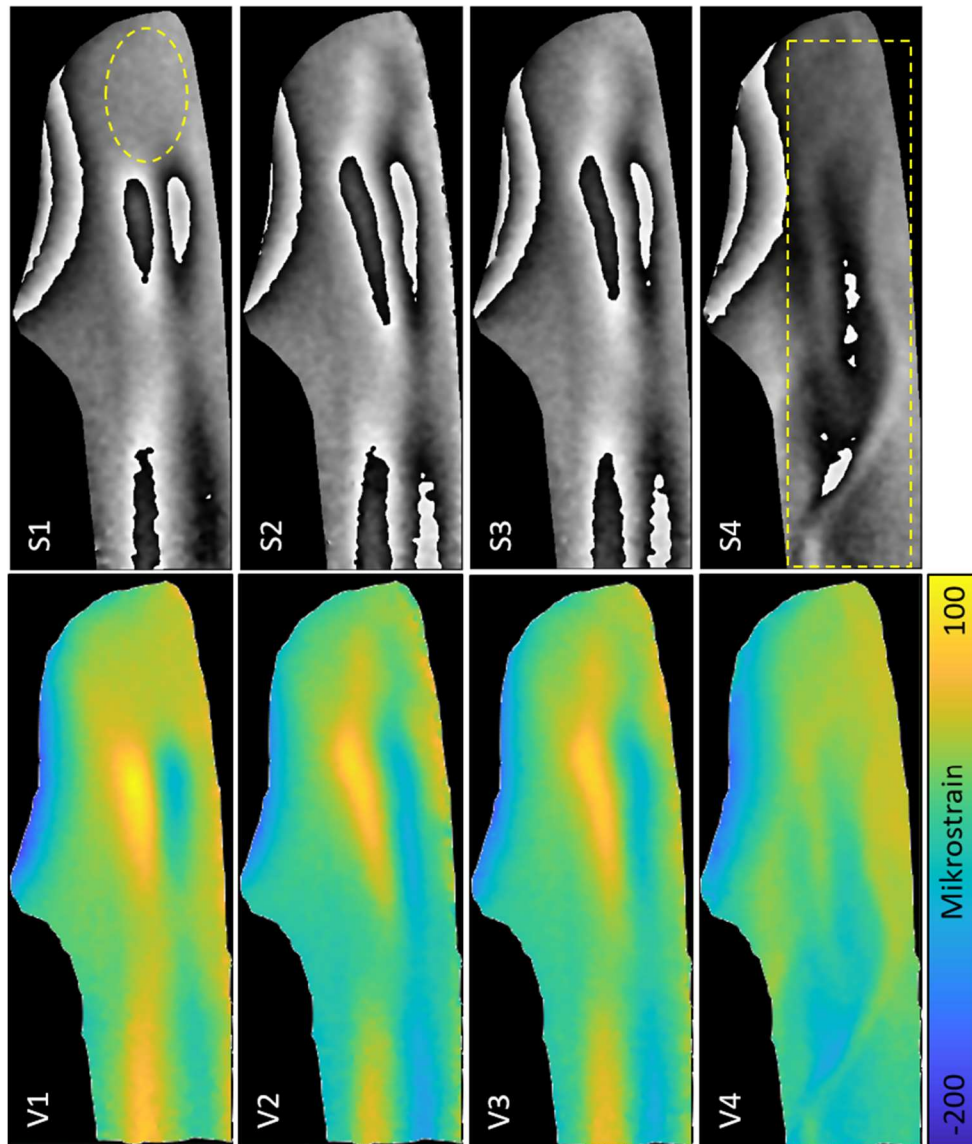


Abbildung 8.15: Shearogramme (S) und demodulierte Verzerrungsbilder (V) beim Abkühlen der Türgriffe (Abbildung 8.14) nach einem optischen Anregungsburst; aufgrund der komplexen Bauteilgeometrien ergeben sich ausgeprägte Verzerrungen. Infolgedessen kann nicht unmittelbar auf Fehlstellen geschlossen werden (weitere Analyse s. Abbildung 8.16). S2 und S3 sind annähernd gleich. Die Abweichungen von S1 und S4 zu ihnen wurden gelb markiert. V4 zeigt eine annähernd homogene, geringe Verzerrung.

Anhand eines einzigen Shearogramms können keine Aussagen zu möglichen Fehlstellen getroffen werden. Zur Deutung müssen die Bauteilstruktur sowie das dynamische Temperatur- und Verformungsverhalten¹⁹³ näher analysiert werden. Im Nachgang zur Messung wird in Absprache mit der Fertigung aufgeklärt, dass die Griffe im oberen linken Bereich dünnwandig sind und schneller abkühlen. Mittig

¹⁹² Die hier gemessene oop Verzerrung $\partial w / \partial x$ ist nur ein kleiner Anteil der sich einstellenden Gesamtverformung des Bauteils, s. Kapitel 2.4.a und 2.4.b.

¹⁹³ Teilweise nur mithilfe von Simulation analysierbar, s. Kapitel 6.

vertikal verlaufend existiert rückseitig die Anbindung zum Steg, worüber die Wärme abfließen kann (vgl. Abbildung 8.14). Die Abweichung in S1 oben entsteht durch die Fertigungstoleranzen und ist somit unproblematisch. Die größtenteils homogene Verzerrung in S4 bzw. V4 ist einem großflächigen Gaseinschluss geschuldet, welcher den Wärmeabfluss verhindert.

Auf Basis dieser Informationen ist die Datenevaluation möglich. Die automatische Bewertung anhand der entwickelten Algorithmen ist jedoch problematisch, da die Verzerrung bzw. die darin enthaltenen Anomalien untypisch sind. Anstatt weitere, spezielle Algorithmen zu entwickeln, kann eines der drei¹⁹⁴ Shearogramme S1, S2 oder S3 als „Gutteil-Shearogramm“ verwendet werden. Wird dieses von jedem weiteren Shearogramm einer Prüfreihe subtrahiert, resultiert ein „Differenz-Shearogramm“, welches ausschließlich die Verzerrungsabweichungen zum Gutteil enthält. Hierin erfüllt der shearografische Fehlstellenindikator wieder seinen eigentlichen Zweck. Er zeigt Anomalien an, welche Rückschlüsse auf Fehlstellen zulassen.

Abbildung 8.16 verbildlicht diese Methodik. Auf der Hauptdiagonalen sind die ursprünglichen Shearogramme der vier Türgriffe aus Abbildung 8.15 aufgetragen. Die Nebendiagonalelemente sind Differenz-Shearogramme. Sie bilden sich aus der Differenz der beiden ursprünglichen Shearogramme, welche in derselben Zeile und Spalte liegen. Aufgrund der Ähnlichkeit von S1, S2 und S3 zeigen die entsprechenden Differenz-Shearogramme keinen höherwertigen Phasensprung. Die zwei halbkreisförmigen, vertikal verlaufenden Streifen im oberen linken Bereich werden in allen Differenz-Shearogrammen eliminiert, sodass die Evaluation nicht gestört ist. Alle Differenz-Shearogramme mit S4 zeigen nun annähernd typische Indikatoren für die fehlstellenbehafteten Bereiche in S4 (rot markiert). Eine analoge Betrachtung ergibt sich aus den Verzerrungsbildern bei der Berechnung von Differenz-Verzerrungsbildern nach Abbildung 8.17.

Der Einsatz der vorgestellten Methodik ist allgemeingültig und bietet sich vor allem für größere Prüfreiheiten mit gleichen, einfach-geometrischen Bauteilen sowie für kleinere Prüfreiheiten mit geometrisch komplexen Bauteilen an. Sofern ein oder mehrere Bauteile eindeutig als Gutteil deklariert werden können, entfällt die teilweise komplizierte Deutung eines einzelnen Shearogramms. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass Fehlstellen im Differenz-Shearogramm geometriebedingt anders in Erscheinung treten können, als im Shearogramm bei einfach-geometrischen Bauteilen. Die Besonderheiten werden typischerweise bei der Definition der Prüfgrenzen erarbeitet¹⁹⁵, wie zu Beginn von Kapitel 8 beschrieben. Darüber hinaus dürfen die Fertigungstoleranzen nicht zur Sensitivitätsübersteigerung bei der empfindlichen Messung führen. Eine weiterführende Betrachtung zur Berücksichtigung der Bauteilgeometrie bei der shearografischen Evaluation findet sich am Ende des Ausblicks.

¹⁹⁴ Eine Mittelwertbildung aus allen dreien ist ebenso denkbar.

¹⁹⁵ Erstellung der Prüfanweisungen und Verfahrensbeschreibungen durch Personal der Stufe 2.

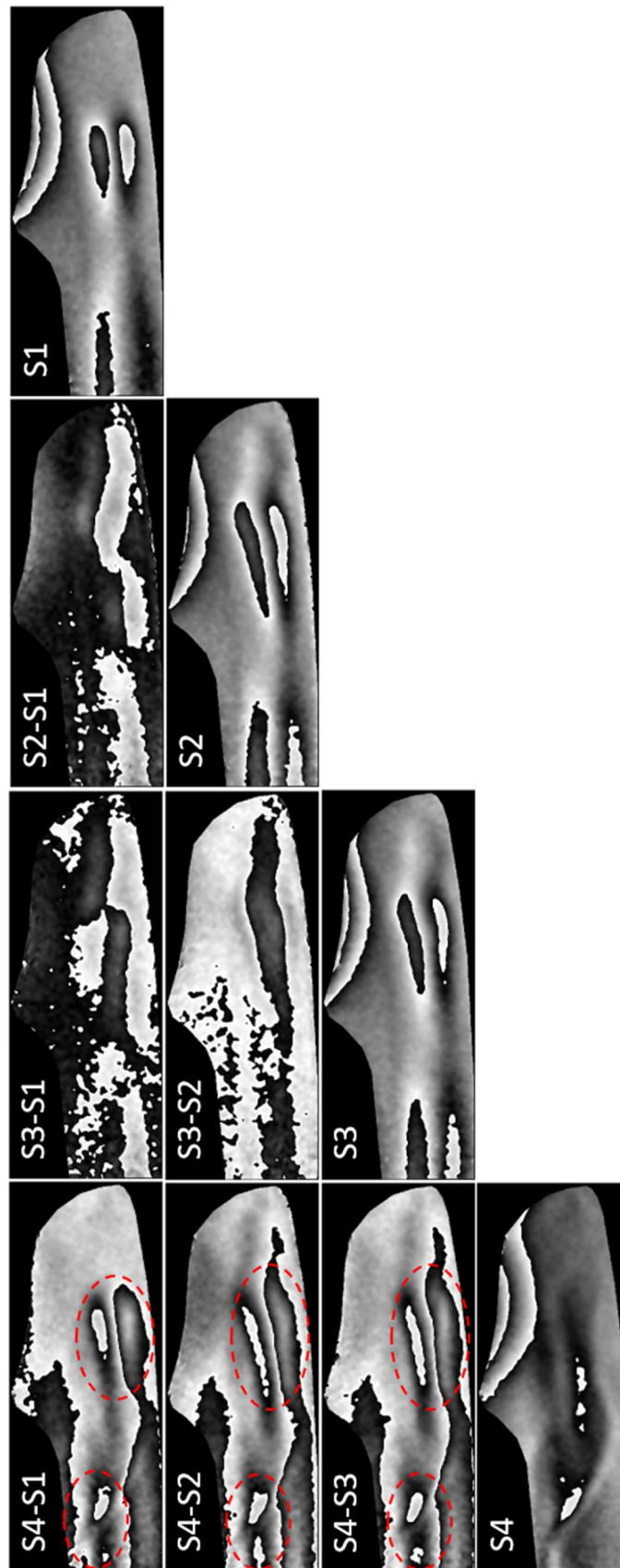


Abbildung 8.16. Ursprüngliche Shearogramme S1 bis S4 aus Abbildung 8.15 (Hauptdiagonalelemente) und die jeweils aus zweien gebildeten Differenz-Shearogramme (Nebendiagonalelemente); S1, S2 und S3 sind sich sehr ähnlich, da die entsprechenden Differenzen keine höherwertigen Phasensprünge zeigen. S1, S2 und S3 können als „Gutteil-Shearogramme“ betrachtet werden. Werden die Differenzen mit S4 gebildet, ergeben sich Differenz-Shearogramme mit typischen Indikatoren (rot markiert) für fehlerstellenbehaftete Bereiche. Auf diese Weise ist, im Gegensatz zum ursprünglichen Shearogramm S4, eine einfache automatische Evaluation möglich.

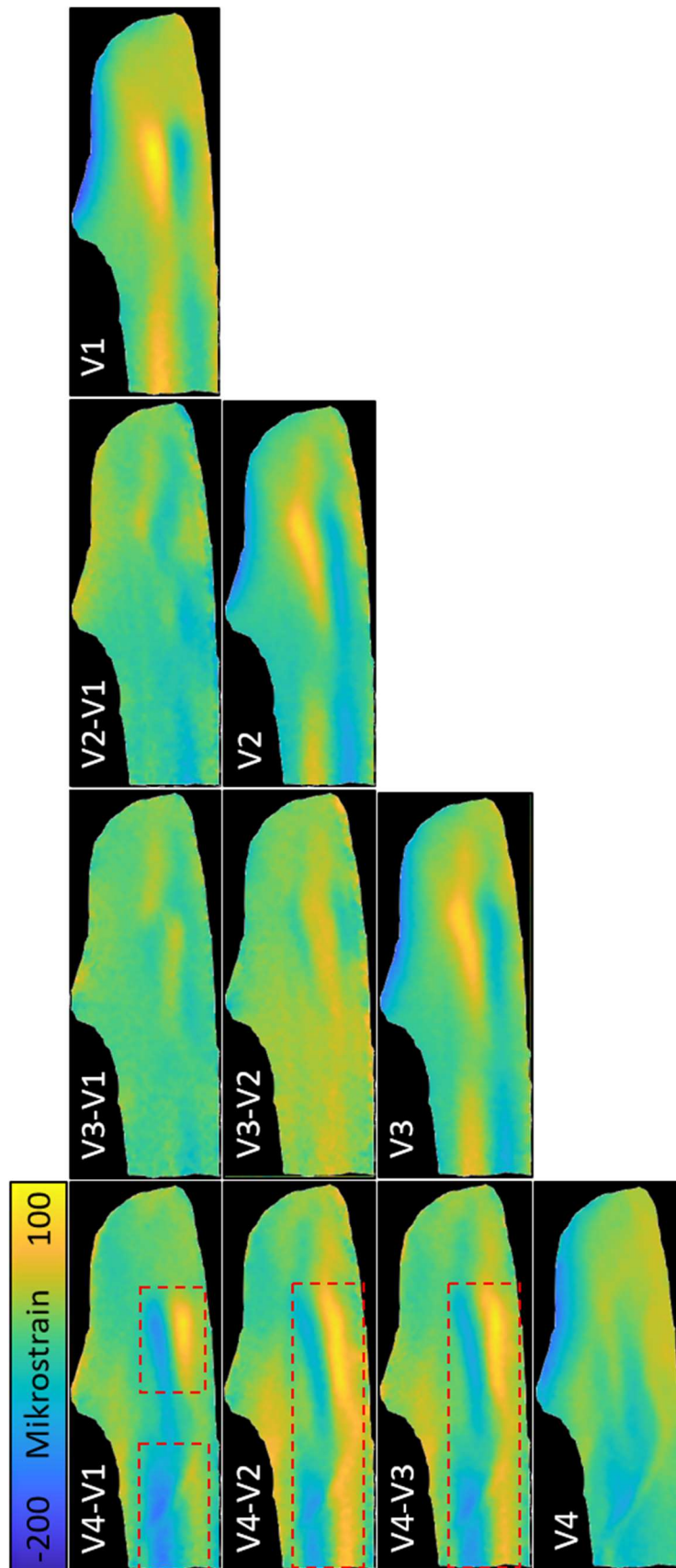


Abbildung 8.17: Ursprüngliche Verzerrungsbilder V1 bis V4 aus Abbildung 8.15 (Hauptdiagonalelemente) und die jeweils aus zweien gebildeten Differenz-Verzerrungsbilder (Nebendiagonalelemente); V1, V2 und V3 sind sich sehr ähnlich, da die Verzerrungsabweichungen der entsprechenden Differenzen klein sind. V1, V2 und V3 können als „Gutteil-Verzerrung“ betrachtet werden. Werden die Differenzen mit V4 gebildet, ergeben sich Differenz-Verzerrungsbilder mit höhere Verzerrungsabweichungen (rot markiert) für fehlerstellenbehaftete Bereiche. Auf diese Weise ist, im Gegensatz zum ursprünglichen Verzerrungsbild V4, eine einfache automatische Evaluation möglich.

Fazit

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit beschreibt Weiterentwicklungen der räumlichen Phasenschiebe-Shearografie mit dem Schwerpunkt auf dem optischen Aufbau. Das Ziel ist die Optimierung des Verfahrens für den Einsatz zur zerstörungsfreien Prüfung in der Automobilindustrie.

In Kapitel 1, Einleitung, wird die Bedeutung des Leichtbaus im Rahmen der modernen Mobilität aufgezeigt. Die Anforderungen der automatisierten Massenproduktion an eine Serienüberwachung werden erörtert. Anschließend werden die geläufigsten zerstörungsfreien Prüfverfahren beschrieben und das Potential der Shearografie für den Bereich Automobilbau herausgearbeitet. Das Ziel dieser Arbeit wird aus den Defiziten der Shearografie-Messsysteme nach dem aktuellen Stand der Technik abgeleitet. Dabei rückt vor allem die Steigerung der Verfahrensrobustheit in den Fokus.

In Kapitel 2, Grundlagen, werden zunächst allgemeine Begriffe der eingesetzten optischen Speckle-Interferometrie geklärt. Die Besonderheit der verwendeten Laserbeleuchtung bzgl. der Kohärenz, der Interferenz und der Speckleerscheinung sowie Elementares zur Kameratechnik wird aufgeführt. Folglich werden der holografische und der shearografische Interferometer-Aufbau nach dem aktuellen Stand der Technik beschrieben und ein exemplarischer Vergleich bei deren Einsatz für die zerstörungsfreie Prüfung angestellt. Das Phasenschieben, die Differenzphasenbildung, die Filterung und die Demodulation werden (u. a.) im Rahmen der typischen Signalverarbeitung erläutert. Abschließend zum Kapitel 2 folgen Betrachtungen zu den Messparametern bzgl. der Auflösung, des Messbereichs und der Abweichungen sowie zu Störeinflüssen. Letztere ergeben sich bei der industriellen Verwendung der Shearografie vor allem durch die Messumgebung. Die Kernproblematiken hierbei sind Vibrationen, Fremdlicht und Temperaturunterschiede, wodurch die Messergebnisse dekorelieren und fehlerhaft werden. Als umfassende Abhilfemaßnahme wird die Steigerung der Messgeschwindigkeit festgestellt. Dies ist mittels räumlichem Phasenschieben erreichbar.

In Kapitel 3, Stand der Forschung, wird zunächst der theoretisch erreichbare Vorteil des räumlichen gegenüber dem zeitlichen Phasenschieben erläutert. Das Potential der Trägerfrequenzmethode mit Auswertung auf Basis der Fourier-Transformation wird als zielführende räumliche Phasenschiebe-Methode diskutiert. Die Grundlagen der Transformation werden über die eindimensional-zeitliche und eindimensional-örtliche Funktion zur zweidimensional-örtlichen Funktion mit Anwendung am Bild veranschaulicht. Darüber hinaus werden die Grundlagen der Trägerfrequenzmethode aufgezeigt, insbesondere für den Fall der kohärenten Intensitätsmodulation. Anschließend werden die Aufbauten für einfache out-of-plane, in-plane und auch dual-shear Messungen nach dem aktuellen Stand der Forschung beschrieben. Ihre Vor- und Nachteile werden erörtert, um als Basis für die Weiterentwicklungen zu dienen. Es kann festgestellt werden, dass die reduzierte Messlichteffektivität aufgrund der verwendeten Einfachblenden sowie die Kopplung zwischen der Trägerfrequenz und dem Shear besonders problematisch sind.

In Kapitel 4, Weiterentwicklungen, wird der neue, patentierte Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau vorgestellt und erläutert, wie die Trägerfrequenz mithilfe des sog. virtuellen Doppelspalts unter optimalen Bedingungen erzeugt wird. Die Trägerfrequenz wird dabei entkoppelt vom Shear eingestellt, zudem werden viele weitere Nachteile des Aufbaus nach dem Stand der Forschung umgangen. Anschließend wird die Auslegung der neu entwickelten Gitterblende und die Vorteile bei deren Anwendung beschrieben. Die Lichtverhältnisse beim räumlichen Phasenschieben mit Trägerfrequenz und Fourier Transformation werden so um ein Vielfaches gesteigert. Der Kernvorteil des räumlichen Phasenschiebens gegenüber dem zeitlichen Phasenschieben, die schnelle und robuste Berechnung der Interferenzphase durch nur eine Bildaufnahme, wird dadurch erstmals praktisch zugänglich. Folglich werden weitere neue Aufbauten für zusätzliche shearografische Auswertungen im Kamervideotakt präsentiert. Mit dem sog. 3D Aufbau kann unter Verwendung einer 3-Laserwellenlängen-Beleuchtung

und einer Farbkamera der Neigungs-, Gleitungs- und Dehnungsanteil einer Oberfläche in einer Shear-richtung simultan erfasst werden. Mit dem sog. Dual-shear Aufbau ist es unter Verwendung von polarisierenden Halbspiegeln und einer Polarisationskamera möglich, die Neigungsanteile einer Oberfläche in zwei Shearrichtungen simultan zu erfassen. Der sog. One-shot Aufbau kombiniert den 3D Aufbau und den Dual-shear Aufbau, wodurch alle sechs shearografischen Messgrößen erstmals simultan und mit variablem Shear erfassbar sind. Hierbei wird lediglich ein einfaches Messergebnis vorgestellt, da zur Optimierung weitere Forschungsarbeit notwendig ist.

In Kapitel 5, Messgeräte, wird das entwickelte Mach-Zehnder Messgerät beschrieben, welches je nach Ausstattung wahlweise einen der neuen optischen Aufbauten enthält. Das optional verwendbare sog. 4f Modul zur Erfassung großer Messflächen sowie das RGB Beleuchtungsmodul zur flexiblen Beleuchtungseinstellung werden ebenfalls präsentiert. Die technischen Daten des Messgeräts werden tabellarisch zusammengefasst. Neben dem neuen Mach-Zehnder Messgerät werden das sog. Interferoskop (shearografische Endoskopie) und das Mikroferoskop (mikroskopische Holografie) beschrieben. Diese sind Eigenentwicklungen des Technikums OGKB der Hochschule Trier, welche im Rahmen dieser Arbeit für räumliches Phasenschieben weiterentwickelt werden. Der Stand der Technik, der Stand der Forschung sowie Details zur Weiterentwicklung und die technischen Daten werden jeweils vorgestellt. Anschließend folgt die Beschreibung der neuen Anregungs- und Beleuchtungssteuerung, welche mittels Steuerprogramm und Steuergerät digitale quantifizierbare und reproduzierbare Messvorgänge ermöglicht. Das Programm arbeitet übergeordnet zur weiterentwickelten Software OPTIS 4, mit der nun eine Datenerfassung und -auswertung für räumliches Phasenschieben möglich ist.

In Kapitel 6, Fehlstellen- und Anregungsmechanik, wird zu Beginn eine vor allem qualitative Betrachtung zur Fehlstellenmechanik geführt. Unterschieden wird nach statischer und nach dynamischer Belastung eines Messobjektes, wobei mechanisch oder thermisch belastet werden kann. Auf diese Weise kann ein hoher Fehlstellenkontrast gezielt für bestimmte Fehlstellenarten hervorgerufen werden. Die Grenzen der shearografischen Detektion werden darauffolgend vereinfacht abgeleitet. Unter anderem wird der kleinste erfassbare Fehlstellendurchmesser und die höchste erfassbare Fehlstellentiefe quantifiziert. Anschließend werden die zur Messobjektbelastung eingesetzten Anregungsarten und die speziellen Anregungseinheiten vorgestellt und hinsichtlich einer automatisierten Prüfung bewertet. Die in Kombination mit räumlichem Phasenschieben besonderen Anregungseinheiten sowie neu entwickelte Einheiten werden näher betrachtet. Schließlich werden die wichtigsten Anregungsverfahren (Burst, Dual-Burst und periodische Anregung) mit ihren Vor- und Nachteilen und deren verbesserte Handhabung beim räumlichen Phasenschieben beschrieben. Die Umsetzbarkeit der Verfahren mit den unterschiedlichen Anregungseinheiten wird tabellarisch gegenübergestellt.

In Kapitel 7, Messungen und Auswertung, wird die Einsatztauglichkeit der neuen Messtechnik unter Beweis gestellt. Zunächst werden zusammengefasste Ergebnisse aufgelistet und mit thermografischen Ergebnissen verglichen. Die Shearografie reagiert oftmals schneller und empfindlicher auf die Messobjektanregung als die Thermografie und bietet zudem den Vorteil der mechanischen Belastung, s. auch Abbildung 18.

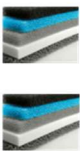
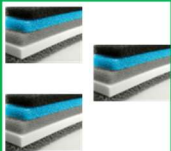
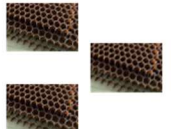
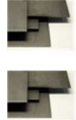
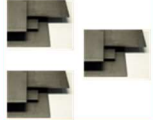
Mechanisch	Thermisch		Shearografie	Thermografie
				
		Schaum		
		Gummi		
		Waben		
		Kork		
		Holz		
		NFK		
				
		GFK		
		CFK		
		Alu		
		Titan, Stahl		
		Keramik		

Abbildung 18: Schematische Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse aus Kapitel 7: Die Shearografie ist für diverse Prüfungen an Schaum-, Gummi- und GFK-Bauteilen geeignet, während die Thermografie unter gleichen Prüfbedingungen nicht geeignet ist. Die Thermografie ist für diverse Prüfungen an metallischen Bauteilen besser geeignet. Die Besonderheit der Shearografie ist die mechanische Anregung, mit der Gummi- und Aluminiumbauteile sehr gut geprüft werden können.

Ergebnisse aus der Literatur werden mit der neuen shearografischen Messtechnik belegt und teilweise erweitert. Daraufhin werden zwei Messungen hinsichtlich einer Serienüberwachung beschrieben, wobei das Potential der Shearografie gegenüber anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren unterstrichen wird. Des Weiteren folgen Messungen, die ausschließlich mit der neuen Messtechnik durchführbar sind. Mit dem Mach-Zehnder Messgerät wird eine akustisch angeregte, schwingende Platte quantitativ auf einen Riss geprüft. Zudem wird ein großes Wabenpanel unter berührender Anregung vollflächig mittels 4f Modul vermessen. Anschließend werden jeweils zwei Messungen mit 3D Aufbau und mit Dual-shear Aufbau präsentiert, welche die gesteigerten Auswertemöglichkeiten bei Rissen darlegen. Im Anschluss wird erstmals eine Innen-Messung mit dem weiterentwickelten Interferoskop gezeigt, bei der die Messobjektbelastung mit der neuen Anregungseinheit ebenfalls endoskopisch erfolgt. Schließlich werden zwei Messungen mit dem weiterentwickelten Mikroferoskop beschrieben, u. a. bei thermischer Belastung eines metallischen Objektes mit hoher Wärmeleitung. Die hervorgerufene, schnelle Verformung wird mittels räumlichem Phasenschieben quantitativ erfasst.

In Kapitel 8, Automatisierung, werden zunächst die Anforderungen an das Personal bei der nicht-automatisch erfolgenden shearografischen Datenerfassung und -evaluation aufgeführt. Daraufhin wird die entwickelte Automatisierungssoftware vorgestellt. Sie ermöglicht eine optische Serienüberwachung mit intuitiver, flexibler Programmeinrichtung. Zur shearografischen Datenevaluation werden vier neue Algorithmen implementiert, deren Funktionsweise genauer beschrieben wird. Ihre Leistungsfähigkeit wird auf Basis eines shearografischen Datensatzes geprüft und zusammengefasst. Für einfache Evaluationsaufgaben liefern sie z. T. perfekte Ergebnisse, für schwierigere Aufgaben ist Schlupf bis 12,5 % möglich. Abschließend werden drei Ergebnisse aus dem Bereich der Automation vorgestellt, zwei zur robotergeführten Datenerfassung mit dem Mach-Zehnder Messgerät und dem Interferoskop, eins zur Datenevaluation an komplexen Bauteilgeometrien in einer kleinen Serie. Der Höhepunkt ist der Praxistest mit einwöchigem Einsatz der neuen Messtechnik, u. a. bei einer robotergeführten Datenerfassung. Dieser verläuft reibungslos und mit hoher Verfahrensrobustheit und bestätigt somit das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Ausblick

Die Wahrnehmung des Menschen für seine Umgebung erfolgt zu ca. 80 % alleine über das Sehen. Den Maschinen wird diese Fähigkeit durch die optische Messtechnik zugänglich. Bereits jetzt ist maschinelles Sehen eine Kernvoraussetzung zur intelligenten Aufgabenbewältigung in der modernen Produktion. Der Einzug dieser Technik in die Industrie hat gerade erst begonnen und wird auch in den nächsten Jahren die Leistungsfähigkeit und die Kosten der Geräte enorm begünstigen (s. Kapitel 1.3). Kameras und Rechner (z. B. optische Quantencomputer) werden kleiner und schneller, Laserdioden effizienter und ihre Kohärenzlängen höher (s. Kapitel 2.2 und 2.3). Diese drei Hauptkomponenten der digitalen, optischen Interferometrie treiben den erfolgsversprechenden Einsatz des räumlichen Phasenschiebens an und ermöglichen eine Ablösung des bisher notwendigen zeitlichen Phasenschiebens. Die begrenzte Robustheit der Shearografie könnte somit ein Problem der Vergangenheit werden, während die Kernvorteile der shearografischen Prüfung gegenüber den anderen ZfP-Verfahren voll zugänglich wären. Auf diese Weise kann eine sehr schnelle, einfach adaptierbare, sichere, flexible und kostengünstige automatische Serienüberprüfung moderner Leichtbaukomponenten realisiert werden (s. Kapitel 1.4 und 1.5). Darüber hinaus öffnet die Robustheitssteigerung dem Verfahren sinnbildlich die Labortüren. Gemeinsam mit der Kostensenkung durch den einfacheren optischen Aufbau beim räumlichen Phasenschieben, die Gewährleistung geringer Lasersicherheitsanforderungen sowie mit automatischen Evaluationsalgorithmen wird die Messtechnik „für jedermann“ verwendbar. Dies bietet ein hohes Potential für neue, bisher nicht adressierte Einsatzgebiete. Beispielhaft genannt seien die shearografische Inspektion eines Windkrafttrads mittels Drohne oder eine Bauwerkstruktur-Überwachung (SHM¹⁹⁶) mittels integriertem, automatischem Messgerät.

Konkreter Forschungsbedarf zur Shearografie (mit räumlichem Phasenschieben)

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergibt sich konkret folgender, teilweise angewandter Forschungsbedarf, welcher stichpunktartig aufgelistet und kapitelweise zugeordnet wird. Eine Priorisierung erfolgt durch die Auflistungszeichen „!“ (wichtig), „+“ (empfohlen) und „•“ (neutral).

Kapitel 3:

- + Untersuchung der Möglichkeiten mit SPS durch die Verwendung eines Flüssigkeitskristall-Chips als räumlicher Lichtmodulator (SLM¹⁹⁷).
- Ergründung der Möglichkeiten mit SPS durch die Verwendung von holografisch hergestellten Diffraktiven Optischen Elementen (DOE).

Kapitel 4:

- + Weiterentwicklung der 3D, Dual-shear und One-shot Methode.
- Prüfung von Datenfusionsmöglichkeiten bei der 3D, Dual-shear und One-shot Methode.

Kapitel 5:

- + Verbesserung der Handhabung des MZ Messgeräts (vor allem: Dual-shear Aufbau) und Minimierung der geometrischen Abmaße des optischen Aufbaus.
- Optimierung der Handhabung des IFK 5 und Vereinfachung des Endoskop-Wechsels.
- Weiterentwicklung des MFK 2 oop Moduls hinsichtlich der SPS Parameter-Einstellbarkeit und der Kompaktheit.
- + Inbetriebnahme des 3D Moduls am MFK 2.

¹⁹⁶ Structural Health Monitoring.

¹⁹⁷ Spatial Light Modulator (dt.: räumlicher Lichtmodulator).

Kapitel 6:

- ! Entwicklung von Simulationswerkzeugen zur Fehlstellenmechanik bis hin zur Simulation von Shearogrammen und Thermogrammen; Integration der Simulation zur shearografischen Dekorrelation (s. auch [52]).
- + Detektionsgrenzen von Fehlstellendimensionen, vor allem von Rissen, näher quantifizieren und validieren.
- ! Gezielte Simulation zum Fehlstellenkontrast der unterschiedlichen Rissmoden durchführen; daraus effiziente Anregungsmethoden für die Praxis ableiten (s. auch Veröffentlichung des Autors et al. [152]).
- ! Systematische Analyse zur Praxistauglichkeit einer reinen oop, einer quasi-ip und einer reinen ip Prüfung von Rissen durchführen.
 - Untersuchungen zur Kopplung unterschiedlicher Anregungsarten und -einheiten durchführen.
- + Erstmalige Durchführung von ip (Riss-)Prüfungen bei transients Laserpumpenanregung.
- Weitere Untersuchungen zur Anregung mittels mechanisch-berührender Roboteranregung im Prozess durchführen.
- Weiterentwicklung der Vakuumhaube zum Messsystem mit integriertem SPS Messgerät.
- Weitere Untersuchungen zur Druckluftanregung mittels Luftpistole o. Ä. durchführen.
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Wirbelrohrs als endoskopische Anregungseinheit, vor allem am Winkelendoskop.
- Entwicklung einer Einheit zur Innendruckanregung beim COPV während der IFK Innenprüfung.
- Entwicklung einer kompakten, einsatzgerechten Anregungseinheit für die holografische Prüfung mittels MFK.
- + Weitere Untersuchungen zu zeitlich aufgelösten Schwingungsformen durchführen, auch für Oberflächenwellen und für erstmals mögliche ip Prüfungen.
- + Erstmalige Untersuchungen zur SPS Lock-in Shearografie durchführen, vor allem zur SNR Steigerung bei schneller mechanischer Anregung.
- + Erstmalige Prüfung mit zeitlich aufgelösten Schwingungsformen inkl. einer Lock-in Auswertung durchführen.

Kapitel 7:

- + Weiterführende Untersuchungen zu Klebungen, vor allem Kissing bonds, durchführen.
- Ausarbeitung von Vergleichstabellen unterschiedlicher ZfP-Verfahren für die Anforderungen der Automobilindustrie für unterschiedliche Prüfobjekte.
- + Untersuchungen mit automatisiertem 4f Modul am robotergeführten MZ Messgerät zur Kopplung einer großflächigen und einer rasternden Datenerfassung bei großen Prüfobjekten.
- + Weitere Untersuchungen zur 3D und Dual-shear Methode und der dabei erfassten Rissanzeige sowie deren Evaluation durchführen.
- ! Praktischer Einsatz des handgeführten IFK mit Algorithmus zur Dekorrelationserkennung.
- ! Erstmaliger Einsatz des IFK 5 in der Medizin, z. B. bei der in-situ Entfernung von verhärtetem Tumorgewebe im Operationsraum.
- + Durchführung weiterer Untersuchungen mit dem MFK 2 und Ergründung neuer Einsatzgebiete.

Kapitel 8:

- Weiterentwicklung der Automationssoftware bzgl. der Prüfstandsperipherie.
- ! Datenerfassung und -evaluation in einem automatischen Dauerversuch für Prüfbauteile mit bekannten Fehlstellen einrichten und Langzeitverhalten untersuchen.
- Einheitlichen Ergebnisdatenpool generieren, um die Leistungsfähigkeit von Evaluationsalgorithmen weltweit einheitlich vergleichbar zu machen.
- + Algorithmen der Evaluations- und Dekorrelationserkennung weiterentwickeln, beschleunigen und miteinander verknüpfen; Evaluationsergebnis-Selbstprüfung auf Basis des SNR-Wertes einarbeiten.
- ! Entwicklung von Algorithmen auf Basis von künstlicher Intelligenz.
- Evaluation von Zeitmittelungsshearogrammen untersuchen.
- Kopplung einer COPV Außenprüfung mittels MZ Messgerät und einer gleichzeitigen Innenprüfung mittels IFK.
- Automationsversuche mittels MFK 2 durchführen.
- Untersuchungen zur Automatisierung mechanischer Anregungseinheiten durchführen (vor allem bei berührender Anregung).
- Automatisierte Prüfungen unter schlechten Umgebungsbedingungen experimentell simulieren.
- + Methode mit Gutteil-Shearogramm bei der Serienprüfung weiter untersuchen.
- Flexibilität und Reproduzierbarkeit im Feld verbessern durch zusätzliche, optische 3D Prüf-Positionserfassung.
- Evaluationsgrundlage verbessern durch eine zusätzliche, optische Formerfassung der shearografischen Prüffläche.

Ausblick zur Verfahrenskopplung in der optischen Messtechnik

Abschließend zum letzten Unterpunkt sei ein Beispiel aufgeführt, welches das gesteigerte Potential von SPS über die Shearografie hinaus darstellt. Es bezieht sich auf die Verfahrenskopplung optischer Messmethoden. Wie bereits durch das IFK zur endoskopischen Shearografie und durch das MFK zur mikroskopischen Holografie verdeutlicht, werden mittels Verfahrenskopplung neue Einsatzbereiche erschlossen. Es existiert eine Fülle an Forschungsarbeiten zu diesem Thema, hier beispielhaft aufgeführt sei die gleichzeitige ESPI und ESPSI Messung mit einer Kamera ([79] S. 165 f.), die gleichzeitige ip DIC und oop ESPI Messung mit einer Kamera [25] und die IR ESPSI Messung mittels Thermografiekamera [98].

Im Rahmen der SPS Weiterentwicklungen in dieser wissenschaftlichen Arbeit werden ebenfalls Untersuchungen zur Verfahrenskopplung angestellt. Durch gezielte Auslegung der Raumfrequenzen wird beispielsweise eine einfache Streifenlichtprojektionsmessung realisiert. Auf diese Weise ist eine 3D Formerfassung in nur einer Bildaufnahme durchführbar. Sie erfolgt mit derselben Kamera parallel zur fremdlichtunempfindlichen, shearografischen SPS Messung. Ein Bild enthält somit gleichzeitig die 3D Forminformation als auch die Interferenzphaseninformation des Messobjektes, wie Abbildung A. 1 zeigt. Die Methode erlaubt gekoppelte Darstellungsweisen, s. Abbildung A. 2, und liefert wertvolle Zusatzinformationen bei der Evaluation, s. auch Kapitel 8.2.c. Sie kann ohne Weiteres um eine Faseranalyse ergänzt werden, wie in Kapitel 3.2.d beschrieben. Weiterführend zur Verfahrenskopplung sowie zur entsprechenden Datenfusion sei auf die zukünftige Forschung des Technikums OGKB der Hochschule Trier verwiesen.

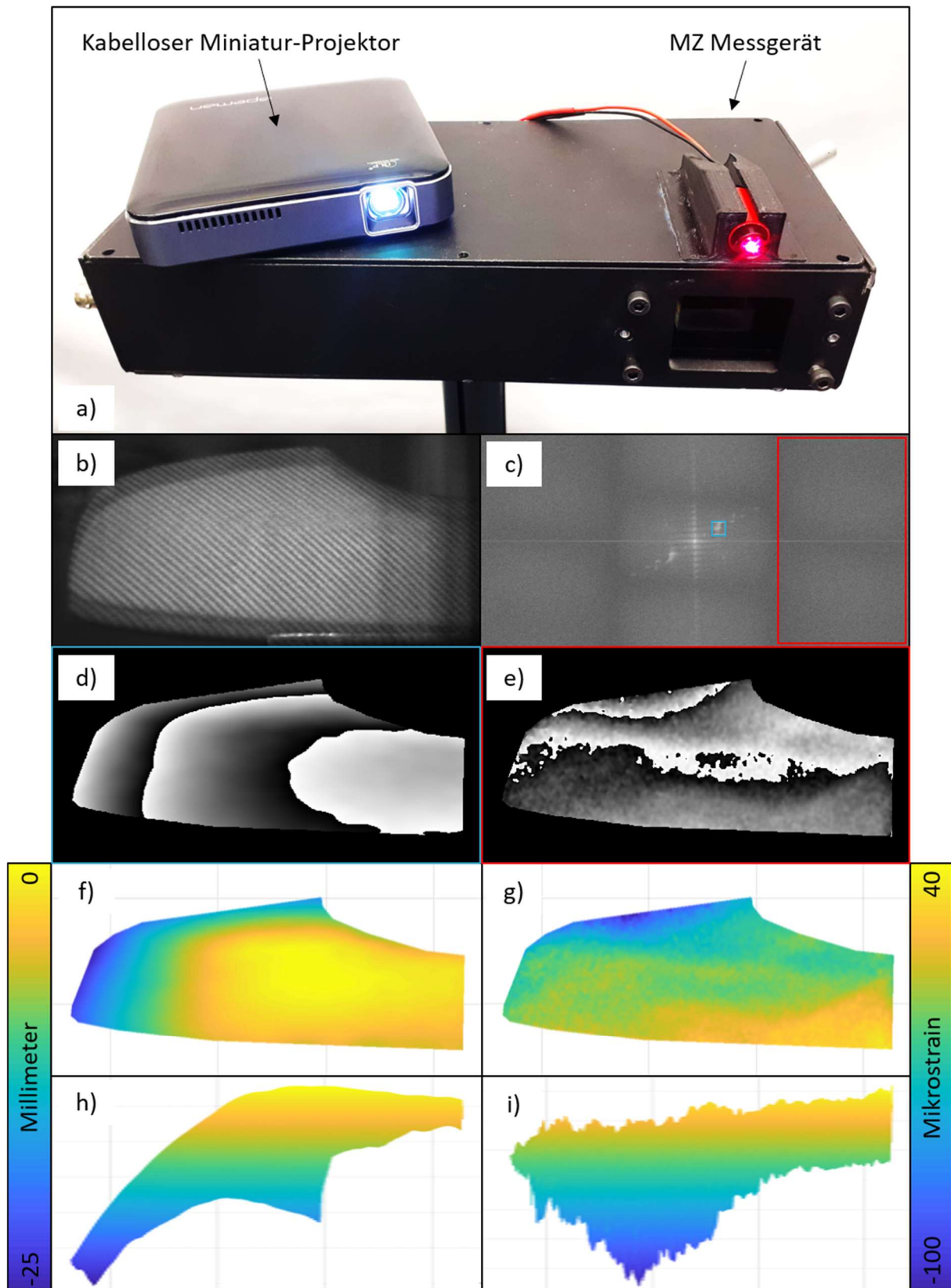


Abbildung A. 1: a) MZ Messgerät mit zusätzlich eingesetztem, kabellosem Miniatur-Projektor (ca. 100 mm x 100 mm x 20 mm; 200 Gramm; 0,4 Megapixel) zur Kopplung von SPS Shearografie und Streifenlichtprojektion; b) Specklebildaufnahme des vershearnten Bauteils mit zusätzlich aufgebrachtem Streifenmuster, c) FFT Amplitudenbild mit Speckle-Trägerfrequenz (rot) und Streifenmuster-Raumfrequenz (blau); d) Phasenbild des verzerrten Streifenmusters, e) Shearogramm nach Anregung (s. Kapitel 8.2.c); f) und h) demoduliertes Formergebnis der Oberfläche auf der xy- und xz-Ebene, g) und i) demoduliertes Verformungsergebnis der Oberfläche auf der xy- und xz-Ebene.

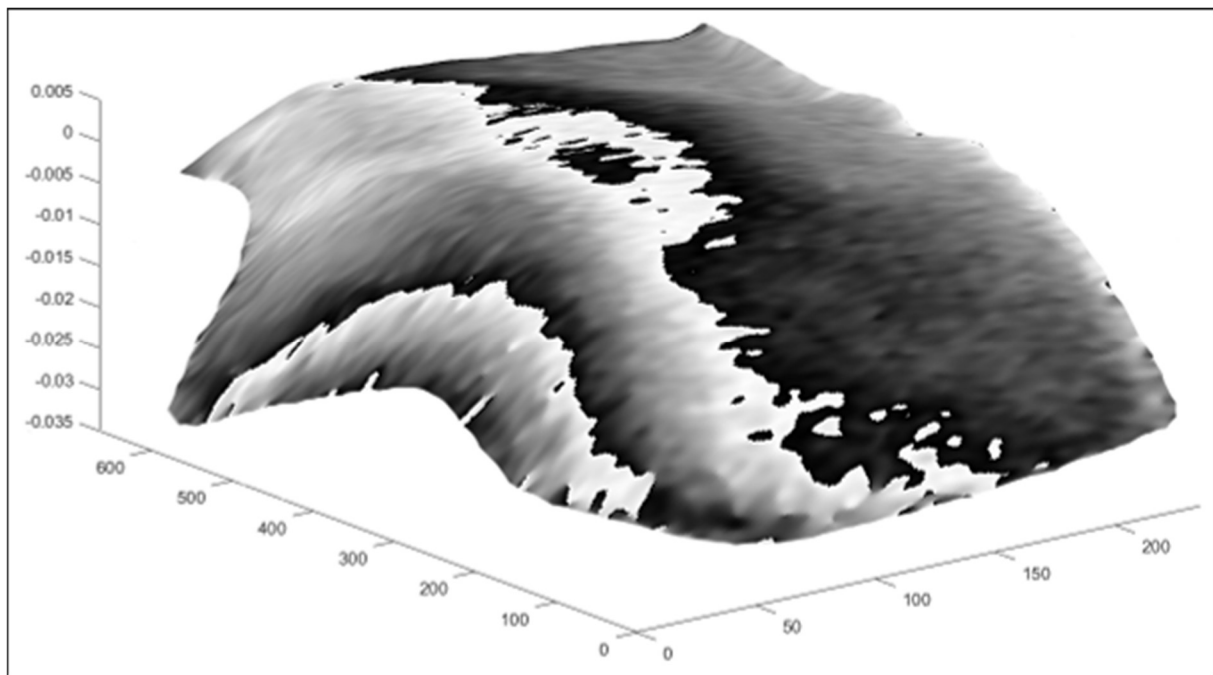


Abbildung A. 2: Die Verfahrenskopplung nach Abbildung A. 1 ermöglicht eine kombinierte Darstellungsweise beider Ergebnisse. Hier wird das Shearogramm, Abbildung A. 1 e), auf die erfasste Form des Bauteils, Abbildung A. 1 f) bzw. h), aufgespannt, wodurch Zusatzinformationen bei der Evaluation zur Verfügung stehen (s. auch Kapitel 8.2.c).

Literaturverzeichnis

- [1] S. Mehlhase, „Leichtbau für Luftfahrt und Verkehr: CFK-Bauteile nachhaltig reparieren oder recyceln,“ Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam-Golm, https://www.iap.fraunhofer.de/de/Pressemitteilungen/2016/Leichtbau_fuer_Luftfahrt_und_Verkehr.html, 2016.
- [2] T. Isenburg, „Leichtbau mit Naturfasern,“ Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, <https://www.automobil-industrie.vogel.de/leichtbau-mit-naturfasern-a-527399/>, 2016.
- [3] M. Kords, „Weltweiter Kfz-Bestand bis 2015,“ Statista GmbH, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/244999/umfrage/weltweiter-pkw-und-nutzfahrzeugbestand/#:~:text=Globaler%20Kfz%2DBestand%20h%C3%B6her%20als,global%20registrierten%20Kraftfahrzeuge%20kontinuierlich%20an.,> 2020.
- [4] M. Kords, „Neuzulassungen von Pkw weltweit bis 2020,“ Statista GmbH, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/247129/umfrage/weltweite-neuzulassungen-von-pkw/#:~:text=Die%20Statistik%20zeigt%20die%20Anzahl,75%20Millionen%20Neuzulassungen%20von%20Pkw.,> 2020.
- [5] F. Henning und E. Moeller, Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Carl Hanser Verlag München Wien, 2011.
- [6] D. I. f. N. e.V., DIN 55350-17 - Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Qualitätsprüfungsarten, <https://dx.doi.org/10.31030/2266346>: Deutsches Institut für Normung e.V., 1988.
- [7] V. d. Automobilindustrie, „VDA-Empfehlung 4958 Teil 1,“ Verband der Automobilindustrie, <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/4958-%28teil-1%29---langzeitarchivier-%E2%80%A6.html>, 2005.
- [8] D. Beste, „Werkzeuge für die flexible Produktion der Industrie 4.0,“ Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, <https://www.springerprofessional.de/industrie-4-0/werkzeuge-fuer-die-flexible-produktion-der-industrie-4-0/10044234>, 2016.
- [9] A. Botthof und E. A. Hartmann, Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, Electronic ISBN: 978-3-662-45915-7: Springer-Verlag GmbH, 2015.
- [10] M. Schuth und W. Buerakov, Handbuch optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; ISBN: 978-3-446-43634-3, 2017.
- [11] V. - F. Photonik, „Photonik in Deutschland - Branchenreport 2017,“ VDMA - Forum Photonik, Frankfurt am Main, <http://www.vdma.org/documents/433966/4449425/VDMA-Photonik-Studie-2017/1f389e67-a0c9-47b7-b17c-bde831a8de5a>, 2017.
- [12] „Schallgeschwindigkeit,“ Wikimedia Foundation Inc., 08 11 2020. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schallgeschwindigkeit>. [Zugriff am 07 01 2021].

- [13] C. Thiemann und M. F. Zäh, „Zerstörungsfreie Prüfung durch aktive Thermografie im kontinuierlichen Bauteildurchlauf,“ DGZfP Thermografie-Kolloquium - Vortrag 12, TU München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, 2011.
- [14] D. I. f. N. e.V., DIN 54180-1:2015-01 Zerstörungsfreie Prüfung - Shearografie - Teil 1: Allgemeine Grundlagen, <https://dx.doi.org/10.31030/2270498>: e.V., Deutsches Institut für Normung, 2015.
- [15] D. I. f. N. e.V., DIN 54180-2:2016-12 Zerstörungsfreie Prüfung - Shearografie - Teil 2: Geräte, <https://dx.doi.org/10.31030/2584639>: e.V., Deutsches Institut für Normung, 2016.
- [16] A. S. f. T. a. Materials, ASTM E2581 - 14 Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites, Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Applications, DOI: 10.1520/E2581-14R19: American Society for Testing and Materials, 2019.
- [17] A. S. f. T. a. Materials, ASTM F1364 - 03(2015) Standard Practice for Use of a Calibration Device to Demonstrate the Inspection Capability of an Interferometric Laser Imaging Nondestructive Tire Inspection System, DOI: 10.1520/F1364-03R15: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [18] A. S. f. T. a. Materials, ASTM E2981 - 15e1 Standard Guide for Nondestructive Testing of the Composite Overwraps in Filament Wound Pressure Vessels Used in Aerospace Applications, DOI: 10.1520/E2981-15E01: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [19] T. Rosnitschek, J. Glamsch, B. Alber-Laukant und F. Rieg, „Das Optimum im Leichtbau finden,“ Magazin Konstruktionspraxis Sept. 2020, Vogel Communications Group, Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth, 2020.
- [20] M. F. Zäh, D. Kosteas und C. e. a. Iammel, „Zerstörungsfreie Prüfverfahren- Erzielbare Resultate und industrielle Umsetzbarkeit,“ Springer Verlag Berlin Heidelberg, Adhäsion Vol. 7, S. 18 bis S. 23, 2003.
- [21] Oster, Reinhold; Eurocopter Deutschland GmbH, „Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faserverbundbauteilen,“ 1. Fachseminar DGZfP, Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis - Vortrag 1, München, 2012.
- [22] W. Schmidt, „Erhöhung des Defektnachweises durch kombinierten Einsatz von aktiver Thermografie und digitaler Shearografie,“ Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, 2011.
- [23] P. Jacquot und J.-M. Fournier, Interferometry in Speckle Light - Theory and Application, IMAC-EPFL, GC Ecublens; 1015 Lusanne, Switzerland; The Rowland Institute for Science, 100 Edwin H. Land Boulevard, Cambridge, MA 02142, USA: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [24] P. Menner, „Zerstörungsfreie Prüfung von modernen Werkstoffen mit dynamischen Shearografie-Verfahren,“ Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart, <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/2175>, 2013.

- [25] P. L. Reu und B. D. Hansche, „Digital Image Correlation combined with Electronic Speckle Pattern Interferometry for 3D Deformation Measurement in Small Samples,“ <https://pdfs.semanticscholar.org/e162/70f7d186dbd5b4d7e85235ebd0e4f4614c4a.pdf>, Sandia National Laboratories, PO Box 5800, Albuquerque, NM 87185, 2006.
- [26] H. Yan und B. Pan, „Three-dimensional displacement measurement based on the combination of digital holography and digital image correlation,“ OPTICS LETTERS Vol. 39 No. 17, doi: 10.1364/OL.39.005166., Department of Instrument Science and Engineering, School of EIEE, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China, 2014.
- [27] N. Ida und N. Meyendorf, Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Akron, OH, USA; Center for Nondestructive Evaluation, Iowa State University Center for NDE, Ames, IA, USA: Springer Reference, 2019.
- [28] Schnars und Jueptner, Digital Holography - Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction and Related Techniques, Hagen; BIAS Bremen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [29] „Kesselformel,“ Wikimedia Foundation Inc., 03 04 2020. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kesselformel>. [Zugriff am 11 01 2021].
- [30] M. Hugenschmidt, Lasermesstechnik, Diagnostik der Kurzzeitphysik, Universität Karlsruhe, Institut Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik, Engesserstraße 5, 76131 Karlsruhe: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [31] J. Eichler und H. J. Eichler, Laser - Bauformen, Strahlführung, Anwendungen - 7. Auflage, Beuth Optoelektronik Berlin, Technische Universität Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [32] F. K. Kneubühl und M. W. Sigrist, Laser - 6. Auflage, Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2005.
- [33] E. Hecht, Optik, 4., überarbeitete Auflage, München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 2005.
- [34] W. Bludau, Halbleiter-Optoelektronik - Die physikalischen Grundlagen der LED's, Diodenlaser und pn-Photodioden, Fachhochschule Lübeck: Carl Hanser Verlag München Wien, 1995.
- [35] W. Buerakov, Interferometrische Bauteilprüfung, Schadenserkennung und Ermittlung der modalen Parameter mittels Belastung, Universität Saarbrücken: Shaker Verlag Aachen, ISBN: 3844053794, 2017.
- [36] M. Schuth, Aufbau und Anwendung der Shearografie als praxisgerechtes, optisches Prüf- und Messverfahren zur Dehnungsanalyse, Qualitätssicherung und Bauteiloptimierung, Fachbereich Maschinenbau, Universität Kassel: VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, Fortschrittsbericht Reihe 8 Nr. 539, 1996.
- [37] H. Naumann, G. Schröder und M. Löffler-Mang, Handbuch Bauelemente der Optik, 7. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, München: Hanser Verlag, 2014.

- [38] D. Meschede, Optik, Licht und Laser - 3. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [39] T. Kusserow, „Grundlagen der technischen Optik - Vorlesungsskript,“ Universität Kassel, FB 16 - Elektrotechnik / Informatik - Technische Elektronik, http://www.uni-kassel.de/fb16/te/download/tech_optik/Skript/Technische_Optik-print.pdf, 2015.
- [40] L. U. Hannover, „Wiki für das physikalische Anfängerpraktikum - Interferenz - interferenz_2.gif,“ Leibniz Universität Hannover, https://ap.iqo.uni-hannover.de/lib/exe/detail.php?id=d_optikundatomphysik%3Ainterferenz&media=d_optik:interferenz_2.gif, 2014.
- [41] L. Yang, Grundlagen und Anwendung der Phasenschiebe-Shearografie zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, Dehnungsmessung und Schwingungsanalyse, Kassel: VDI Verlag Düsseldorf, Fortschrittsberichte, Reihe 8 Nr. 682, 1998.
- [42] J. Burke, Application and Optimisation of the Spatial Phase Shifting Technique in Digital Speckle Interferometry, Fachbereich Physik, Universität Oldenburg: Shaker Verlag Aachen, 2001.
- [43] A. Purde, Speckle-Interferometrie zur Formvermessung unstetiger Oberflächen, München: Technischen Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, 2005.
- [44] D. I. f. N. e.V., Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen (IEC 60825-1:2014); Deutsche Fassung EN 60825-1:20147, DIN EN 60825-1 (VDE 0837-1): Deutsches Institut für Normung e.V., Juli 2015.
- [45] Allied Vision Technologies GmbH, „Technisches Datenblatt - AVT Manta G-507 Farbkamera mit Sony IMX264 CMOS Bildsensor,“ Allied Vision Technologies GmbH, <https://www.alliedvision.com/en/products/cameras/detail/Manta/G-507.html>, 2020.
- [46] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., „Fraunhofer IIS - Kompetenzzentrum für Polarisation,“ Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, [Online]. Available: <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/sse/imaging-and-analysis/ims/tech/kompetenzzentrum-fuer-polarisation.html>. [Zugriff am 29.09.2020].
- [47] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder und W. Wall, Technische Mechanik Band 2: Elastostatik - 9. Auflage, TU Darmstadt; Universität Duisburg-Essen; TU München: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [48] L. Yang, X. Xie, L. Zhu, S. Wu und Y. Wang, „Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement,“ Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 27, No. 1, DOI: 10.3901/CJME.2014.01.001, 2014.
- [49] Y. Y. Hung und C. E. Taylor, „Speckle-shearing interferometric camera - a tool for measurement of derivatives of surface displacements,“ Proceedings of SPIE, 41, pp. 169-175, IIT Research Institute, 10 West 35th Street, Chicago, Illinois 60616, USA, 1974.

- [50] Y. Y. Hung, „A Speckle-Shearing Interferometer: A Tool for Measuring Derivatives of Surface Displacements,“ Optics Communications Vol. 11 No. 2, IIT Research Institute, 10 West 35th Street, Chicago, Illinois 60616, USA, 1974.
- [51] J. A. Leendertz und J. N. Butters, „An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments,“ Journal of Physics E: Scientific Instruments, 6, pp. 1107-1110, DOI:10.1088/0022-3735/6/11/019, 1973.
- [52] P. Evanschitzky, Simulationsgestützte Oberflächendiagnostik mittels Speckle-Interferometrie, TU München: Corpus ID: 194495944;
<https://www.semanticscholar.org/paper/Simulationsgest%C3%BCtztte-Oberfl%C3%A4chendiagnostik-mittels-Evanschitzky/93810cad3df27ce481317fa1f5387b93f1ac9179>, 2002.
- [53] D. Gross, Bruchmechanik - 2. Auflage, TU Darmstadt,: Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 1996.
- [54] J. Dong, S. Wang, M. Lu, M. Jakobi, Z. Liu, X. Dong, F. Pöller, L. M. Bilgeri, F. S. Bloise, A. K. Yetisen und A. W. Koch, „Real-time dual-sensitive shearography for simultaneous in-plane and out-of-plane strain measurements,“ Optics Express Vol. 27 Issue 3 pp. 3276-3283, <https://doi.org/10.1364/OE.27.003276>, 2019.
- [55] TWI Ltd, „LASER SHEAROGRAPHY - OPTICAL NDT TECHNOLOGY,“ TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, Cambridge, CB21 6AL, UK, [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/laser-shearography>. [Zugriff am 17 09 2020].
- [56] R. M. Groves, D. Furfari, S. E. Barnes, S. Jamnes, S. Fu, P. Irving und R. P. Tatam, „Full-field Laser Shearography Instrumentation for the Detection and Characterization of Fatigue Cracks in Titanium 10-2-3,“ Journal of ASTM International 3(4), DOI: 10.1520/JAI12757, 2006.
- [57] Y. Y. Hung, „Shearography: A Novel and Practical Approach for Nondestructive Inspection,“ Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 8, No. 2, <https://doi.org/10.1007/BF00565631>, 1989.
- [58] C. Petry und M. Schuth, „Spatial Phase Shift Shearography for Enhanced NDT,“ in International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing, Saarbrücken – Germany; NDT.net, 2018.
- [59] R. Steinbrecher, Bildverarbeitung in der Praxis, Karlsruher Institut für Technologie: Oldenburg Verlag, Wien - München, 2005.
- [60] D. C. Ghiglia und M. D. Pritt, Two-Dimensional Phase Unwrapping - Theory, Algorithms and Software, Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico; Lockheed Martin Corporation Gaithersburg, Maryland: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [61] D. C. Romero und L. A. Ghiglia, „Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods,“ OSA Publishing, <https://www.osapublishing.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-11-1-107>, 1994.

- [62] Kasim und M. Firmansyah, „File Exchange: 2D Weighted Phase Unwrapping,“ The MathWorks, Inc., 22 11 2016. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60345-2d-weighted-phase-unwrapping>. [Zugriff am 02 02 2018].
- [63] M. A. Herraiez, D. R. Burton, M. J. Lalor und M. A. Gdeisat, „Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path,“ Applied Optics, Vol. 41, Issue 35, pp. pp. 7437-7444, 1 1 2002.
- [64] Dantec Dynamics GmbH, DIN EN 4179 Level 1 & 2 Training: Laser Shearography NDT Training, Schulungsskript: Dantec Dynamics GmbH, 2018.
- [65] Dekra e. V., EN 4179 Level 1 & 2: Laser Shearography Training, Business Center Ulm, Magirus-Deutz-Straße 12, 89077 Ulm, Deutschland: Dekra e. V., 2019.
- [66] D. I. f. N. e.V., Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, DIN 1319-1 : 1995-01: e.V., Deutsches Institut für Normung, 1995.
- [67] X. Gao, S. Wu und L. Yang, „Dynamic measurement of deformation using Fourier transform digital holographic interferometry,“ Proc. SPIE 8916, Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements, <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8916/891617/Dynamic-measurement-of-deformation-using-Fourier-transform-digital-holographic-interferometry/10.1117/12.2035889.short?SSO=1>, DOI: 10.1117/12.2035889, 2013.
- [68] P. Pfeffer, C. Düreth, G. Schober, G. Just, I. Koch, H. Jäger, T. Hochrein und M. Bastian, Automatisierte Shearografie - Zerstörungsfreie Prüfung mittels automatisierter Shearografie zur bedienerunabhängigen Fehlerdetektion in Faserverbundkunststoffstrukturen, SKZ-Kunststoff-Zentrum, Würzburg: Shaker Verlag Düren, 2020.
- [69] R. M. Groves, S. Fu, S. W. James und R. P. Tatam, „Single-axis combined shearography and digital speckle photography instrument for full surface strain characterization,“ Cranfield University, School of Engineering, Cranfield, Bedfordshire, MK43 0AL, United Kingdom.
- [70] N. Xu, X. Xie, X. Chen und L. Yang, „Shearography for specular object inspection,“ Optics and Lasers in Engineering 61 (2014) p. 14–18, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2014.04.015, Optical Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester, MI48309, USA, 2014.
- [71] T. proTRon, „proTRon EVOLUTION,“ Hochschule Trier, [Online]. Available: <https://www.hochschule-trier.de/hauptcampus/technik/projekte/protron/protron-evolution>. [Zugriff am 11 02 2021].
- [72] P. Blain, P. Piron, Y. Renotte und S. Habraken, An in-line shearography setup based on circular polarization gratings, Optics and Lasers in Engineering 51(9):1053–1059 · September: DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.03.003, 2013.

- [73] A. Fernández, A. F. Dovala, A. Dávalab, J. Blanco-García, C. Pérez-López, J. L. Fernández, „Double-pulsed carrier speckle-shearing pattern interferometry for transient deformation analysis,” *Proceedings of SPIE; The International Society for Optical Engineering* 3478; DOI: 10.1117/12.312955, Universidade de Vigo, Departamento de Física Aplicada ETSEIM Lagoas-Marcosende, 9. E-36200 Vigo (SPAIN); Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. Apartado Postal 1-948. 37150 León-Gto (MEXICO), 1998.
- [74] J. Sun, Y. Wang, X. Gao, S. Wu und L. Yang, „Dynamic measurement of first-order spatial derivatives of deformations by digital shearography,” *Instruments and Experimental Techniques* volume 60, pages 575–583, <https://doi.org/10.1134/S0020441217040145>, 2017.
- [75] C. Cai und L. He, „Improved Mach–Zehnder interferometer-based shearography,” *Optics and Lasers in Engineering* 50 (2012) 1699–1705, <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.07.014>, 2012.
- [76] B. Basanta, M. N. Krishna und M. P. Kothiyal, „Use of spatial phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital shearography (DS),” *Optical Society of America, Applied Optics Laboratory, Department of Physics, Indian Institute of Technology Madras, Chennai TN 600 036, India.; R.S. Sirohi, Barkatullah University, Bhopal, MP 422026, India*, 2006.
- [77] P. Blain, F. Michel, P. Piron, Y. Renotte und S. Habraken, „Combining shearography and interferometric fringe projection in a single device for complete control of industrial applications,” *Optical Engineering* 52(8):4102 (2013), DOI: 10.1117/1.OE.52.8.084102, 2013.
- [78] F. Sun, X. Dan, P. Yan, Q. Zhao, S. Zhong und Y. Wang, „A spatial-phase-shift-based defect detection shearographysystem with independent adjustment of shear amount and spatial carrier frequency,” *Optics & Laser Technology*, Volume 124, April 2020, 105956, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105956>, 2020.
- [79] L. Yang, X. Xie, *Digital Shearography - New Developements and Applications*, Optical Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester, MI 48309, USA: SPIE PRESS, Bellingham, Washington USA, 2016.
- [80] Sackewitz, Michael; *Fraunhofer Vision, Leitfaden zur industriellen Bildverarbeitung - Leitfaden 20*, ISBN: 978-3-8396-1649-9: Büro des Geschäftsbereichs Vision bei Fraunhofer, 2020.
- [81] A. G. Anisimov und R. M. Groves, „EXTREME shearography: highspped shearography instrument for in-plane surface strain measurements during an impact event,” *Proc. SPIE 11056, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*, 110560J (21 June 2019), doi: 10.1117/12.2525801, 2019.
- [82] M. Takeda, H. Ina und S. Kobayashi, „Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” *Journal of the Optical Society of America* Vol. 72, Issue 1, pp. 156-160 (1982), <https://doi.org/10.1364/JOSA.72.000156>, 1982.
- [83] D. I. f. N. e.V., DIN EN 4179:2017-03 - Luft- und Raumfahrt - Qualifizierung und Zulassung des Personals für zerstörungsfreie Prüfungen; Deutsche und Englische Fassung EN 4179:2017, <https://dx.doi.org/10.31030/2607894>: e.V., Deutsches Institut für Normung, 2017.

- [84] F. Santos, M. Vaz und J. Monteiro, „A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures,“ *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 42, Issue 2, August 2004, Pages 131-140, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2003.07.002>, 2003.
- [85] X. Xie, L. Yang, N. Xu und X. Chen, „Michelson interferometer based spatial phase shift shearography,“ 2013 Optical Society of America, (120.4290) *Nondestructive testing*; (120.3940) *Metrology*, <http://dx.doi.org/10.1364/AO.52.004063>, 2013.
- [86] L. Yang, X. Xie, N. Xu und X. Chen, „Spatial phase-shift shearography system for non-destructive testing and strain measurement“. United States Patent US 2016/0265900 A1, 15 09 2016.
- [87] The MathWorks, Inc., https://de.mathworks.com/content/dam/mathworks/ebook/gated/80879v00_Deep_Learning_ebook.pdf: The MathWorks, Inc., 2018.
- [88] M. H. Schulze, H. Heuer und F. I. IZFP, „Textural analyses of carbon fiber materials by 2D-FFT of complex images obtained by high frequency eddy current imaging (HF-ECI),“ *Proceedings Volume 8347, Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2012; 83470S (2012)*, DOI: 10.1117/12.914832, 2012.
- [89] J. Grehn, *Metzler Physik - 2. Auflage*, Hannover: Schroedel Schulbuchverlag, 1998.
- [90] X. Xie, X. Chen, J. Li, Y. Wang und L. Yang, „Measurement of in-plane strain with dual beam spatial phase-shift digital shearography,“ *IOP Publishing Ltd, Measurement Science and Technology*, Volume 26, Number 11, DOI: 10.1088/0957-0233/26/11/115202, 2015.
- [91] C. Köllner, „Wie Autos das Denken lernen,“ Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, <https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/car-to-x/wie-autos-das-denken-lernen/10915232>, 2016.
- [92] H. Hooshmand-Ziafi, K. Hassani und M. Dashtdar, „Dual-sensitive spatial phase-shifting shearography based on a common-path configuration,“ *Optical Engineering*, 58(11), 114104 (2019), <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.11.114104>, 2019.
- [93] X. Gao, L. Yang, Y. Wang, B. Zhang, X. Dan, J. Li und S. Wu, „Spatial phase-shift dual-beam speckle interferometry,“ *Applied Optics* Vol. 57, Issue 3, pp. 414-419 (2018), <https://doi.org/10.1364/AO.57.000414>, 2018.
- [94] Y. Wang, X. Gao, X. Xin, S. Wu, Y. Liu und L. Yang, „Simultaneous dual directional strain measurement using spatial phase-shift digital shearography,“ *Optics and Lasers in Engineering*, January 2016, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.12.009, 2016.
- [95] X. Xie, C. P. Lee, J. Li, B. Zhang und L. Yang, „Polarized digital shearography for simultaneous dual shearing directions measurements,“ *Review of Scientific Instruments* 87, 083110 (2016), doi: 10.1063/1.4961473., 2016.
- [96] B. Zhang, W. Xu, J. Li und L. Yang, „Modified Michelson Interferometer Based Dual Shearing Single Camera Digital Shearography,“ *Experimental Techniques* volume 44, pages187–195(2020), <https://doi.org/10.1007/s40799-019-00345-9>, 2019.

- [97] H. Jiang, Y. Ma, M. Dai, X. Dai, Y. Fujun und X. He, „Panoramic dual-directional shearography assisted by a bi-mirror,“ *Applied Optics* Vol. 59, Issue 19, pp. 5812-5820 (2020), <https://doi.org/10.1364/AO.394218>, 2020.
- [98] I. Alexeenko, J.-F. Vandenrijt, G. Pedrini, C. Thizy, B. Vollheim, W. Osten und M. P. Georges, „Nondestructive testing by using long-wave infrared interferometric techniques with CO₂ lasers and microbolometer arrays,“ *Applied Optics* 52(1):A56-67, DOI: 10.1364/AO.52.000A56, 2012.
- [99] X. Gao, Y. Wang, J. Li, X. Dan, S. Wu und L. Yang, „Spatial carrier color digital speckle pattern interferometry for absolute three-dimensional deformation measurement,“ *Optical Engineering* 56(6), 066107 (June 2017), doi: 10.1117/1.OE.56.6.066107, 2017.
- [100] M. Lu, S. Wang, L. Bilgeri, X. Song, M. Jakobi und A. W. Koch, „Online 3D Displacement Measurement Using Speckle Interferometer with a Single Illumination-Detection Path,“ *Sensors* Volume 18 Issue 6, Basel, doi:10.3390/s18061923, 2018.
- [101] M. Schuth und C. Petry, „Vorrichtung zum optischen Messen und Mehrfachspiegel“. Deutschland Patent Amtliches Aktenzeichen: 10 2019 103 814.6; Dokumenten Referenz-Nr. (DRN): 2019021417414700DE, 14 02 2019.
- [102] C. Petry und M. Schuth, Vorrichtung zum optischen Messen und Mehrfachspiegel, Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 2020/164667 A1; Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2020/100094: Weltorganisation für geistiges Eigentum, 20.08.2020.
- [103] C. Petry und M. Schuth, „Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau mit Virtuellem Doppelspalt für Shearografie mit räumlichem Phasenschieben bei variablem Shear,“ DGZfP e.V., Zfp heute - Wissenschaftliche Beiträge zur zerstörungsfreien Prüfung 2020, Hochschule Trier, Schneidershof, 54293 Trier, Deutschland; <https://www.ndt.net/article/dgzfp2020/papers/v9.pdf>, 2020.
- [104] G. Pedrini, Y.-L. Zou und H. J. Tiziani, „Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method,“ *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, Vol. 5 No. 3 (1996) 313–321., <https://doi.org/10.1088/0963-9659/5/3/008>, 1996.
- [105] C. Petry und M. Schuth, „Multi-Wavelengths Michelson Interferometer Based Spatial Phase Shift Shearography with Color Camera,“ *SAE International*, doi:10.4271/2019-01-1269, 2019.
- [106] C. Petry, M. Schuth und M. Spies, „Grid Aperture for Increased Light Intensity and Eliminated Shading For Spatial-Phase-Shift Shearography with Carrier Frequency,“ *CINDE Journal*, Vol. 41 No. 2 April/May/June 2020, 2020.
- [107] J.-F. Vandenrijt und M. Georges, „Automated Defect Detection Algorithm Applied to Shearography in Composites,“ *Fringe 2013: 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology*, S. 237 - 240, ISBN 9783642363580, 2013.
- [108] S. Zhong, F. Sun, S. Wu, F. Bao und Y. Wang, „Multi-directional shearography based on multiplexed Mach–Zehnder interference system,“ *Journal of Modern Optics (IF 1.544)*, <https://doi.org/10.1080/09500340.2020.1733115>, 2020.

- [109] D. Francis, S. James und R. P. Tatam, „Surface strain measurement using multi-component shearography with coherent fibre-optic imaging bundles,“ MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY 18 (2007) 3583–3591, doi:10.1088/0957-0233/18/11/043, 2007.
- [110] S. Wu, X. He und L. Yang, „Enlarging the angle of view in Michelson-interferometer-based shearography by embedding a 4f system,“ Vol. 50, Issue 21, pp. 3789-3794 (2011), <https://doi.org/10.1364/AO.50.003789>, 2011.
- [111] S. S. Russell und M. D. Lansing, „Endoscopic Shearography and Thermography Methods for Nondestructive Evaluation of Lined Pressure Vessels,“ NASA Materials and Processes Laboratory, <https://www.ndt.net/article/v04n05/nasa/nasa.htm>, 1997.
- [112] B. Kemper, Studies on endoscopic electronic speckle pattern interferometry and its application to biological objects (in german), Humboldt University of Berlin: Shaker Publishing House, ISBN 3-8265-9566-1, 2001.
- [113] F. J. Macedo, M. E. Benedet, A. V. Fantin, D. P. Willemann, F. A. A. da Silva und A. Albertazzi, „Inspection of defects of composite materials in inner cylindrical surfaces using endoscopic shearography,“ Optics and Lasers in Engineering, 104 (2018) 100–108, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.06.005>, 2017.
- [114] M. Schuth, F. Vössing und L. Yang, „A Rigid Shearographic Endoscopic for Applications,“ SAE Technical Paper Series 2005-01-0488, DOI: 10.4271/2005-01-0488, 2005.
- [115] M. Schuth und F. Vössing, „Optical Measuring Speckle Systems for NDT,“ SAE Technical Paper Series 2006-06M-331, <https://doi.org/10.4271/2006-01-0767>, 2006.
- [116] M. Schuth, F. Vössing und L. Yang, „Shearographic NDT-Measuring systems in theory and application (endoscope for nondestructive test),“ International Symposium on NDT in Aerospace, November 2010, Hamburg, ISBN: 978-3-940283-28-3, 2010.
- [117] M. Schuth, W. Buerakov, F. Vössing, J. Saporoschski und E. Müller, „SHEAROGRAPHIC INSPECTIONS BY AN INTERFEROSCOPE,“ International Conference on Experimental Mechanics (ICEM 2014), Singapur, <https://doi.org/10.1117/12.2080807>, 2014.
- [118] A. V. Fantin, D. P. Willemann, M. R. Viotti und A. Albertazzi, „A computational tool to highlight anomalies on shearographic images in optical flaw detection,“ Proc. SPIE 8788, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII, 87880L, DOI: 10.1117/12.2020978, 2013.
- [119] C. Petry und M. Schuth, „Endoscopic spatial phase shift shearography with the Interferoskop for turbine blade flaw inspection,“ in 11th International Symposium NDT Aerospace, CONFRED Paris, 15.11.2019.
- [120] M. Schuth, D. Robert und D. Nägel, „Mikroferoskop“. Deutschland Patent, amtliches Aktenzeichen: 10 2010 020 860.4, 30 01 2020.
- [121] M. Schuth, W. Buerakov und D. Robert, „Mikroskopie in der laseroptischen Messtechnik zur Verformungs- und Dehnungsmessung von Mikrostrukturen,“ Hochschule Trier, Lehre und Forschung 2011, https://www.hochschule-trier.de/fileadmin/Hochschule/Forschung/Forschung_Hauptseite/Forschungsberichte/HS_Trier_Lehre_Forschung_2011.pdf, 2011.

- [122] M. Schuth, F. Vössing und L. Yang, „Digital Laser Microferoscope for NDT,“ Proceedings of SPIE 7130, Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 71302V (31 December 2008), <https://doi.org/10.1117/12.819662>, 2008.
- [123] C. Petry, J. Petry, L. Petry und M. Schuth, „Mikroferoskop - Verformungsanalyse in Echtzeit bei der Dichtringkontrolle,“ TeDo Verlag GmbH, Zeitschrift - inVision 3, Juni 2019; S. 70 - 71, 2019.
- [124] L. Petry, J. Petry, C. Petry und M. Schuth, „Dichtring-Qualitätskontrolle mit einem industrietauglichen Mikroferoskop,“ Laser Magazin, Magazin Verlag Publications KG, pp. 21 - 23, September 2019.
- [125] C. Petry, J. Petry, L. Petry und M. Schuth, „Simpler Aufbau, hohe Messgenauigkeit - optische Kontrolle von Gummidichtringen mit dem Mikroferoskop,“ HANSER, Deutsche Gesellschaft für Qualität e. V., QZ Zeitschrift, Ausgabe 1/2020, 1/2020.
- [126] W. Schmidt und S. Getto, „Leichtbauprüfung mittels Multisensorsystemen,“ Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-255192.html>, 2013.
- [127] H. B. Fröhlich, A. V. Fantin, B. C. F. de Oliveira, A. A. Goncalves Jnior, D. P. Willemann, L. A. Lervolino und M. E. Benedet, „Defect classification in shearography images using convolutional neural networks,“ Conference: 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), DOI: 10.1109/IJCNN.2018.8489133, 2018.
- [128] edevis GmbH, „LTShearoVis - Verformungsmessung metallischer Oberflächen,“ edevis GmbH, [Online]. Available: <https://www.edevis.com/content/de/LTShearoVis.php>. [Zugriff am 04 01 2021].
- [129] J. Gryzagoridis und D. Findeis, „Tap Testing vs. Thermography,“ <http://www.ndt.net/?id=19792>, https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/1_Gryzagoridis.pdf, 2017.
- [130] Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH, „Qualitätskontrolle für die Neureifenproduktion und die Runderneuerungsindustrie - ZEISS INTACT,“ [Online]. Available: <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/systeme/zeiss-intact.html>. [Zugriff am 06 01 2021].
- [131] Dantec Dynamics A/S, „Vacuum Hood Inspection System,“ Dantec Dynamics A/S, [Online]. Available: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/laser-shearography-ndt/vacuum-hood-inspection-system/>. [Zugriff am 06 01 2021].
- [132] EPUTEC Drucklufttechnik GmbH, „Wirbelrohr – Vortex Tube,“ EPUTEC Drucklufttechnik GmbH, [Online]. Available: <https://www.eputec.de/exair-wirbelrohr/exair-wirbelrohre-vortex-tube/>. [Zugriff am 06 01 2021].
- [133] Y. Zhang, T. Li und Q. Li, „Defect detection for tire laser shearography image using curvelet transform based edge detector,“ Optics & Laser Technology 47:64–71, DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.08.023, 2013.
- [134] C.-Y. Chang, K. Srinivasan, W.-C. Wang, G. P. Ganapathy, D. R. Vincent und N. Deepa, „Quality Assessment of Tire Shearography Images via Ensemble Hybrid Faster Region-Based ConvNets,“ Electronics 2020, 9(1), 45, DOI: 10.3390/electronics9010045, 2019.

- [135] P. Pfeffer, L. Wachter, D. Hoffmann, C. Kolb, G. Schober und M. Bastian, „A Study of Multifrequent Shearographic Lock-In Measurements of CFRP,“ International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing 4-5 Oct 2018, Saarbrücken – Germany (SHM-NDT 2018), <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=23516>, 2018.
- [136] Y. Y. Hung, W. D. Luo, L. Lin und H. M. Shang, „NDT of joined surfaces using digital time-integrated shearography with multiple-frequency sweep,“ Optics and Lasers in Engineering 33(5):369-382, DOI: 10.1016/S0143-8166(00)00048-8, 2000.
- [137] Y. Y. Hung, „Sonic-Shearography for Nondestructive Inspection of Bonding Integrity Between Tiles and Building Wall,“ The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, 20(1), 11–12, DOI: 10.3970/icces.2011.020.011, 2011.
- [138] D. I. f. N. e.V., DIN ISO 18352:2017-11 Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe - Ermittlung der Compression-After-Impact-Eigenschaften bei spezifischer Aufprallenergie (ISO 18352:2009), <https://dx.doi.org/10.31030/2755048>: Deutsche Institut für Normung e.V., 2017.
- [139] J. Schuster, M.-H. Chen und Q. Govignon, „Kissing Bonds – Gezielte Herstellung und Detektion mit Ultraschall,“ DGZfP Jahrestagung 2019, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=24569>, 2019.
- [140] D. D. Burleigh, „A Portable, Combined Thermography/Shearography NDT System for Inspecting Large Composite Structures,“ Proceedings Volume 4710, Thermosense XXIV; (2002), <https://doi.org/10.1117/12.459611>, 2002.
- [141] C. K. Davis, „Shearographic and thermographic nondestructive evaluation of the space shuttle structure and thermal protection systems (TPS),“ Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2945, DOI: 10.1117/12.259121, 1996.
- [142] J. Gruber und G. Mayr, „Prospects and limitations of digital Shearography and Active Thermography in finding and rating flaws in CFRP sandwich parts with honeycomb core,“ AIP Conference Proceedings 1430, 1881 (2012), DOI: 10.1063/1.4716440, 2012.
- [143] I. Kryukov, M. Kahlmeyer und S. Böhm, „Vergleich der induktiv angeregten Shearografie und Thermographie zur Fehlerdetektion an hochfesten Strukturklebungen und elastischen Dickschichtklebungen,“ DGZfP Thermographie-Kolloquium 2017, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=22473>, 2017.
- [144] J. B. Spicer, J. L. Champion, R. Osiander und J. W. M. Spicer, „Time resolved shearographic and thermographic NDE methods for graphite epoxy/honeycomb composite,“ Materials Evaluation Vol. 54 Issue 10, OSTI Identifier: 398297, 1996.
- [145] edevis GmbH Stuttgart - Philipp Menner, „Aktive Thermographie und Shearographie: Konkurrierende oder sich ergänzende Methoden für die zerstörungsfreie Prüfung von Verbundstrukturen?,“ DGZfP 5. Fachseminar Optische Prüf- und Messverfahren – Vortrag 12, Kassel, 2017.
- [146] X. Xie, Z. Zhou, H. Kolambe und A. Bothe, „Non-Destructive Evaluation for High-Pressure Composite Tubes using a Hybrid Approach,“ SAE Technical Paper 2019-01-1268, DOI: 10.4271/2019-01-1268, 2019.

- [147] Y. Ye, K. Ma, H. Zhou, D. Arola und D. Zhang, „An automated shearography system for cylindrical surface inspection,“ *Measurement*, Volume 135, Pages 400-405, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.085>, 2019.
- [148] Y.-C. Wang, J.-C. Lin und H.-Y. Yang, „Quantitative Post-Processing Module of Online Automatic Image Inspection for Inner Bubble Defects in a Tire,“ *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, DOI: 10.12783/dtetr/imeia2016/9342, 2017.
- [149] D. I. f. N. e.V., DIN EN ISO 9712:2012-12 - Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung (ISO 9712:2012); Deutsche Fassung EN ISO 9712:2012, <https://dx.doi.org/10.31030/1884769>: Deutsches Institut für Normung e.V., 2012.
- [150] P. L. Rosin, H. O. Nyongesa und A. W. Otieno, „Classification of delaminated composites using neuro-fuzzy image analysis,“ *Computer Science*, Corpus ID: 13799845, 1999.
- [151] NDT.net, „AeroNDT Students Challenge,“ 11th International Symposium on NDT in Aerospace, Nov 2019, Paris-Saclay, France, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=267&showForm=&sessionID=1806>, 2019.
- [152] A.-K. Bömkes, J. Plassmann, C. Petry und M. Schuth, „Anwendung der shearografischen Dehnungsmessung mit transientser Wärmeanregung zur zerstörungsfreien Prüfung für die Detektion von Rissen in faserverstärktem Kunststoff im Vergleich zur Thermografie,“ *DGZfP Jahrestagung 2021*, Osnabrück, <https://jahrestagung.dgzfp.de/portals/jt2021/bb176/inhalt/14.pdf>, 2021.
- [153] A. Hanf, C. Petry und M. Schuth, „Neue Bildverarbeitungsalgorithmen für die automatische Fehlstellendetektion bei der shearografischen Bauteilüberprüfung,“ *DGZfP-Jahrestagung Osnabrück*, <https://jahrestagung.dgzfp.de/portals/jt2021/bb176/inhalt/p28.pdf>, 2021.
- [154] Wikimedia Foundation Inc., „Falcon 9,“ Wikimedia Foundation Inc., 24 01 2021. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Falcon_9. [Zugriff am 27 01 2021].
- [155] G. Gardiner, „Automating NDT for CFRP aerostructures,“ *CompositesWorld Magazine*, published by Gardner Business Media Inc., <https://www.compositesworld.com/articles/automating-ndt-for-cfrp-aerostructures>, 2017.
- [156] Genesis Systems, „Genesis Robotic Shearography Inspection Systems,“ Genesis Corporate Headquarters and Launch Center, [Online]. Available: <https://www.genesis-systems.com/applications-processes/non-destructive-inspection/shearography>. [Zugriff am 15 02 2021].
- [157] D. I. f. N. e.V., DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 - Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017, <https://dx.doi.org/10.31030/2731745>: e.V., Deutsches Institut für Normung, 2018.
- [158] Wikimedia Foundation Inc., „Rheologie,“ Wikimedia Foundation Inc., 08 06 2021. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Rheologie>. [Zugriff am 06 07 2021].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Moderne Leichtbauteile: dreidimensional geformtes CFK-Bauteil oben links, Sandwichwaben-Bauteil aus harzgetränktem Papier mittig und Aluminium-Bauteil mit geschäumtem Kern.	1
Abbildung 1.2: VDMA Branchenreport 2017 [11]; Photonik Weltmarktanteil Deutschlands.	3
Abbildung 1.3: Die wichtigsten, rechnergestützten zerstörungsfreien Prüfmethode n im Leichtbau mit Signal-Wellenlänge bzw. Signal-Frequenz.	4
Abbildung 1.4: Bionisch-optimierter Kragbalken mit komplexen geometrischen Aussparungen als 3D Druck-Bauteil (oben links); Shearogramm bei Verformung durch Kraftbeaufschlagung an der Balkenspitze mit einer Masse von 20 Gramm zeigt einen globalen Phasensprung, grün umkreist, und einen lokalen Phasensprung an einer Querstrebe, rot umkreist (oben rechts); Verformungsergebnis zeigt eine Anomalie an, rot umkreist, was ein Indikator für einen Riss oder Bruch ist (unten).	7
Abbildung 1.5: Das magische Dreieck der optischen Messtechnik, schematisch, mit den drei stark voneinander abhängigen Parametern Volumen, Genauigkeit und Zeit; hier eingetragen die Parameterbeeinflussung, qualitativ, durch räumliches Phasenschieben (SPS) verglichen zum zeitlichen Phasenschieben (TPS) als Ausgangspunkt; die Genauigkeit ist reduziert, das Messvolumen und die Messzeit hingegen werden durch SPS verbessert. Durch letzteres ist die vor allem erforderliche Erhöhung der Messstabilität erreichbar.	9
Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer optisch-interferometrischen Messeinrichtung mit aktiver Messobjektanregung für die ZfP; die Kombination aus Laser (I), Interferometer (II) und Kamera mit Objektiv (III) ergibt das Messgerät, welches mittels Computer (IV) zum Messsystem wird. Zur Prüfung wird oftmals noch eine aktive Anregung (V) benötigt.	11
Abbildung 2.2: Helium-Neon Gaslaser (HeNe), 50 mW optische Leistung, ca. 632,8 nm Wellenlänge, Länge ca. 1 Meter, Laser und Controller im Größenvergleich zu einer Kaffeetasse.	13
Abbildung 2.3: Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat (Nd:YAG) Festkörperlaser, 300 mW optische Leistung, Glasfaserkopplung für den flexiblen Einsatz, dadurch optische Austrittsleistung nur noch 23 mW, Wellenlänge 532 nm, Volumen des Laserkoffers ca. 0,5 x 0,4 x 0,2 m ³	14
Abbildung 2.4: Kohärenz schematisch für zwei Wellenzüge a_{We1} und a_{We2} ; über die Kohärenzzeit von $t_k \approx t_2 - t_1$, bzw. die Länge des quasi-monochromatischen Wellenpakets $l_k \approx r_2 - r_1$, ist die Phasenlage am Ort P2 gleich der am Ort P1. Die Phasenverschiebung $\Phi = \phi_2 - \phi_1$ ist also konstant, hier gleich 0°, da $\phi_2 = \phi_1$ ist.	15
Abbildung 2.5: Konstruktive (links) und destruktive (rechts) Interferenz schematisch, abgeleitet aus ([35] S. 31).	15
Abbildung 2.6: Ermittlung der Kohärenzlänge l_k eines Lasers durch Spiegelverschiebung Δs am Michelson-Interferometer bei Messung der Interferenzmodulation γ als Hüllkurvenabstand (lila Kurven) der Intensitätsextrema I (blaue Kurve); Grafik abgeleitet aus ([35] S. 35).	18
Abbildung 2.7: Schematische Darstellung des vom Laser emittierten, schmalbandigen Spektrums mit einer Breite von $\Delta\lambda$ und einer maximalen Intensität bei der mittleren Wellenlänge λ_m ; eine entsprechende spektrale Vermessung der Quelle kann zur Berechnung der Kohärenzlänge l_k dienen.	19

Abbildung 2.8: Lichtreflexion an einer ruhigen Seeoberfläche mit homogener Intensitätsverteilung (links) und an der unruhigen Meeresoberfläche mit stochastischer Verteilung von lokalen Intensitätsmaxima durch gerichtete Reflexion der Sonne (rechts).	20
Abbildung 2.9: (Oben) Entstehung des Specklemusters schematisch ([10] S. 553); Messobjekt unter inkohärentem Licht (unten links) und unter kohärentem Licht mit Speckle-Muster (unten rechts). ..	21
Abbildung 2.10: Zwei-Quellen-Interferenz in der Ebene, zusammengestellt aus [40]; rot markiert ist ein Bereich, innerhalb dessen die beiden halbkreisförmigen Wellenfelder sich konstruktiv überlagern und ihre Amplitude sich aufaddiert.	22
Abbildung 2.11: Auf einem Abbildungsschirm entstehende Beugungsscheibchen bei Transmission von monochromatischem Licht durch eine Kreisapertur (logarithmische Darstellung) [39]. Der zentrale Speckle 0. Ordnung ist rot umkreist.	23
Abbildung 2.12: Laserdiodenmodul mit Versorgung im Größenvergleich zu Laserdiode mit 3,8 mm Sockel und Büroklammer.	25
Abbildung 2.13: Industrielles Kamerasystem und seine Komponenten im Größenvergleich zu Kaffeetasse, Kaffeelöffel und Büroklammer.	27
Abbildung 2.14: (Links) wellenlängenspezifische Quanteneffizienz (QE) [45] für ein Bild mit bunten Objekten, erfasst durch eine schwarz-weiß Kamera oben und durch eine RGB Kamera unten; (rechts) Rohbilder der Farbkanäle für eine RGB Bildzusammensetzung; die Farbe Gelb setzt sich aus einem nahezu gleichhohen roten und grünen Anteil zusammen.	29
Abbildung 2.15: Bild einer CFK Gewebestruktur, erfasst durch eine schwarz-weiß Kamera (oben links) und durch eine Polarisationskamera mit vier Polarisationskanälen; beispielhaft dargestellt der 0° Kanal (unten links) und der 90° Kanal (unten rechts); hierbei ist erkennbar, dass die Lichtreflexion an der Struktur stark von der Webrichtung abhängt und polarisiert ist. Die Rohdaten können für 2x2 Pixelpakete zum farbcodierten Bild der Polarisation zusammengesetzt werden (oben rechts).	30
Abbildung 2.16: Motorradhelm aus CFK zeigt seitlich (Bereich blau umrandet) eine Polarisationsanomalie (rot umkreist), welche im reinen Intensitätsbild unsichtbar ist.	31
Abbildung 2.17: Typischer Messaufbau der out-of-plane Holografie, zusammengestellt aus ([35] S. 40) und ([10] S. 453).	32
Abbildung 2.18: Typischer Messaufbau der out-of-plane Shearografie, zusammengestellt aus ([35] S. 44) und ([10] S. 463).	36
Abbildung 2.19: Versheartes Doppelbild eines Messobjektes (unversheart vgl. Abbildung 2.9 auf S. 21); Shearvektor in Gelb an diversen, eindeutigen Positionen aufgetragen; Shearrichtung mathematisch positiv als Winkel von der x-Achse ausgehend; der Shearbetrag ist die betragsmäßige Länge des Shearvektors.	37
Abbildung 2.20: Abweichender globaler Ausgangsformgradient bei der oop Shearografie (untere Zeile) für dieselbe Messobjektform bei höherer (oben links) und geringerer (oben rechts) Neigung.	38
Abbildung 2.21: Typischer Messaufbau der in-plane Shearografie, zusammengestellt aus ([10] S. 464).	41

Abbildung 2.22: Optisch-interferometrische Messergebnisse für die Prüfung eines aufrechtstehenden Rohres mit zwei bekannten inneren Fehlstellen bei gleichhoher Innendruckbelastung; (links) Hologramm mit vielen irrelevanten Phasenstreifen; (rechts) Shearogramm bei y -Shearrichtung mit eindeutiger Fehlstellenanzeige; die Fehlstellen-Indikatoren sind rot umkreist. Die Bildergröße wurde aufeinander angepasst. Der Shearvektor verursacht typischerweise eine entsprechende Vergrößerung der Fehlstellen-Indikator Markierung, hier in y -Richtung.	43
Abbildung 2.23: (Links) Interferenzbild, dessen Werte zur Kontraststeigerung bereits quadriert und die Bildhelligkeit zur besseren visuellen Darstellung erhöht wurde; (rechts) das mit Phasenschieben daraus gewonnene Interferenzphasenbild.	44
Abbildung 2.24: (Erste und zweite Zeile) vier Interferenzbilddaufnahmen mit je um 90° verschobener Phase, verdeutlicht an der Intensität an einem Punkt über die Phasenschiebung (unten links); resultierendes Interferenzphasenbild (unten rechts).	45
Abbildung 2.25: Ermittlung der Differenzphase Δ (unten) durch die beiden Speckle-Interferenzphasenbilder des Messobjektes im Grundzustand Φ und im angeregten Zustand Φ' (mittig), die jeweils durch 4 Intensitätsbilddaufnahmen mit TPS berechnet wurden (oben); das Speckle-Interferenzphasenbild für eine raue Messobjekt-Oberfläche liefert selbst keine nützliche Information.	47
Abbildung 2.26: Interferogramm bei komplexer Messobjektgeometrie (oben) und zur Demodulation notwendige Maskierung, hier mittels Polygonzügen (unten); die maskierten Werte werden als NaN ⁴⁶ behandelt und fließen damit nicht in weitere Berechnungen ein.	48
Abbildung 2.27: Das gemessene Interferogramm (unten links) und Querschnittsprofil (oben links) enthält hochfrequentes Rauschen, welches durch einfache Mittelwert-Tiefpassfilterung eliminiert werden kann (oben rechts). Auf diese Weise ergibt sich ein Interferogramm mit „weichen“ Übergängen und scharfen Kanten (unten rechts).	49
Abbildung 2.28: Zusammensetzung der Phasensprünge entsprechend der Streifenordnung bei der Demodulation schematisch, linke Spalte für ein Hologramm, rechte Spalte für ein Shearogramm, wie in der oberen Zeile dargestellt (die blauen Zahlen zeigen die Streifenordnung an der entsprechenden Stelle an); die zweite Zeile zeigt das Querschnittsprofil für das Interferogramm mit Phasensprüngen (blauer Sägezahnverlauf) und für das demodulierte Interferogramm (braune Kurve). Die dritte Zeile zeigt die Verformung farbcodiert; die letzte Zeile zeigt die Verformung als rotierte 3D Grafik.	51
Abbildung 2.29: Interferogramm oben links weist im unteren Bereich (gelbes Rechteck) lokal geöffnete Phasensprünge auf (rot umkreist), wodurch die Demodulation mittig links für die untere Bildhälfte (rotes Rechteck) fehlerhaft ist (erkennbar an den unstetigen Werten, wo der Algorithmus die Streifenordnung fälschlicherweise nicht ändert); für das stärker gefilterte Interferogramm oben rechts tritt der Fehler nicht auf (die Farbcodierung für die Werte beider Verformungsbilder ist gleich).	52
Abbildung 2.30: Demodulation eines Shearogramms oben mit komplexer globaler Streifenverteilung führt zu einem einfacher interpretierbaren Verformungsergebnis, mittig farbcodiert für ein intuitives Verständnis für lokale Extremwerte, unten als Grauwertbild für ein intuitives Verständnis der globalen Verformungen; das Messobjekt ist ein Wabenbauteil.	53

Abbildung 2.31: Rückseite einer Prüfplatte mit diversen Nuten als „künstliche Fehlstellen“, oben links; bei vorderseitiger Erwärmung beschränken diese Nuten den Wärmeabfluss ins Bauteilinnere, woraufhin sich lokal Wärmespitzen bilden und zur erhöhten Wärmedehnung führen. Die dabei auftretende Verformung ist als überdimensioniertes Formteil dargestellt, oben rechts. Die demodulierte Verformung bei der shearografischen Messung der Vorderseite der Prüfplatte beim Erwärmen (Shear in x-Richtung), unten links; diese entspricht in etwa dem Intensitätsbild bei einer annähernd horizontalen Beleuchtung der Form in der Shearrichtung, unten rechts.	54
Abbildung 2.32: Shearogramm (Shear in x-Richtung) mit lokalen Phasenstreifen-Anomalien und zwei globalen, vertikal verlaufenden Streifen (gelb gestrichelt angedeutet) oben links; demoduliertes Verformungsbild mittig links und unten links zeigt vor allem den globalen Trend der Verformung an; trendbereinigtes demoduliertes Verformungsbild mittig rechts und unten rechts zeigt vor allem die lokalen Extrema der Verformung an.	55
Abbildung 2.33: SNR-Bestimmung für zwei Shearogramme mit unterschiedlich starkem Fehlstellen-Indikator entsprechend der Phasensprungordnung des Schmetterlingsmusters; ein Phasensprung oben links, kein Phasensprung oben rechts; der Bereich des höchsten Fehlstellen-Signals (rot umrandet) im demodulierten Verformungsbild mittig links und rechts wird einem entsprechenden intakten Bereichs mit messbedingtem Rauschen (grün umrandet) gegenübergestellt. Ausschlaggebend für das SNR sind die durch das Signal und das Rauschen hervorgerufenen Verformungshöhen. SNR des Indikators der linken Zeile ist ca. 3, SNR der rechten Zeile ca. 2; Berechnung s. Gleichung 2.33.	56
Abbildung 2.34: Abhängigkeit der erreichbaren Tiefenauflösung bei der Phasenstreifenerfassung; im Idealfall existiert eine optimale Lasermodulation, wodurch die Intensitätserfassung mit voller Kameratiefenauflösung (hier 12 Bit) erfolgen kann (Bild oben und obere Grafik). Auf diese Weise besitzt ein halber Phasenstreifen nach dem Phasenschieben die volle Tiefenauflösung (untere Grafik und Bild unten). Die auflösungsreduzierende Filterung wird hierbei nicht weiter betrachtet.	59
Abbildung 2.35: Abhängigkeit des erreichbaren Endwerts des Tiefenmessbereichs durch möglichst hohe Streifenordnungen im Interferogramm; ein halber Interferenzstreifen in der Intensitätsbilddaufnahme muss durch mindestens drei Kamerapixel erfasst werden (Bild oben und obere Grafik). Nur so kann die Richtung des entsprechenden Sägezahn-Phasenstreifens nach dem Phasenschieben zugeordnet werden (untere Grafik und Bild unten).	62
Abbildung 2.36: Grafik für den Tiefenmessbereich und den lateralen Messbereich der modernen ESPI und ESPSI, logarithmisch aufgetragen.	65
Abbildung 2.37: Laterale Krafteinleitung in einen Kragbalken (Messobjekt s. auch Abbildung 2.9 auf S. 21) führt örtlich zu verstärktem Rauschen des oop Messergebnisses (Bereich gelb markiert) aufgrund von ip Verformungen der Oberfläche.	66
Abbildung 2.38: Shearografische Vermessung einer dünnen, aufrecht stehenden und angelehnten Platte mit Wärmeanregung; beim Abkühlen zieht sich die Platte von oben nach unten zusammen, wodurch es zur Verformungsdekorrelation bzw. zu starkem Rauschen im Standard-Shearogramm links kommt. Abhilfe kann durch das Aufsummieren vieler Shearogramme während des Abkühlvorgangs geschaffen werden. Das Shearogramm rechts ist nur schwach verrauscht und zeigt einen Indikator für einen Riss (rot umkreist). Die Detailansicht für den oberen Plattenrand, Bild oben rechts, zeigt lediglich Rauschen im Bereich der Verschiebung, welche die Platte während der Messung erfährt. Die laterale Messgenauigkeit ist entsprechend reduziert.	69

Abbildung 2.39: Shearogramm bei geringem Shearbetrag zeigt Dekorrelation im Bereich der höchsten Verformung (links); Shearogramm bei höherem Shearbetrag zeigt Auflösungsdekorrelation im Bereich der höchsten Streifenkonzentration (mittig); Shearogramm mit geringem Shearbetrag ohne Dekorrelation durch Aufsummierung vieler Phasenbilder (rechts); die Ringe des Schmetterlingsmusters sind leicht verzerrt und das globale Umfeld leicht verrauscht („körnigen“ Struktur).	70
Abbildung 3.1: 3D Grafik zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Zeitbereich und Zeitfrequenzbereich; hier die Fourier Analyse einer Rechteckfunktion (grün), welche aus sechs harmonischen, gleichphasigen Schwingungsanteilen (blau) unterschiedlicher Amplitude (rot) besteht; zusammengestellt aus ([35] S. 17).	74
Abbildung 3.2: Zeitsignal (oben) und Zeitfrequenzsignal (unten) bei der akustischen Abtastung einer konstant geblasenen Oboe mittels Smartphone; das Zeitsignal zeigt den komplizierten Schwingungsverlauf und deutet auf mehrere überlagerte harmonische Schwingungsanteile hin. Das Zeitfrequenzsignal, typischerweise in logarithmischer Darstellung, zeigt die enthaltenen Anteile mit hoher Amplitude durch die Maxima an (s. Pfeile). Das niederfrequente Maximum bei 440 Hz (Kammerton a') entspricht dem gespielten Grundton. Alle weiteren Maxima sind durch die Oboe erzeugte Obertöne bzw. natürliche Eigenfrequenzen und machen die Klangfarbe des Instrumentes aus.	76
Abbildung 3.3: Eigenformen bzw. Raumfrequenzen einer ein Meter langen, schwingenden Saite; die Grundform oben entspricht einer halben Sinusschwingung und ergibt sich aus den Lagerbedingungen der Saite, hier beidseitig fest; es sind drei weitere Oberfrequenzen aufgezeigt.....	77
Abbildung 3.4: Eindimensionales Ortssignal oben links und eindimensional-bildliche Darstellung mittels Grauwertverteilung unten links; analog dazu die Amplitude der Fourier Transformatierten oben rechts und ihre eindimensional-bildliche Darstellung unten rechts.	78
Abbildung 3.5: Bild mit sinusförmiger Streifenverteilung auf der xy-Ebene nach der Gleichung links und entsprechendes, geshiftetes ⁶⁷ Fourier Amplitudenbild mit Gleichung rechts; δ entspricht in dieser Abbildung der Dirac-Verteilung. Im Fourier Amplitudenbild wird deutlich, dass das Bild eine Schwingung mit Wellenzahl in xy-Richtung enthält. Die Anteile sind rot gestrichelt markiert. Der erste Quadrant oben rechts zeigt die Amplitude für die positiven Frequenzen an, der dritte Quadrant unten links die Amplitude für negative Frequenzen. Letztere hat keine physikalische Bedeutung. Niederfrequente Anteile werden in der Bildmitte angezeigt, höherfrequente Anteile liegen zum Bildrand hin.	78
Abbildung 3.6: Bild eines Punktemusters mit Gauß-förmiger Intensitätsverteilung auf der xy-Ebene nach der Gleichung links und entsprechendes, geshiftetes ⁶⁷ Fourier Amplitudenbild mit Gleichung rechts; δ entspricht in dieser Abbildung der Dirac-Verteilung. Im Fourier Amplitudenbild wird deutlich, dass das Bild aus der Überlagerung zweier Schwingungen je mit Wellenzahl in x- und in y-Richtung besteht. Die Achsen und Kennwerte im Fourier Amplitudenbild rechts wurden zur besseren Übersicht nicht dargestellt, vgl. ggf. Abbildung 3.5. Die eher niederfrequente Schwingung im Bild in x-Richtung wird im Fourier Amplitudenbild durch die zwei Punkte auf der Horizontalen nahe der Bildmitte repräsentiert. Die eher hochfrequente Schwingung im Bild in y-Richtung wird durch die zwei Punkte auf der Vertikalen näher am Bildrand repräsentiert.	79

Abbildung 3.7: Bild einer rechteckigen (links) und kreisförmigen (mittig rechts) Sprungfunktion und ihre Fourier Amplitudenbilder (mittig links bzw. rechts) in logarithmischer Darstellung; die „scharfen“ Kanten von schwarz nach weiß im Bild werden aus einer Vielzahl hochfrequenter Schwingungsanteile mit höherer Amplitude zusammengesetzt. Aus diesem Grund existiert eine Fülle an Grauwerten im gesamten Fourier Amplitudenbild. Besonders die nahe aneinander liegenden, vertikalen Kanten des Rechtecksprungs rufen viele hochfrequente Anteile mit hoher Amplitude hervor. Die Verteilungen folgen ähnlichen Gesetzen wie die entstehenden Muster von monochromatischem Licht beim Durchlaufen von Blenden. Gekoppelt ist dieses Phänomen über die sog. Fourier-Optik, s. auch Kapitel 2.2.c. 80

Abbildung 3.8: Digitale Fotografie eines Motorrads in den Alpen; die FFT Analyse (Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung) deutet auf ein ausgeprägtes Frequenzspektrum hin, ersichtlich durch die lokale Grauwertverteilung. Dennoch sind zum Großteil niederfrequente Schwingungen enthalten, erkennbar am lokalen, hellen Bereich in der Amplitudenbildmitte. Die zwei farblich markierten Frequenzspektren können den regelmäßigen Strukturen von jeweils winklig liegenden Dachziegeln im Bild zugewiesen werden (hier ggf. nicht mehr ausreichend lateral aufgelöst). Die Bildbereiche sind entsprechend farblich markiert und die jeweilige Schwingungsrichtung mittels Pfeil angedeutet. Ein Phänomen der digitalen Fotografie ist der weiße Streifen auf der Horizontalen (und auf der Vertikalen) im Amplitudenbild. Dieser resultiert aus der sprunghaften Bildabtastung aufgrund der quadratischen Pixel, was stark ausgeprägte Oberfrequenzanteile hervorruft. 83

Abbildung 3.9: Einfache Faseranalyse mittels FFT Bildauswertung; bw Fotografie eines NFK Bauteils oben links; das Intensitätsbild zeigt oberflächliche Fehlstellen (s. blaue Pfeile); das Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung oben rechts zeigt annähernd punktförmige, lokale Ortsfrequenzspektren an, bedingt durch die Faserstruktur des Bauteils. Ein Grundfrequenz-Spektrum mit hohem k_y Anteil (s. grünes Rechteck) wird maskiert für die Rücktransformation. Das Bauteil wurde für die digitale Fotografie bewusst rotiert, damit sich die interessanten Spektren nicht mit den Störanteilen der Horizontalen und Vertikalen überlagern. Entsprechend der Maskierung im Fourier Amplitudenbild (oben rechts) gefiltertes, rücktransformiertes Amplitudenbild unten links; die dunklen Stellen (s. gelbe Kreise) markieren Bereiche, in denen die Amplitude des maskierten Ortsfrequenzspektrums nur schwach vertreten ist, ggf. aufgrund einer verdrückten Bauteiloberfläche. Dies ist auf der Fotografie aufgrund der Überlagerung mit vielen weiteren Ortsfrequenzanteilen nicht ohne weiteres erkennbar (vgl. oben links). Rücktransformiertes, gefiltertes Phasenbild unten rechts; es sind Bereiche erhöhter Streifenkonzentration erkennbar (s. rote Kreise), in denen die Phase des maskierten Ortsfrequenzspektrums stärker ansteigt, ggf. aufgrund von Faserstauchungen bei der händischen Fertigung des Bauteils. Dies ist auf der Fotografie aufgrund der Intensitätsschwankungen nicht ohne weiteres erkennbar (vgl. oben links)..... 84

Abbildung 3.10: Bild mit Speckles (links) und dazugehöriges Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung (rechts); das statistisch-verteilte Specklemuster ergibt die (logarithmisch) nahezu homogene Amplitude (globaler Grauwert) über das gesamte Spektrum des Fourier Bildes (vgl. zu Abbildung 3.8). 84

Abbildung 3.11: Schematische Darstellung eines Nutzsignals (oben), das durch Amplitudenmodulation (mittig) oder Frequenzmodulation (unten) zum Trägersignal aufbereitet wird; auf diese Weise (Trägerfrequenzmethode genannt) kann die Effizienz des Nutzsignal-Transports erhöht werden..... 85

Abbildung 3.12: Schematische Darstellung eines optisch-erfassten Nutzsignals (oben), das durch Intensitätsmodulation (unten) zum Trägersignal aufbereitet wird. 85

Abbildung 3.13: Michelson-Interferometer Aufbau für SPS ESPSI nach der FFT Trägerfrequenzmethode; durch die vorgeschaltete Blende wird eine Lichtbeugung hervorgerufen, die das Ortsfrequenzspektrum begrenzt. Durch den Shearwinkel wird die KIM verursacht, wodurch ein Trägersignal mit höheren Ortsfrequenzanteilen entsteht.	86
Abbildung 3.14: Bildaufnahme des grobkörnigen Speckle-Musters hinter der Blende ohne vershear-te Wellenfronten (links); ein Speckle wurde zum Vergleich gelb eingekreist. Bildaufnahme des Speckle-Musters mit KIM aufgrund der Verkippung der beiden Fronten durch den Shearspiegel (rechts); der eingekreiste Speckle weist nun eine überlagerte Trägerfrequenz in x-Richtung auf. Der jeweilige Gangunterschied der beiden Fronten ist schematisch über den Bildaufnahmen dargestellt.	87
Abbildung 3.15: Fourier Amplitudenbilder in logarithmischer Darstellung; links für ein Specklemuster nach Lichtbeugung am vertikalen Spalt (Darstellung aus Anschaulichkeitsgründen ohne Achsenbeschriftungen), wodurch sich das horizontal begrenzte Hintergrundspektrum S abzeichnet (rot umrandet); rechts mit zusätzlicher Beaufschlagung des gebeugten Specklemusters mit einer Trägerfrequenz, wodurch sich die beiden Trägerspektren zeigen (grün umrandet); die erfolgte Entkopplung des kohärenten Lichtanteils vom inkohärenten Anteil ermöglicht die erwünschte Interferenzphasenberechnung, s. Text.	88
Abbildung 3.16: Die beiden Intensitätsbildaufnahmen des Messobjekts im Grundzustand I und im angeregten Zustand I' (erste Zeile) werden durch einen optischen Shearografie-Aufbau für FFT CF SPS erfasst. Mittels Fourier Analyse der Bilder lässt sich jeweils die Trägerfrequenz im Amplitudenbild $ F $ bzw. $ F' $ auffinden (zweite Zeile) und zur Interferenzphase Φ bzw. Φ' rücktransformieren (dritte Zeile). Bei der Berechnung der Differenzphase Δ aus den beiden Interferenzphasen subtrahiert sich die Trägerfrequenzphase $2\pi f_0$ selbstständig heraus (vierte Zeile).	89
Abbildung 3.17: [90] Michelson-Interferometer FFT CF SPS DS Aufbau mit vorgeschalteter Blende bei Objektbeleuchtung mit zwei Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge zur ip Messung im Videotakt links (Begriffe auf Deutsch übersetzt); zur Vergrößerung der Messfläche werden im Aufbau zusätzliche Optiken verwendet ⁷⁵ . Das Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung rechts zeigt zwei separate Trägerspektren für die beiden Laserwellenlängen.	91
Abbildung 3.18: [94] Michelson-Interferometer FFT CF SPS DS Aufbau mit vorgeschalteter Kreisblende bei Objektbeleuchtung mit zwei Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge zur dual-shear Messung im Videotakt links (Begriffe auf Deutsch übersetzt); zur Vergrößerung der Messfläche werden im Aufbau zusätzliche Optiken verwendet ⁷⁵ . Das Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung rechts zeigt zwei separate Trägerspektren für die beiden Laserwellenlängen, eines horizontal und eines vertikal verschoben.	93
Abbildung 3.19: ([42] S. 112) FFT CF SPS ESPI Aufbau mit vorgeschalteter Blende und Faser-eingekoppelter Referenzwellenfront zur oop Messung im Videotakt (Begriffe auf Deutsch übersetzt); hier: A = Blende, BS = Strahlteiler, L = Linse, M = Spiegel, MO = Mikroskop-Objektiv, PF = Polarisationsfilter, PZT = Piezospiegel; die speziell geformte Blende ist als Detail nochmals oben links im Bild dargestellt, aus normaler Sicht auf die Messobjektoberfläche. Neben der Kreisapertur weist sie einen Führungsspalt auf, in dem ein Glasfaserkabel verschoben wird. Dieses leitet die Referenzwellenfront in den Strahlengang ein, wobei der Mittenabstand zur Kreisapertur, hier Δx , feinjustiert werden muss, um eine passende Trägerfrequenz zu erzeugen.	95
Abbildung 3.20: Fourier Amplitudenbild in logarithmischer Darstellung beim FFT CF SPS oop ESPI Aufbau mit Faser-eingekoppelter Referenzwellenfront zeigt ein annähernd rundes Trägerfrequenzspektrum (grün umkreist) aufgrund der speziellen Blende mit Kreisapertur zur Trägerfrequenzerzeugung; zusammengestellt aus [48].	95

Abbildung 4.1: Darstellung von optischen Aufbauten mit Spaltblenden, wobei jede Apertur nur von einer der beiden Wellenfronten durchlaufen wird. (Auf diese Weise kann eine Trägerfrequenz durch die unvershear-te Wellenfront a_{We} und die vershear-te Wellenfront $a_{We,\delta}$ erzeugt werden, s. auch Abbildung 4.5). (1) Einfachster, schematischer Zielaufbau; (2) Aufbau von Bhaduri et al. [76] mit hochgenau positioniertem Spiegelprisma; (3) Aufbau mit zwei Einfachblenden und Strahlteiler zur Wellenfrontzusammenführung, wodurch ein flexibel einstellbarer virtueller Doppelspalt erzeugt wird, s. auch Abbildung 4.2.	96
Abbildung 4.2: (Links) shearografische Auswertung einer laserbeleuchteten Oberfläche mit Mach-Zehnder-Interferometer (MZ) Aufbau bestehend aus zwei Strahlteilern, festem Spiegel und Shearspiegel; durch die beiden Blenden (gelb) kann SPS nach der FFT Methode durchgeführt werden. Die kohärente Intensitätsmodulation (KIM) wird durch den virtuellen Doppelspaltabstand a verursacht, wodurch die Trägerfrequenz entkoppelt vom Shearwinkel erzeugt wird. (Rechts) aus Blickrichtung der Kamera ist mit Fokus auf der Blendenebene ein virtueller Doppelspalt (VDS) mit Doppelspaltabstand a zu sehen, der aus der Wellenfrontzusammenführung der Bilder aus den beiden Interferometerarmen im kameranahen Strahlteilerwürfel resultiert.....	97
Abbildung 4.3: Shearogramme einer Platte mit künstlichen Fehlstellen in Form von rückseitig eingebrachten Sacklochbohrungen unterschiedlicher Restwandstärke (nicht weiter benannt), Bohrungsdurchmesser $A = 30$ mm, $B = C = D = E = 15$ mm; links Messung bei einem Shearbetrag von 2 mm; rechts bei einem Shearbetrag von 15 mm; die Messbreite rechts fällt geringer aus, die verzerrten Schmetterlingsmuster von Fehlstelle C, D und E überlagern sich, die Phasenstreifen von Ergebnis D sind dekorreliert und den Fehlstellenindikatoren sind trotz geringer Belastung aufgrund der zu hohen Sensitivität vertikal verlaufende, globale Verformungsstreifen überlagert.	98
Abbildung 4.4: (Oben) am Michelson-Interferometer werden 50 % des Eingangslichts prinzipbedingt zurückgeworfen. (Unten) am Mach-Zehnder-Interferometer können durch polarisationsabhängige Strahlteilerwürfel 100 % des Eingangslichts zur Kamera geleitet werden. Für die interferometrische Überlagerung auf dem Kamerachip muss die Polarisation der Wellenfronten aus den beiden Interferometerarmen wieder angeglichen werden, hier durch einen Depolarisator unmittelbar nach dem kameranahen Strahlteilerwürfel.	99
Abbildung 4.5: Interferenzphänomen einer Eingangswellenfront (rot) beim Durchlaufen eines Doppelspalts; es entstehen zwei neue Wellenfronten (orange und grün), deren Wellenfelder sich überlagern. Auf einem Bildsensor im Abstand der Objektivbrennweite f vom Doppelspalt entfernt entsteht eine Intensitätsmodulation (blau).	100
Abbildung 4.6: Schematische Darstellung der erfassten Raumperioden (blau) durch einen Bildsensor (Pixelzeile mit Intensität als Grauwert je Pixel); die Raumperioden resultieren aus einem Specklemuster, hier mit homogener Specklebreite; (oben) maximal erfassbare Ortsfrequenz; (mittig) optimale Trägerfrequenz für FFT CF SPS; (unten) optimale Cut-off-Frequenz für FFT CF SPS.....	102
Abbildung 4.7: Optimales SPS Trägerfrequenzspektrum (grün markiert) mit den maximal einstellbaren Abmaßen im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung, unter Verwendung des VDS.....	103
Abbildung 4.8: Optimal für SPS: VDS mit Doppelspaltabstand gleich der Spaltbreite für ein maximales Trägerspektrum im Fourier Amplitudenbild.	104
Abbildung 4.9: (Links) ESPI Messung mit dem neuen VDS MZ Aufbau durch Einsatz eines Diffusorglases; (mittig) das Hologramm (Bildausschnitt) zeigt das typische bullseye-Muster für eine kreisrunde Fehlstelle. (Rechts) mittels Demodulation wird die oop Verformung berechnet.	106

Abbildung 4.10: Schematische Darstellung der erfassten Raumperiode (blau) durch einen Bildsensor (Pixelzeile mit Intensität als Grauwert je Pixel), resultierend aus einem Specklemuster mit homogener Specklebreite; hier dargestellt eine Raumperiode entsprechend der Pixelbreite, welche folglich als frequenzlos erfasst wird (ersichtlich am einheitlichen Pixel-Grauwert).....	107
Abbildung 4.11: Auswirkung bei Erhöhung der Trägerfrequenz eines Spektrums im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung; bei Übersteigung der maximal erfassbaren Raumfrequenz tritt Unterabtastung (Aliasing) ein; bei weiterer Erhöhung der Trägerfrequenz wird das Spektrum am Fourier Bildrand „reflektiert“ und bewegt sich wieder zur Bildmitte hin; bei einer Trägerfrequenz doppelt so hoch wie die maximal erfassbare Frequenz liegt das Spektrum in der Bildmitte, was gleichzusetzen ist mit einem frequenzlosen Spektrum.....	108
Abbildung 4.12: Im Technikum OGKB entwickelte Gitterblende für FFT CF SPS mit stark erhöhter Messlichtintensität; die Gitterfrequenz der Aperturen muss gleich der 6-fachen optimalen Spaltbreite sein, damit die Gitterspektren sich mit dem Hintergrundspektrum überlagern und die Trägerfrequenz-Auswertung nicht stören.....	109
Abbildung 4.13: (Obere Zeile) Vergleich der Ergebnisqualität beim FFT CF SPS DS mit Einfachblende (links) und mit Gitterblende (rechts); die Versuchsbedingungen werden konstant gehalten. Die Belichtungszeit beträgt 3,5 ms. Bei der Verwendung der Einfachblende ist der Fehlstellenindikator im Shearogramm nur andeutungsweise erkennbar (links). Aufgrund des starken Rauschens durch die Unterbelichtung ist eine weitere Auswertung unmöglich. Die Bildränder sind nicht verwertbar. Bei der Verwendung der Gitterblende weist der Indikator einen hohen Phasenkontrast auf und kann weiterverarbeitet werden (rechts). Die Bildränder sind leicht verrauscht.	110
Abbildung 4.14: Foto der VDS Erzeugung mit zwei Gitterblenden unter Weißlicht; eine der beiden Blenden ist etwas nach oben verschoben und ihre Gitterkonstante oben aufgetragen. Dieselbe Gitterkonstante der zweiten Blende ist unten aufgetragen. Werden beide Gitter am Strahlteiler gegeneinander verschoben, entstehen je Apertur-„Pärchen“ virtuelle Doppelspalte mit dem oben rechts aufgetragenen Doppelspaltabstand.....	111
Abbildung 4.15: Schematische Darstellung der vektoriellen Beleuchtungsbedingungen bei der 3 out-of-plane Mechanik mit drei verschiedenen Wellenlängen, rot, grün und blau; axonometrische Ansicht links, Vorderansicht mittig und Draufsicht rechts; in der Draufsicht sind der grüne und der blaue Vektor aufgrund ihrer Projektionen in der xz-Ebene nur halb so lang wie der rote Vektor. Beträgsmäßig sind alle Vektoren gleich lang. Die z-Achse entspricht der Beobachtungsrichtung der Kamera.	113
Abbildung 4.16: (Links) Kragbalken als Messobjekt mit Krafteinleitung mittels Zuganker (Pfeil) und markierter Messfläche (gestrichelter Rahmen); (rechts, obere Zeile) Farbbildaufnahme für RGB beleuchtetes Messobjekt mit Detailansicht zur Veranschaulichung der unterschiedlich farbigen Speckles; es sind zusätzlich schwarze Punkte auf dem Messobjekt sichtbar, die für DIC verwendet werden und hier ignoriert werden können. (Rechts, mittlere Zeile) die drei separaten RGB Farbkanäle zeigen das entsprechend farbige Specklemuster. (Rechts, untere Zeile) Shearogramm je Farbkanal nach Messobjektbelastung.....	114
Abbildung 4.17: Vergleich der Messergebnisse aus dem Versuch nach Abbildung 4.16 für 3 out-of-plane RGB SPS ESPSI (linke Spalte) und sequenzielle TPS ESPSI (rechte Spalte) in der Einheit $[10^{-5} \text{ m/m}]$; in-plane Dehnungsanteil (obere Zeile), in-plane Gleitungsanteil (mittlere Zeile) und out-of-plane Neigungsanteil (untere Zeile); die Farbskala ist je Zeile angepasst. Die Stelle des Extremwerts je Ergebnis ist markiert und quantifiziert.....	115

Abbildung 4.18: Ein Speckle (gelb gestrichelt umkreist), der auf einem Farbkamerachip mit einer Breite von 12 Pixelgrößen abgebildet wird (links), wird nach der Kanaltrennung (mittig und rechts) mit einer Breite von 6 Pixelgrößen der gleichen Farbe wahrgenommen.	115
Abbildung 4.19: Im Technikum OGKB entwickelte RGB Gitterblende für 3D ESPSI am VDS MZ Aufbau; (links) das Foto zeigt die aufgebrachten Absorptionsfilterfolien, je für eine bestimmte Anzahl an Aperturen mit einer wellenlängenspezifischen Spaltbreite. Zur Minimierung von Bildabschattungen werden global gesehen mehrere Apertur-„Pakete“ einer bestimmten Farbe gleichmäßig verteilt. (Rechts) Foto der RGB Blende, mit Weißlicht rückseitig durchleuchtet; die notwendigen Auslassungen in den wellenlängenspezifischen Gittern folgen den angegebenen Gleichungen entsprechend einem Vielfachen der erforderlichen Gitterkonstanten. Aufgrund einer suboptimalen Weißlichtquelle weisen die Spalte eine Frequenz regelmäßiger schwarzer Punkte und teilweise dunkler Stellen auf, die es zu ignorieren gilt.	117
Abbildung 4.20: Optimale SPS Trägerfrequenzspektren je RGB Farbkanal mit den maximal einstellbaren Abmaßen im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung, unter Verwendung der RGB Gitterblenden; die Bilder wurden zur besseren Visualisierung entsprechend des jeweiligen Farbkanals eingefärbt.....	118
Abbildung 4.21: Holografischer Fehlstellenindikator für eine einfache Prüfplatte bei der oop Messung mit orthogonaler RGB Messobjektbeleuchtung; die Hologramme der parabelförmigen Verformung werden separat durch die drei Kanäle der Farbkamera ermittelt. Kürzere Wellenlängen rufen eine höhere Phasenstreifenordnung hervor. Die Bilder wurden zur besseren Visualisierung entsprechend des jeweiligen Farbkanals eingefärbt.....	120
Abbildung 4.22: (Links) erweitertes Interferometer des VDS MZ Aufbaus für dual-shear ESPSI mit zwei zusätzlichen, polarisierenden Halbspiegeln je Interferometerarm, vgl. zu Abbildung 4.2; die unpolarisierte Eingangswellenfront je Interferometerarm wird mittels Halbspiegel nochmals aufgeteilt in einen senkrecht-polarisierten und einen parallel-polarisierten Lichtanteil, s. rechts. Alle vier Lichtanteile werden auf den Bildsensor einer Polarisationskamera geleitet. Auf diese Weise liegen dort zwei unabhängige Specklemuster vor, welche durch den VDS dieselbe Trägerfrequenz aufweisen. Mittels Halbspiegel- bzw. Spiegelverkipfung weist das senkrecht-polarisierte Specklemuster einen Shear in x-Richtung, das parallel-polarisierte Specklemuster einen Shear in y-Richtung auf.	121
Abbildung 4.23: Optimale SPS Trägerfrequenzspektren je Polarisationskanal mit den maximal einstellbaren Abmaßen im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung, unter Verwendung von einfachen Gitterblenden; die Bilder wurden zur besseren Visualisierung eingefärbt.	122
Abbildung 4.24: (Erste Zeile) Shearogramme einer Kunststoff-Prüfplatte (s. Abbildung 2.31 auf S. 5449) mit künstlichen Fehlstellen unter optisch-thermischer Anregung bei einem Shear in x-Richtung (erste Spalte) und y-Richtung (zweite Spalte); rückseitig wurde eine Plansenkung oben links und vier Nuten gleicher Abmaße mit einem Winkelabstand von jeweils 45° eingebracht, jeweils mit derselben Restwandstärke. (Zweite Zeile) demoduliertes oop Verformungsergebnis als Grauwertbild mit SNR-Wert in Gelb für die Fehlstellenindikatoren und roten Ellipsen für problematische Bereiche; es fällt auf, dass gerichtete Fehlstellen in Shearrichtung unzureichend angezeigt werden. (Dritte Zeile) demoduliertes oop Verformungsergebnis als farbcodiertes Bild; Maßstab jeweils in [Mikrostrain]. 124	

Abbildung 4.25: Farbcodiertes dual-shear Ergebnisbild als Addition der Verformungen in den beiden Shearrichtungen nach Abbildung 4.24; alle Fehlstellenindikatoren für die gerichteten Fehlstellen sind in einem einzigen Bild sichtbar, wenn deren Gestalt z. T. auch untypisch erscheint. Die Extremwerte des Maßstabs in [Mikrostrain] wurden nicht verdoppelt, wodurch die Indikatoren der Nuten besser visualisiert werden. Die schwarzen Zahlen entsprechen vereinfachten SNR-Werten für die Indikatoren, die aus der jeweiligen Summe der SNR-Werte aus den beiden separaten Verformungsbildern gebildet wurden. Die Werte für die 4 Nuten sind annähernd gleich hoch.....	125
Abbildung 4.26: Dual-shear Grauwert-Ergebnisbild der Verformungen nach Gleichung 4.31 in den beiden Shearrichtungen nach Abbildung 4.24; alle Fehlstellenindikatoren für die gerichteten Fehlstellen sind in einem einzigen Bild sichtbar. Die Fehlstellen werden nahezu ausschließlich inkl. deren geometrischer Abmaße angezeigt. Alle anderen Bereiche sind dunkel, teilweise schwarz. Die shearografische Ergebnisinterpretation ist auf diese Weise vereinfacht. Die Extremwerte des Maßstabs in [Mikrostrain] wurden nicht verdoppelt, wodurch die Indikatoren der Nuten besser visualisiert werden.	126
Abbildung 4.27: Schematischer one-shot ESPSI Aufbau als Kombination der 3D ESPSI (Kapitel 4.3.a) und der dual-shear ESPSI (Kapitel 4.3.b). Dabei kommen die beiden speziellen RGB pol Gitterblenden zum Einsatz, s. Abbildung 4.29.	128
Abbildung 4.28: (Oben) optimale SPS Abmaße für zwei Spektren unterschiedlicher Trägerfrequenz im Fourier Amplitudenbild, logarithmische Darstellung, hier für RGB pol FFT CF SPS; (unten) die zwei orthogonal zueinander polarisierten Trägerspektren je Farbkanal beinhalten die Interferenzphaseninformation für die beiden Shearrichtungen. Die Bilder wurden zur besseren Visualisierung entsprechend des jeweiligen Farbkanals eingefärbt. Durch die sechs Spektren können alle sechs shearografischen Messgrößen ermittelt werden.	129
Abbildung 4.29: Die im Technikum OGKB entwickelten zwei RGB pol Gitterblenden für one-shot ESPSI am VDS MZ Aufbau; das Foto oben mittig zeigt die erste Blende mit vorderseitig aufgebrachten Polarisationsfilterfolien. Die Folienstreifen sind je für eine bestimmte Anzahl an Aperturen und je im Wechsel bzgl. der passierenden Polarisationsrichtung aufgebracht. Rückseitig (nicht dargestellt) ist die Blende mit Farbfilterfolien versehen. Der so erzielbare Effekt wird beim rückseitigen Durchleuchten der Blende mit polarisiertem Weißlicht deutlich. Je nach Polarisationsrichtung werden unterschiedliche RGB Aperturen sichtbar, wie die Fotos oben links und oben rechts zeigen. Das Foto unten mittig zeigt die zweite Blende mit aufgebrachten Farbfilterfolien. Auf der Rückseite der Blende befinden sich keine Polarisationsfilter. Werden beide Blenden im MZ eingesetzt, stellen sich je Polarisationsrichtung und je Apertur-„Farbe“ virtuelle Doppelspalte ein, wobei sich zwei verschiedene VDS-Abstände je Farbe ergeben, wie in der linken und rechten Spalte für rot (R) veranschaulicht. Die Gitterkonstante je Polarisationsrichtung und je Apertur-„Farbe“ ist immer ein Vielfaches der zehnfachen Spaltbreite.....	131
Abbildung 4.30: Shearografischer Fehlstellenindikator für eine einfache Prüfplatte bei der one-shot ESPSI Messung; je Farbkanal (links, mittig, rechts) werden zwei Shearrichtungen (oben, unten) erfasst. Die Bilder wurden zur besseren Visualisierung entsprechend des jeweiligen Farbkanals eingefärbt. Vor allem die grüne Beleuchtung ist aufgrund der reduzierten Messlichtintensität durch die notwendigen Blenden örtlich unzureichend, wodurch es zum Rauschen kommt. Eine fehlerfreie Demodulation ist hier nicht möglich, wodurch die weitere Auswertung der sechs shearografischen Messgrößen nicht durchgeführt werden kann.	132
Abbildung 5.1: Mach-Zehnder (MZ) Messgerät mit roter Laserdiode beim flexiblen Einsatz auf einem Stativ.....	133

Abbildung 5.2: Erreichbare Messfläche mit dem MZ Messgerät bei einer Brennweite von 25 mm und einem Messabstand von 500 mm; Maße eines beispielhaften Messobjektes mit Fehlstellenindikator.	134
Abbildung 5.3: (Links) 4f Modul mit Zoom-Objektiv und weiterer Linse im Gehäuse; (rechts) angeflanscht am MZ Messgerät kann die Messfläche direkt über das Zoom-Objektiv eingestellt werden, ohne weitere Einstellungen im MZ Grundkörper vornehmen zu müssen.....	135
Abbildung 5.4: Prinzip des 4f Systems über die Trennung von Kamera und Objektiv und die Einbringung von zwei bikonvexen Linsen gleicher Brennweite; zwischen den beiden Linsen kann ein Interferometer angeordnet werden. Mithilfe der mehrmaligen Strahlbrechung an den Linsen wird die Lichtfläche klein gehalten, wodurch es keine Informationsverluste (Bildabschattungen) gibt.....	135
Abbildung 5.5: Erreichbare Messfläche mit dem MZ Messgerät mit 4f Modul bei einer Brennweite von 10 mm und einem Messabstand von 500 mm; Maße eines beispielhaften Messobjektes mit zwei Fehlstellenindikatoren.....	135
Abbildung 5.6: RGB Beleuchtungsmodul mit drei Beleuchtungsarmen am Flansch; die Arme sind hier jeweils mit drei LD-Kollimatoren ausgerüstet. Die Einstellmöglichkeiten für den Beleuchtungswinkel sind durch die roten Pfeile gekennzeichnet.....	136
Abbildung 5.7: (Links) angeflanshtes RGB Beleuchtungsmodul am MZ Messgerät mit einer Laserquelle je Beleuchtungsarm in der Konfiguration für die 3 out-of-plane Mechanik; (rechts) rotierte zwei-Arm Konfiguration für eine maximale Sensitivität in vertikaler Richtung (nicht weiter ausgeführt, s. Texthinweis).	137
Abbildung 5.8: (Links) RGB Beleuchtungsmodul mit 340 mm Armlänge als Ausführung für hohe ip Sensitivitäten; auf diese Weise werden bei einem Messabstand von 500 mm Beleuchtungswinkel von 35° erreicht. (Rechts) MZ Messgerät mit gleichzeitig angeflanshtem 4f Modul und RGB Beleuchtungsmodul.....	137
Abbildung 5.9: Entwicklungsstufen des endoskopisch-shearografischen Messgerätes Interferoskop des Technikums OGKB der Hochschule Trier; mit der Version 1 oben links wurde die Machbarkeit bewiesen. Daraufhin gab es mehrere Änderungen des optischen Aufbaus sowie des Gehäuseaufbaus, um die jeweilige Zieleigenschaft zu erreichen (Begriff in grüner Schriftfarbe). Der jeweilige Kernnachteil ist in gelber Schriftfarbe (problematisch) oder in roter Schriftfarbe (unzureichend) aufgeführt. Version 5 arbeitet erstmals nach der Methode des räumlichen Phasenschiebens.....	140
Abbildung 5.10: Interferoskop 5.2 mit VDS MZ Aufbau im Sensorkopf, erstmals mit endoskopischer Anregung und Laserdiode mit autarker Akkuversorgung.	141
Abbildung 5.11: Entwickeltes Interferoskop-Messsystem, bestehend aus dem Messgerät, einer Kameraverbindung zum Laptop und einem elektrisch angetriebenen Kompressor als Druckspeicher, mittels Schlauch an das Messgerät angeschlossen.....	142
Abbildung 5.12: Das patentierte Mikroferoskop, bestehend aus einem handelsüblichen Mikroskop mit eingestecktem Zusatzmodul, wodurch holografische ESPI möglich wird; zum Messgerät gehört ein Steuergerät, welches die glasfasergekoppelte Laserquelle enthält und zudem u. a. die Piezosteuerung durchführt. Letztere dient der zeitlichen Phasenschiebung, gesteuert durch die Messsoftware am Laptop [121].	144

Abbildung 5.13: (links) Mikroferoskop 2 mit oop Modul als Steck einsatz in ein handelsübliches Mikroskop; das Modul wurde mittels 3D Kunststoffdruck in Steckbauweise gefertigt und wiegt inkl. der optischen Elemente des Interferometers nur 150 Gramm. (Oben rechts) als Beleuchtungsquelle wird aktuell noch ein externer Laser eingekoppelt. Der Einbau einer Laserdiode mit autarker Versorgung ins Gehäuse des Moduls ist geplant. (Unten rechts) die Laserbeleuchtung des Messobjektes erfolgt koaxial mit der Messobjektbeobachtung, wodurch Schattenbildung vermieden wird.....	147
Abbildung 5.14: (links) Mikroferoskop 2 mit 3D Modul als Steck einsatz in ein handelsübliches Mikroskop; das Modul wurde mittels 3D Kunststoffdruck in Steckbauweise gefertigt und wiegt inkl. der optischen Elemente nur 400 Gramm. Es wurde aufgrund des begrenzten Druckervolumens in 4 Teilen gedruckt (drei Arme, Grundkörper) und anschließend verklebt. (Rechts) in jedem Beleuchtungsarm befindet sich eine Laserdiode mit R-, G- oder B-Wellenlänge, sodass das Messobjekt nach der 3 out-of-plane Mechanik in einem 60° Winkel beleuchtet wird (Strahlengang angedeutet durch die Pfeile).....	148
Abbildung 5.15: Darstellung der Kommunikation des übergeordneten Steuerprogramms zur zeitlichen Synchronisation der Datenerfassung durch OPTIS 4 sowie der Beleuchtung und Anregung durch das Steuergerät; die gestrichelten Linien stellen die Verbindungskabel dar, die Pfeilrichtung zeigt den Befehlsablauf. Einzig die Kommunikation zwischen OPTIS 4 und der Kamera im Messgerät läuft in zwei Richtungen ab (gestrichelte Linie in braun und in lila, entspricht einem einzigen Kamerakabel). OPTIS 4 löst die Kamera zur Bildaufnahme aus, anschließend sendet die Kamera das Bild zurück an den Laptop.	150
Abbildung 5.16: (Oben) Steuergerät zur Versorgung von vier Anregungseinheiten mit unterschiedlicher Versorgungsspannung sowie von neun Laserdioden unterschiedlicher Wellenlänge am RGB Beleuchtungsmodul; mittels DMX Anschluss werden Signale an einen Dimmer gesendet, um weitere vier Anregungseinheiten mit Netzspannung zu versorgen. (Unten) das Steuergerät mit angeschlossener Unterdruckpumpe, Dimmer und Laserdioden mit ESD Schutzplatinen am Kabel. .	151
Abbildung 5.17: Grafische Benutzeroberfläche der neuen SPS Datenerfassung in OPTIS 4; das Logo der neu aufgesetzten OPTIS 4 Software wurde mittig ins Bild eingefügt. Der Programmablauf und die Funktionen werden in Tabelle 5.5 beschrieben.	153
Abbildung 5.18: Grafische Benutzeroberfläche der neuen Datennachbearbeitung mit SPS Funktionalitäten in OPTIS 4; der Programmablauf und die Funktionen werden in Tabelle 5.5 beschrieben.	154
Abbildung 6.1: Überschlüssiges Simulationsbeispiel (alle Bilder sind simuliert) ohne genauere Quantifizierung; a) oop Verformung eines Aluminium-Kompositbauteils mit Wabenkern, Deckplattendicke 2 mm, bei einer Unterdruckanregung mittels umlaufend anliegender Vakuumhaube; im unteren Bereich mit lateral größerem, mittig mit kleinerem Schlagschaden; b) Hologramm, Laserwellenlänge (für alle Interferogramme) 532 nm, bei einer Anregung von 0,01 kPa; die globale Bauteil-Wölbung macht sich durch ringförmige Phasensprünge bemerkbar, welche die Deutung des mittleren Schadens schwierig gestalten. c) Shearogramm mit 5 mm Shear (für alle Shearogramme) in x-Richtung bei einer Anregung von 0,1 bar (wie für alle weiteren Shearogramme außer g); unterer Schaden wird gut sichtbar, globale Phasenstreifen sind jedoch vorhanden; d) Shearogramm mit Shear in y-Richtung zeigt nahezu keine globalen Streifen; Schaden mittig wird leicht sichtbar; e) Shearogramm aus d) mit reduzierter Tiefenauflösung; f) Shearogramm aus d) mit beaufschlagtem Verformungsdekorrelationsanteil (Rauschen), welcher zu den Bildrändern hin stärker auftritt; g) Shearogramm mit Shear in y-Richtung bei einer Anregung von 0,3 bar zeigt, verglichen zu d), Indikatoren mit höherer Streifenordnung im Bereich der beiden Schäden.	159

Abbildung 6.2: Shearogramm eines ebenen Messobjektes mit sechs künstlichen Fehlstellen unter Druckbelastung; die Fehlstellen sind zylinderförmig und liegen im Inneren des Messobjektes. Die drei Fehlstellen in der oberen Zeile liegen in derselben Tiefe T unterhalb der Oberfläche und weisen unterschiedliche Radien auf mit $r_1 < r_2 < r_3$. Umso größer der Fehlstellenradius ist, desto stärker ist die Verformung an der Oberfläche unter der homogenen Druckbelastung, erkennbar an der höheren Phasenstreifenordnung. Die drei Fehlstellen in der unteren Zeile weisen unterschiedliche Radien r auf und liegen in unterschiedlichen Tiefen T unterhalb der Oberfläche mit $T_1 < T_2 < T_3$. Dabei sind die Verhältnisse von r und T nach Gleichung 6.1 ausgelegt. In diesem Falle ist die Verformung an der Oberfläche für alle 3 Fehlstellen gleich, erkennbar an der gleichen Phasenstreifenordnung. Das Objekt wurde mittels 3D Druck aus PLA-Kunststoff hergestellt. 160

Abbildung 6.3: Shearografische Messung des Verformungszustandes einer ca. 20 mm dicken Kunststoffplatte zu verschiedenen Zeiten t nach dem Beginn einer kontinuierlichen, vorderflächigen Wärmebelastung; die Platte enthält fünf künstliche Fehlstellen unterschiedlicher Größe und Tiefe (nicht weiter quantifiziert). Die globale Verformung ist zu Beginn sehr hoch, bis sich eine gewisse Wärmeableitung ins Bauteilinnere einstellt. Ab ca. 330 Sekunden steigt die globale Streifenordnung wieder, vermutlich da die Wärmefront die Plattenrückseite erreicht hat und sich aufstaut. Die Indikatoren für die künstlichen Fehlstellen ergeben sich nach unterschiedlichen Zeiten, dann mit steigender und wieder abfallender Streifenordnung. Zudem nimmt ihre laterale Größe kontinuierlich zu. Verformungsanomalien mit geringem Fehlstellenkontrast sind rot gestrichelt, Anomalien mit mäßigem Kontrast rot umkreist. Anomalien mit dem höchsten Kontrast in Anbetracht der vermuteten, wahren lateralen Fehlstellengröße sind gelb umkreist..... 163

Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der Grenzbedingungen für die Detektion von Fehlstellen (links) bzw. Rissen (rechts); der Durchmesser D bzw. das lateral kleinste Maß einer Fehlstelle muss mindestens gleich ihrer Tiefe T unterhalb der Bauteiloberfläche sein, ansonsten ist sie shearografisch nicht ohne Weiteres detektierbar. Für typische halbkreisförmige Oberflächenrisse muss die Risstiefe T mindestens der halben Messobjekthöhe H entsprechen. Die Risslänge L entspricht dabei der Messobjekthöhe. 165

Abbildung 6.5: Schematische Betrachtung zum kleinsten Fehlstellenabstand zum Messobjektrand; die obere Zeile zeigt die Messobjektbreite sowie die Fehlstellenbreite und -position, die untere Zeile das entstehende Shearogramm bei einem Shearbetrag entsprechend der Hälfte des Fehlstellendurchmessers (für maximale Messsensitivität). Ist die Fehlstelle um den Shearbetrag vom Messobjektrand entfernt, ergibt sich ein vollständiger Fehlstellenindikator (links). Liegt die Fehlstelle hingegen am Messobjektrand, werden Teile des Indikators abgeschnitten, was die weitere Auswertung erschwert. 167

Abbildung 6.6: 200 mm x 200 mm Schaumstoff Polsterelement, welches händisch geführt zur flexiblen, mechanischen Messobjektanregung genutzt wird; durch den Schaumstoff ergibt sich eine relativ sensible, örtlich homogene Belastung ohne punktuelle Wärmeübertragung wie bei einer berührenden Anregung mit der Hand..... 171

Abbildung 6.7: (Links) Roboter mit Greifer und Bin Picking Sensor zur Vereinzelung chaotisch angeordneter Bauteile aus einer Kiste; (rechts) Shearogramm des mittels Greifer mechanisch belasteten Messobjektes (s. rote Pfeile) zeigt beispielhafte Indikatoren für eine Prüfung..... 172

Abbildung 6.8: Im Technikum OGKB der Hochschule Trier entwickelte Mikrozugprüfmaschine zur hochgenauen Verformung von Messobjekten mittels Piezostapel; maximaler Hub 87 μm , maximale Kraft 20 kN..... 173

Abbildung 6.9: Im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Unterdruckkammer zur mechanischen Verformung von Messobjekten mit einer Größe von bis zu 320 mm x 320 mm x 200 mm.	174
Abbildung 6.10: Im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vakuumhaube zur mechanischen Verformung großflächiger Messobjekte; die Stauchung der ca. 10 mm nach unten herausragenden Dichtung beim Ziehen von Unterdruck kann durch Einstellung der drei Abstützfüße begrenzt werden. Auf diese Weise wird der Hub des Fensters auf das Messobjekt zu verhindert, um optische Einflüsse auf die Messung zu reduzieren. Verschiedene Dichtungen werden je nach Oberflächenrauheit und -unebenheit verwendet. Messfläche 300 mm x 200 mm, maximal zulässiger Unterdruck -1 bar.	174
Abbildung 6.11: Links, Luftstrom aus einer Luftpistole zeigt im Shearogramm einen langgezogenen Phasensprung aufgrund der Luftdichteänderung; die Pistole wurde hier nicht auf, sondern orthogonal zur Messobjektoberfläche gehalten, um ausschließlich die Luft zu beeinflussen. Mittig, Fehlstellenindikator für eine rückseitige Plansenkung (bis zur 2 mm starken Aluminium Deckplatte) mit einem Durchmesser von 30 mm, rechts für 10 mm bei 3,5 bar Druckluftanregung von oben im Abstand von ca. 100 mm; Belichtungszeit 0,8 Millisekunden; Messzeit 0,2 Sekunden.....	175
Abbildung 6.12: Wirbelrohr mit montiertem Druckluft- und Kaltluftanschluss; die Eingangsdruckluft (schwarzer Pfeil) wird im Inneren des Wirbelrohres in Rotation versetzt und in einen warmen (roter Pfeil) und einen kalten (blauer Pfeil) Ausgangsluftstrom mit einstellbarer Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit umgewandelt (s. auch [132]). Das Wirbelrohr wird als endoskopische Anregungseinheit am Interferoskop (Kapitel 5.2.b) verwendet.	176
Abbildung 6.13: Schematische Darstellung der grundlegenden drei Anregungsverfahren Burst, Dual-burst und periodische Anregung; die Grafiken zeigen jeweils den zeitlichen Verlauf der Anregungshöhe und die darauffolgende zeitliche Verformungsantwort. Die Verfahren dienen der Fehlstellenkontraststeigerung durch eine optimale Abstimmung der Belastungsdynamik auf die Fehlstellendynamik. Grafik abgeleitet aus ([24] S. 47, 48 und 52).....	178
Abbildung 6.14: Schematische Darstellung der Dynamik des globalen und anomalen Verformungsverlaufs bei Dual-Burst Anregung (s. auch Abbildung 6.13); nach einer gewissen Reaktionszeit nach der Anregung verformt sich der Bereich mit Fehlstelle anomal verglichen zum globalen Bereich. Der höchste Fehlstellenkontrast beim ersten Burst wird im Zeitintervall von der maximalen Verformungsanomalie bis zum kurz darauffolgenden Abklingzeitpunkt erreicht. Die so messbare Verformungshöhe der Anomalie zeigt der linke rote Pfeil, die dabei auftretende globale Verformungshöhe der grüne Pfeil (s. auch Abbildung 6.15 links). Mittels zweitem Burst wird der Fehlstellenkontrast gesteigert. Dabei wird die globale Verformung durch abermalige Messobjektbelastung auf den Wert zum Zeitpunkt der ersten Bildaufnahme angehoben und dadurch eliminiert (s. auch Abbildung 6.15 rechts). Die anomale Verformung hat sich in dieser kurzen Zeit nach der zweiten Anregung noch nicht ausgebildet, sodass sie weiterhin mit einer leicht geringeren Verformungshöhe gemessen wird, s. roter Pfeil rechts. Grafik abgeleitet aus ([24] S. 48).....	179
Abbildung 6.15: Shearogramm und demoduliertes Verformungsergebnis für die Prüfplatte nach Kapitel 2.5.e, links mit Burst, rechts mit Dual-burst Anregung; durch letzteres werden globale Verformungseinflüsse eliminiert, was Rauschen bzw. Verformungsdekorrelation verringert und das SNR der Fehlstellenindikatoren erhöht.....	180
Abbildung 6.16: Zeitmittelungserfassung einer schwingenden Platte mit horizontal verlaufendem Riss (s. roter Pfeil), links mit klassischer Differenzbilddauswertung (Kontrast um einen Faktor von 5 gesteigert), rechts mit unmittelbarer SPS Differenzphasenberechnung; mit SPS ist die Risslänge aufgrund des Grauwertsprungs von weiß nach grau eindeutig feststellbar.....	181

Abbildung 6.17: Abbildung zum Ablauf bei der Lock-in Shearografie von Menner ([24] S. 52); eine sinusförmige Anregung (I) führt zur entsprechenden sinusförmigen, thermischen Belastung (ΔT) eines Messobjektes, wodurch eine stark Anregungsfrequenz-abhängige (f) Verformung (ΔA) eintritt. Über die Belastungsperiode werden viele Shearogramme erfasst und anschließend die entsprechenden demodulierten Verformungsergebnisse berechnet. Der zeitliche Verformungswert je Pixel wird Fourier-analysiert, nach der Lock-in Frequenz gefiltert, rücktransformiert und ein zusammengesetztes Amplituden- und Phasenbild berechnet, welches Rückschlüsse auf die Fehlstellenstatik und -dynamik mit hohem Kontrast zulässt. 183

Abbildung 7.1: Doppelseitiges Klebeband für den Kfz-Bereich, einseitig auf ein Aluminiumblech appliziert und noch mit rotem Schutz-Liner versehen, um eine Kontamination der Klebefläche zu vermeiden; es wurde eine künstliche Druckstelle verursacht, wie sie bei der Bandablage mit zu geringem Ablegespalt für unebene Bauteile vorkommt. Diese vermindert die Haftung zwischen den verklebten Bauteilen. 188

Abbildung 7.2: CFK Bauteil aus Prepreg mit den Kastenmaßen von ca. 300 mm x 150 mm x 30 mm und einer Wandstärke von ca. 0,5 mm, gefertigt von der Firma Cotesa GmbH für den studentischen Wettbewerb im Rahmen des 11. internationalen Symposiums für ZfP in der Luft- und Raumfahrt 2019; das Bauteil ist mit unterschiedlichen Fehlstellen versehen. Die Vorderseite ist glänzend, die Rückseite stark glänzend. Die fehlstellenbehaftete Unterkante (und linke Kante, nicht dargestellt) wird bei der vorderflächigen shearografischen Prüfung mittels Spiegel in die Prüfrichtung reflektiert. 191

Abbildung 7.3: Zusammengesetztes Ergebnis aus Shearogrammen, welche in einem ca. 20 s Messvorgang bei thermischer Dual-burst Belastung mittels 500 W Halogenstrahler erfasst werden; zur Maximierung des Fehlstellenkontrasts für die unterschiedlichen Fehlstellen werden vorderseitig 3 Shearogramme zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Dual-burst Belastung erfasst. Die Shearogramme am unteren Bauteilrand (unten) und am linken Bauteilrand (links) werden mithilfe von zwei Spiegeln orthogonal zur Vorderseite reflektiert und vermessen..... 192

Abbildung 7.4: (Links) 260 mm x 250 mm NFK Laminatplatte mit einer Dicke von 2 mm; die beiden angeklebten Versteifungen an den Ecken rechtsseitig haben keinen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse. Der Messbereich ist weiß markiert. Mittig ist ein fast geschlossener Riss mit einer Länge von 40 mm (rot gekennzeichnet) eingebracht. (Oben rechts) erfasstes Thermogramm für eine Abkühlzeit von 40 Sekunden nach einem 15 Sekunden Anregungsburst mit zwei 500 W Halogenstrahlern; neben dem Rissindikator zeigt sich eine horizontal verlaufende Anomalie durch die starke Abkühlung, welche vermutlich auf Fertigungstoleranzen zurückzuführen ist. Der schwarz gestrichelte Bereich wird (unten rechts) über die Breite dargestellt. Die globale Abkühlung ist, neben dem Rissindikator, eher inhomogen, was die Aussagesicherheit zur Fehlstelle unsicher macht. 194

Abbildung 7.5: Zeitmittelungsshearogramme der NFK Platte nach Abbildung 7.4 links (gleicher Messbereich wie bei der thermografischen Untersuchung) unter akustischer Anregung; es können acht Moden bis 570 Hz gefunden werden. Mit Shear in x-Richtung wird der Rissindikator durch einen lokalen Grauwertsprung sichtbar, rot umkreist. Mit Shear in y-Richtung ist die Evaluation des Indikators (rot gestrichelt umkreist) schwieriger. Shear-y-Mode 8 deutet darauf hin, dass die Bereiche um die Risspitzen in Schwingung geraten. 195

Abbildung 7.6: Zeitaufgelöste Shearogramme für vier ausgewählte Moden im Vergleich zu den Zeitmittelungsshearogrammen aus Abbildung 7.5; durch die Belichtungszeit von nur 1 Millisekunde können höhere Phasenordnungen noch bis 110 Hz Anregungsfrequenz ausgewertet werden. Darüber hinaus tritt lokales Rauschen auf. Die Zeitauflösung lässt eine gewöhnliche Demodulation zur Evaluation des Risses zu. Für die Moden 1 bis 6 ergibt sich ein Indikator, welcher aussagekräftiger als der thermografisch erfassbare ist, vgl. Abbildung 7.4 unten rechts..... 196

Abbildung 7.7: (Oben) Specklebildaufnahme einer 1400 mm breiten, 1220 mm hohen und 10 mm dicken Waben-Komposit Platte, welche mittels MZ Messgerät mit 4f Modul untersucht wird; durch die geringe Objektiv-Brennweite treten Verzerrungen bei der Abbildung der rechteckigen Platte auf. Bei der Beaufschlagung einer mechanischen Belastung mittels 20 g Gewicht an verschiedenen Positionen (mit „X“ markiert) fallen insgesamt zwei Fehlstellenindikatoren „1“ und „2“ auf, s. mittlere und untere Zeile, gelb markiert. Aufgrund von Verkippungen der eben aufliegenden, leicht tordierten Platte bei der Belastung kommt es zum Verrauschen der Randbereiche..... 198

Abbildung 7.8: Aus acht Messungen zusammengestelltes Shearogramm der Platte nach Abbildung 7.7 oben; die Messflächen betragen ca. 450 mm x 400 mm, jeweils ohne Überlappungsbereich. Durch die höhere laterale Auflösung zeigen sich nun vier Anomalien (grün markiert) aufgrund von Bohrungen in der Platte, welche von der Fehlstellen-Prüfung ausgeschlossen werden müssen. Darüber hinaus zeigen sich 3 weitere Anomalien (gelb markiert), die weiter untersucht werden. 200

Abbildung 7.9: Zusammengestelltes Verformungsergebnis aus dem Shearogramm nach Abbildung 7.8; es werden zwei weitere Fehlstellenindikatoren „3“ und „4“ definiert (gelb markiert). Die Position der Indikatoren „1“ und „2“ wird dargestellt (gelb gestrichelt). Indikator „1“ ist aufgrund von Rauschen in den Überlappungsbereichen nicht detektierbar. Indikator „2“ zeigt keinen Ausschlag aufgrund der gewählten Belastungsposition zugunsten der Sichtbarkeit von Indikator „4“. 200

Abbildung 7.10: Nachmessungen mit einer kleinen Messfläche von ca. 400 mm x 250 mm für die vier Bereiche mit Fehlstellenindikator aus Abbildung 7.7 und Abbildung 7.9, Shearogramme links, Verformungsergebnisse rechts; die Indikatoren „1“ und „2“ können bestätigt werden. Der Indikator „3“ ist nicht detektierbar. Hier wird ein Messfehler vermutet. Der Indikator „4“ zeigt für die kleinere Messfläche ein komplexes Verformungsbild, welches auf einen größeren Schaden vermuten lässt (rot gestrichelt markiert). Als Fehlstellen in der Platte werden Schlagschäden vermutet. 201

Abbildung 7.11: Eine 83 mm hohe, 55 mm breite und 4 mm dicke Aluminiumstrebe (oben links) wird an der Bohrung oben links mittels Schraube geklemmt und in der Bohrung unten mittels Gewichtskraft belastet. Für eine vertikale Beleuchtungssituation mit zwei Lasern ergeben sich zwei Shearogramme (oben mittig, roter Laser; oben rechts, blauer Laser). Unterhalb der Bohrung oben links und rechtsseitig am Mittelsteg sind erhöhte Streifenkonzentrationen feststellbar. In diesem Bereich weist das Messobjekt einen Bruch auf, vgl. mit Abbildung oben links. Das oop Verformungsergebnis (unten links) zeigt eine starke Biegungsänderung im Bereich der höheren Streifenkonzentration. Das ip Verformungsergebnis (unten rechts) zeigt ausschließlich für die Bereiche mit höherer Streifenkonzentration eine Dehnung und ist damit aussagekräftiger bzgl. der Fehlstellenanzeige. 204

Abbildung 7.12: Ein Keramikbecher mit einer Wandstärke von 5 mm weist in einem Messbereich von ca. 35 mm x 55 mm (oben links) Risse auf. Der Becher wird von innen mittels Heißluftfön für 2 Sekunden belastet. Anschließend wird die Verformung für 2 Sekunden shearografisch erfasst. Für eine horizontale Beleuchtungssituation mit zwei Lasern ergeben sich zwei Shearogramme (oben mittig, roter Laser; oben rechts, grüner Laser). Es zeigen sich jeweils globale und lokale Phasensprünge sowie linienförmige Bereiche mit höherer Phasenänderung. Das oop Verformungsergebnis (unten links) zeigt starke, kontinuierliche Verformungsänderungen im unteren Bereich der Messfläche. Das ip Verformungsergebnis (unten rechts) zeigt sprunghafte Verformungsänderungen über die gesamte Messfläche, welche sehr stark mit den Rissverläufen im Messobjekt korrelieren, vgl. mit Abbildung oben links. Es ist damit aussagekräftiger bzgl. der Fehlstellenanzeige. 206

Abbildung 7.13: (Oben links) Holzscheibe mit vier radial verlaufenden Rissen und einer Aufklaffung wird unter thermischer Belastung shearografisch geprüft; (oben rechts) oop Shearogramm mit Shear in x-Richtung zeigt die eher horizontal verlaufenden Rissindikatoren (rot markiert) nur schwach an; (unten links) oop Shearogramm mit Shear in y-Richtung zeigt den vertikal verlaufenden Rissindikator nur schwach an; (unten rechts) die Ergebnisaddition, welche mit dual-shear in nur einem Messvorgang erreichbar ist, ergibt ein Verformungsbild, in dem alle Rissindikatoren eindeutig erkennbar sind. 207

Abbildung 7.14: (Oben links) beschichtete Glasplatte mit komplexem Bruchverlauf wird unter thermischer Belastung shearografisch geprüft; (oben rechts) oop Shearogramm mit Shear in x-Richtung zeigt den horizontal verlaufenden Anteil des Bruchindikators (rot markiert) nur schwach an; (unten links) oop Shearogramm mit Shear in y-Richtung zeigt die vertikal verlaufenden Anteile des Bruchindikators nur schwach an; (unten rechts) die Ergebnisaddition, welche mit dual-shear in nur einem Messvorgang erreichbar ist, ergibt ein Verformungsbild, in dem der gesamte Bruchindikator eindeutig erkennbar ist. 208

Abbildung 7.15: Darstellung zum Rissindikator im oop Shearogramm für die Holzscheibe nach Abbildung 7.13 (links) und zum Bruchindikator für die Glasplatte nach Abbildung 7.14 (rechts). Durch die Vershearung wird der Riss bzw. Bruch verdoppelt durch zwei Linien dargestellt, welche den Abstand des Shearbetrags zueinander aufweisen. Der Riss im Holz verursacht an den beiden Linien eine kontinuierliche negative und positive Phasenwertänderung um den globalen Phasenwert. Der Bruch im Glas verursacht zwischen den beiden Linien eine sprunghafte Phasenwertänderung gegenüber dem globalen Phasenwert. 209

Abbildung 7.16: Mit Glasfaserbündeln umwickelter COPV mit einer Höhe von 340 mm, einem Durchmesser von 190 mm und einem Öffnungsdurchmesser von 70 mm; das Innenteil aus Kunststoff besitzt eine Wandstärke von ca. 10 mm, während die Umwicklungsdicke ca. 5 mm beträgt. 210

Abbildung 7.17: (Links) shearografische Prüfung der Außenfläche des COPVs mit thermischer Belastung zeigt eine Anomalie (rot markiert); diese kann durch eine Innenmessung mit IFK (rechts) bestätigt werden. Die Shearogramm-Ränder sind dabei verrauscht, vor allem da das Innenteil aus leicht transparentem Material besteht. 211

Abbildung 7.18: Vermessung der Fügestelle am Boden des COPVs (links) mittels IFK ergibt ein Shearogramm mit hohem Phasenkontrast (rechts); die lokale Verformung der Fügestelle ist erkennbar. Die komplexe Verformung des Bodens wird nicht weiter diskutiert. 212

Abbildung 7.19: (Oben mittig) CAD-Modell des 3D-gedruckten Behälters aus PLA-Kunststoff mit einer Höhe von 165 mm, einem Durchmesser von 125 mm, einem Öffnungsdurchmesser von 60 mm und einer Wandstärke von 3 mm, Halbschnitt-Ansicht; mittig in die Wandung werden künstliche Fehlstellen in Form von 1 mm hohen Zylindern mit unterschiedlichen Positionen und Durchmessern D eingebracht. Die Innenprüfung mittels IFK liefert eine gute Ergebnisqualität mit wenig Rauschen an den Shearogramm-Rändern. Alle Indikatoren können detektiert werden. Der Indikator für die Fehlstelle mit dem Durchmesser D = 5 mm (rechts) ist nur schwach ausgeprägt. Dies ist auf die reduzierte Anregungsleistung aufgrund der noch provisorischen 90° Umlenkung des Anregungsrohres zurückzuführen.....	213
Abbildung 7.20: Schermesser eines elektrischen Rasierers im Größenvergleich zu einer Büroklammer; das filigrane Bauteil hat eine Länge von 30 mm, eine Breite von 6 mm und eine Höhe von 10 mm. Die 28 Stege haben eine Länge von ca. 9 mm und eine Breite und Dicke von ca. 0,3 mm.....	214
Abbildung 7.21: Druckbelastung eines filigranen Rasierer-Schermessers bei der Vermessung mit dem MFK 2 (oben links) ergibt das Hologramm (oben rechts), mithilfe dessen die Intaktheit der vier nummerierten Stege geprüft wird; je Steg wird ein zugeschnittenes Hologramm maskiert (mittig links), demoduliert (mittig rechts) und der Verformungsverlauf auf der xz-Ebene dargestellt (unten). Die inhomogene Streifenkonzentration bzw. der nicht-lineare Verformungsverlauf von Steg 1 deuten auf einen Bruch des Stegs hin.	214
Abbildung 7.22: Schaftfräser aus Werkzeugstahl mit einem Durchmesser von 25 mm; drei der zehn Schneiden wurden stirnseitig rot markiert, da sich visuell Indikatoren für Risse abzeichnen. Zur holografischen Prüfung muss die metallisch-glänzende Oberfläche weiß-matt beschichtet werden.	215
Abbildung 7.23: (Oben) mikroskopische Bildaufnahme zweier unbeschichteter Schaftfräser-Schneiden unter Weißlicht-Ringbeleuchtung und Laserbeleuchtung mittels MFK 2 oop Modul; die Speckles sind auch in der Fläche zwischen den beiden Schneiden schwach sichtbar, wo es mit dem Ringlicht geometriebedingt zu Abschattungen kommt. Die Bildaufnahme zeigt je Schneide einen Rissindikator (rot umkreist). (Die Linien weiter oben an den Schneiden, grün umkreist, resultieren aus der roten Farbmarkierung, s. Abbildung 7.22 oben.) (Mittig) das Hologramm der Werkzeugverformung unter thermischer Belastung mit umschließender Induktionsspule bestätigt den linken Indikator. (Unten) die demodulierte Verformung zeigt hier einen 70 nm Sprung bei einem SNR von 2.	216
Abbildung 8.1: Schematische Darstellung des Prüfablaufs mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Automatisierungssoftware, basierend auf OPTIS 4; wird ein Prüfobjekt vor dem Messgerät positioniert (schwarzer Pfeil links), löst das Trigger Modul den weiteren Ablauf aus. Das Prüfobjekt wird durch das Detect Modul erkannt und voreingestellte Evaluationsparameter eingerichtet. Anschließend erfolgt die Messung und die automatische Evaluation mittels Measure Modul und Decide Modul. Das Statistics Modul sammelt die Daten über den Prüfungsfortschritt und die Dauerschleife („Loop“) beginnt von vorne, während das Prüfobjekt weitergeführt wird (schwarzer Pfeil rechts).....	218
Abbildung 8.2: Echtzeitanzeige des Prüfablaufs mit der Automatisierungssoftware; das Verformungsbild kann mittels Bildverarbeitungswerkzeugen weiter analysiert (punktuelle oder linienhafte Verformungswerte usw.) und die Anzeige angepasst werden (Zoom, Farbskala usw.). Die Statistik kann durch Registerkarten hin zu spezifischen Grenzwertüberschreitungen bei der Prüfung umgeschaltet werden.....	220

Abbildung 8.3: Die 18 POM Kunststoffplatten (je 50 mm x 50 mm x 10 mm), welche rückseitig mit diversen künstlichen Fehlstellen versehen wurden, um einen shearografischen Datensatz mit typischen Indikatoren für die Entwicklung der automatischen Evaluationsalgorithmen zu erzeugen. Geometrische Details finden sich in Tabelle 8.1.	221
Abbildung 8.4: Die sechs Bildverarbeitungsschritte des entwickelten MinMaxRoiMatching Evaluationsalgorithmus vom demodulierten Verformungsergebnis (oben links) bis zur Anzeige des fehlstellenbehafteten Bereichs (unten rechts). Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].	223
Abbildung 8.5: Der künstliche Phasenverschiebungsvorgang des entwickelten StDShift Evaluationsalgorithmus in acht Schritten vom gemessenen Shearogramm (oben links) zum fast vollständig um eine Phase verschobenen Shearogramm (unten rechts). Blau angezeigt werden lokale Bereiche mit einer Grenzwertüberschreitung der Standardabweichung, typischerweise im Bereich von Phasensprüngen. Die Phasenverschiebung verursacht in Bereichen mit lokalen Phasensprüngen (oftmals Fehlstellenindikatoren) keine örtliche Wanderung der blauen Bereiche, wodurch diese separiert werden können. Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].	224
Abbildung 8.6: Der künstliche Phasenverschiebungsvorgang des entwickelten GradShift Evaluationsalgorithmus in drei Schritten (oben links nach oben rechts, s. auch StDShift Abbildung 8.5) und der jeweilige lokale Gradient des Shearogramms (untere Zeile). Er wird je Bildwert in maximal einem der Gradientenbilder durch einen Phasensprung verfälscht. Auf diese Weise kann ein unverfälschtes Gradientenbild erzeugt werden, s. Abbildung 8.7. Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].	225
Abbildung 8.7: (Oben links) unverfälschtes Gradientenbild des Shearogramms, s. auch Abbildung 8.6; dieses kann analog zum MinMaxRoiMatching (s. Abbildung 8.4) (von oben mittig nach unten rechts) mittels Grenzwertbetrachtung, OpenOperation, BlobDetection und BlobMatching evaluiert werden. Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].	226
Abbildung 8.8: (Obere Zeile) diverse Shearogramme mit von links nach rechts zunehmendem Dekorrelationsanteil; (untere Zeile) jeweiliges Gradientenbild mit Dekorrelationsanzeige (blau), ausgewertet mithilfe des entwickelten GradShiftDekor Algorithmus (s. auch GradShift Algorithmus, Abbildung 8.7); für Fehlstellenindikatoren (linke Spalte) und Dekorrelationen (mittige und rechte Spalte) ergeben sich lokale Bereiche mit erhöhter Standardabweichung (Grenzüberschreitung blau markiert). Ist der prozentuale Flächenanteil der grenzüberschreitenden Standardabweichung zu hoch (untere Zeile, kontinuierlicher Übergang von links nach rechts), wird das Bild verworfen und nicht evaluiert. Details s. Text oberhalb dieser Abbildung oder s. Originalveröffentlichung [153].	229
Abbildung 8.9: [71] (Oben links) verkleidetes Modell des Leichtbaufahrzeugs proTRon EVOLUTION; (oben rechts) halbttransparente CAD-Ansicht mit hervorgehobenem Monocoque im Fahrzeug; (unten) das NFK Monocoque mit Fahrwerkskomponenten als „Rolling Chassis“.	230
Abbildung 8.10: Prüfung des NFK Monocoques mittels Messkopf an einem Roboterarm; der Messkopf besteht aus dem MZ Messgerät, einer Thermografiekamera und zwei Halogenstrahlern. Von fast allen Seiten können unterschiedliche thermografische und shearografische Prüfungen mit Halogenstrahler- und Vakuumhauben-Anregung durchgeführt werden. Am Rollentisch wird der Robotercontroller und der Messrechner mit OPTIS 4 bedient.	231

Abbildung 8.11: Prüfung des Laminat-powerRibs™ 185-Verbunds der Dachstruktur mittels thermischer Anregung und Prüfung des ca. 21 mm dicken Dachholms mittels Vakuumhaube; der Messkopf, bestehend aus dem MZ Messgerät, einer Thermografiekamera und zwei Halogenstrahlern, wird dabei an einem Stativ installiert (hier nur schematisch angedeutet). (Unten rechts) beispielhaftes dual-shear Verformungsbild des Laminat-powerRibs™ 185-Verbunds.	232
Abbildung 8.12: Automatische Datenerfassung der ca. 950 mm x 750 mm großen Seitenwand hinten links mit robotergeführtem Messkopf; der Messkopf besteht aus dem MZ Messgerät, einer Thermografiekamera und zwei Halogenstrahlern. 70 Positionen mit überlappenden Prüfflächen werden mittels einprogrammiertem Verfahrensweg abgefahren und in jeweils ca. 2,5 Sekunden geprüft. Die Gesamtprüfdauer beträgt ca. 3 Minuten. Aus der Evaluation ergeben sich 4 Indikatoren (rot markiert), welche näher untersucht werden müssen.....	233
Abbildung 8.13: Automatische Innenprüfung eines COPV mittels robotergeführtem IFK; mit dem 90° Endoskop werden 12 Prüfpositionen angefahren, wodurch die gesamte Mantelinnenfläche erfasst wird. Die Gesamtprüfdauer beträgt knapp 1,5 Minuten. Weitere Informationen finden sich in Kapitel 7.3.e.....	235
Abbildung 8.14: Vier gleiche Spritzguss Kfz-Türgriffe mit einer Länge von ca. 200 mm; Firmenlogos etc. wurden durch schwarze Rechtecke unkenntlich gemacht. Die Griffe weisen komplizierte Geometrien auf, welche bei einer thermischen Belastung zu komplexen Verformungen führen, vor allem für den Bereich mit rückseitig angebundenem Steg (s. Detailansicht links).	236
Abbildung 8.15: Shearogramme (S) und demodulierte Verzerrungsbilder (V) beim Abkühlen der Türgriffe (Abbildung 8.14) nach einem optischen Anregungsburst; aufgrund der komplexen Bauteilgeometrien ergeben sich ausgeprägte Verzerrungen. Infolgedessen kann nicht unmittelbar auf Fehlstellen geschlossen werden (weitere Analyse s. Abbildung 8.16). S2 und S3 sind annähernd gleich. Die Abweichungen von S1 und S4 zu ihnen wurden gelb markiert. V4 zeigt eine annähernd homogene, geringe Verzerrung.	237
Abbildung 8.16: Ursprüngliche Shearogramme S1 bis S4 aus Abbildung 8.15 (Hauptdiagonalelemente) und die jeweils aus zweien gebildeten Differenz-Shearogramme (Nebendiagonalelemente); S1, S2 und S3 sind sich sehr ähnlich, da die entsprechenden Differenzen keine höherwertigen Phasensprünge zeigen. S1, S2 und S3 können als „Gutteil-Shearogramme“ betrachtet werden. Werden die Differenzen mit S4 gebildet, ergeben sich Differenz-Shearogramme mit typischen Indikatoren (rot markiert) für fehlstellenbehaftete Bereiche. Auf diese Weise ist, im Gegensatz zum ursprünglichen Shearogramm S4, eine einfache automatische Evaluation möglich.....	239
Abbildung 8.17: Ursprüngliche Verzerrungsbilder V1 bis V4 aus Abbildung 8.15 (Hauptdiagonalelemente) und die jeweils aus zweien gebildeten Differenz-Verzerrungsbilder (Nebendiagonalelemente); V1, V2 und V3 sind sich sehr ähnlich, da die Verzerrungsabweichungen der entsprechenden Differenzen klein sind. V1, V2 und V3 können als „Gutteil-Verzerrung“ betrachtet werden. Werden die Differenzen mit V4 gebildet, ergeben sich Differenz-Verzerrungsbilder mit höhere Verzerrungsabweichungen (rot markiert) für fehlstellenbehaftete Bereiche. Auf diese Weise ist, im Gegensatz zum ursprünglichen Verzerrungsbild V4, eine einfache automatische Evaluation möglich.	240

Abbildung 18: Schematische Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse aus Kapitel 7: Die Shearografie ist für diverse Prüfungen an Schaum-, Gummi- und GFK-Bauteilen geeignet, während die Thermografie unter gleichen Prüfbedingungen nicht geeignet ist. Die Thermografie ist für diverse Prüfungen an metallischen Bauteilen besser geeignet. Die Besonderheit der Shearografie ist die mechanische Anregung, mit der Gummi- und Aluminiumbauteile sehr gut geprüft werden können.

..... 243

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Qualitative Bewertung der modernen ZfP-Verfahren nach dem aktuellen Stand für die zukünftigen Anforderungen der Automobilindustrie im Bereich des Leichtbaus.....	8
Tabelle 2.1: Maßnahmen gegen Verformungsdekorrelation, bewertet für die Anwendung bei der shearografischen Prüfung.	68
Tabelle 2.2: Störende Einflussgrößen bei der shearografischen Prüfung und Maßnahmen, diesen entgegenzuwirken.	71
Tabelle 5.1: Technische Daten des entwickelten MZ Messgeräts mit Unterscheidung der verschiedenen Messmethoden, die eingerichtet werden können.	138
Tabelle 5.2: Technische Daten des weiterentwickelten IFK 5.2.....	143
Tabelle 5.3: Technische Daten des weiterentwickelten MFK 2 mit Unterscheidung der verschiedenen Messmethoden, die eingerichtet werden können.....	149
Tabelle 5.4: Technische Daten des entwickelten Steuergeräts für die digitale Anregungs- und Beleuchtungssteuerung beim Messvorgang mit OPTIS 4.	152
Tabelle 5.5: Ablauf des Messvorgangs bei der Verwendung von OPTIS 4 für optisch-interferometrische SPS Messungen und chronologische Auflistung der wichtigsten Schritte bzw. Funktionen.....	154
Tabelle 6.1: Typische Fehlstellenarten für einige Bauteilarten, welche mittels shearografischer Prüfung unter der angegebenen Belastungsart gefunden werden können; zusammengestellt aus ([64] Teil 5) und ([65] Teil 3.6).	158
Tabelle 6.2: Grenzwerte für die Dimension und Position von Fehlstellen für eine typische shearografische Detektion.	168
Tabelle 6.3: Einheiten nach Anregungsart für die Messobjektbelastung bei der optischen Interferometrie; die Einheiten werden nach 4 Kriterien bzgl. einer automatisierten Prüfung bewertet. Fettgedruckt sind die Einheiten mit den besten Eigenschaften.	170
Tabelle 6.4: Technische Daten der entwickelten Anregungseinheiten.....	177
Tabelle 6.5: Zuordnung der Anregungsverfahren, welche mit den Anregungseinheiten durchführbar sind, unterteilt in mechanische und thermische Belastung:.....	184
Tabelle 7.1: Bewertung der Detektion von Fehlstellenarten für die Materialien und Bauteile, welche innerhalb dieser Arbeit shearografisch mit mechanischer und thermischer und thermografisch mit thermischer Belastung geprüft wurden; zur Orientierung: die Steifigkeit der Materialien und Bauteile nimmt von oben nach unten überschlägig zu.	186
Tabelle 7.2: Messergebnisse der shearografischen und thermografischen Prüfung von einseitig appliziertem Acrylschaumklebeband mit verschiedenen Anregungseinheiten (X: kein Indikator feststellbar); die Prüflänge beträgt 150 mm, von denen ca. 40 mm gezeigt werden. Die Bandhöhe beträgt ca. 1 mm, die Breite 10 mm.	189
Tabelle 8.1: Geometrische Angaben zu den künstlichen Fehlstellen in den 18 POM Kunststoffplatten, s. Abbildung 8.3.	222

Tabelle 8.2: Bewertungskriterien für die Qualität einer Evaluation nach [80]; problematisch sind falsch klassifizierte Teile, wobei „Pseudo“ die Produktionskosten steigert, „Schlupf“ jedoch ein Risiko des Bauteilversagens beim Kunden mit sich bringt. 227

Tabelle 8.3: Klassifikationsergebnisse und Evaluationsdauer der drei entwickelten Algorithmen für Bilder mit gut und schlecht sichtbarem Fehlstellenindikator (die Algorithmen wurden bisher nicht hinsichtlich ihrer zeitlichen Leistung optimiert); während MinMaxRoiMatching und GradShift kein Pseudo verursachen, ist der Schlupf mit GradShift am geringsten, die Evaluationsdauer jedoch am höchsten (Begriffe s. Tabelle 8.2). StDShift liefert die geringste Evaluationsqualität, arbeitet jedoch am schnellsten. Details s. Originalveröffentlichung [153]. 227

Tabelle 8.4: Klassifikationsergebnisse und Evaluationsdauer der drei entwickelten Algorithmen für Bilder mit gut sichtbarem Fehlstellenindikator (die Algorithmen wurden bisher nicht hinsichtlich ihrer zeitlichen Leistung optimiert); MinMaxRoiMatching liefert perfekte Ergebnisse, während StDShift schneller arbeitet, jedoch Pseudo verursacht (Begriffe s. Tabelle 8.2). GradShift ist für diese Anwendung nicht optimal. Details s. Originalveröffentlichung [153]. 228

Relevante Veröffentlichungen des Autors, chronologisch

M. Schuth, C. Petry, P. Braschel und M. Gietzen, „Weiterentwicklung und Optimierung des Interferoskops 4.0,“ Hochschule Trier: Lehre und Forschung 2016, pp. 61 - 63, 25.01.2018.

M. Schuth und C. Petry, „Präsentation: CAE/Projektmanagement in der Industrie 4.0 am Beispiel optische Serienüberwachung,“ Interdisziplinäre Ringvorlesung zu Karl Marx, Trier, 12.06.2018.

C. Petry, „Präsentation: Shearographic Turbine Blade NDT with the new Interferoskop 5.0,“ LZfPQ Seminar, Saarbrücken, Universität, 18.10.2018.

C. Petry, „Präsentation: Spatial Phase Shift Shearography for Enhanced NDT,“ International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing (SHM-NDT 2018), Saarbrücken, 2018.

C. Petry und M. Schuth, „Spatial Phase Shift Shearography for Enhanced NDT,“ International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing (SHM-NDT 2018), <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=23534>, 2018.

C. Petry, „Präsentation: Multi-Wavelengths Michelson Interferometer Based Spatial Phase Shift Shearography with Color Camera,“ SAE International, WCX Congress, Detroit, Michigan, USA, 09.04.2019.

C. Petry und M. Schuth, „Multi-Wavelengths Michelson Interferometer Based Spatial Phase Shift Shearography with Color Camera,“ SAE International, WCX SAE World Congress Experience, doi:10.4271/2019-01-1269, 2019.

C. Petry, J. Petry, L. Petry und M. Schuth, „Mikroferoskop - Verformungsanalyse in Echtzeit bei der Dichtringkontrolle,“ TeDo Verlag GmbH, Zeitschrift - inVision 3, Juni 2019; S. 70 - 71, 2019.

L. Petry, J. Petry, C. Petry und M. Schuth, „Dichtring-Qualitätskontrolle mit einem industrietauglichen Mikroferoskop,“ Laser Magazin, Magazin Verlag Publications KG, pp. 21 - 23, September 2019.

C. Petry, J. Petry, L. Petry und M. Schuth, „Simpler Aufbau, hohe Messgenauigkeit - optische Kontrolle von Gummidichtringen mit dem Mikroferoskop,“ HANSER, Deutsche Gesellschaft für Qualität e. V., QZ Zeitschrift, Ausgabe 1/2020, 1/2020.

C. Petry, „Präsentation Forschungsprojekt: Shearografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren moderner Werkstoffe in der automatisierten Serienüberwachung,“ Promotionstag, Hochschule Trier, 03.09.2019.

C. Petry, „Präsentation: Endoscopic spatial phase shift shearography with the Interferoskop for turbine blade flaw inspection,“ 11th International Symposium on NDT in Aerospace, Paris-Saclay, France (AeroNDT 2019), COFREND, 13.11.2019.

C. Petry und M. Schuth, „Endoscopic spatial phase shift shearography with the Interferoskop for turbine blade flaw inspection,“ 11th International Symposium on NDT in Aerospace, Paris-Saclay, France (AeroNDT 2019), <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=25065>, 15.11.2019.

C. Petry, M. Schuth und M. Spies, „Grid Aperture for Increased Light Intensity and Eliminated Shading For Spatial-Phase-Shift Shearography with Carrier Frequency,“ CINDE Journal, Vol. 41 No. 2 April/May/June 2020.

M. Schuth und C. Petry, „Vorrichtung zum optischen Messen einer Oberfläche“. Deutschland Patent Patent Nr. 10 2019 103 814, 02 07 2020.

C. Petry und M. Schuth, „Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau mit Virtuellem Doppelspalt für Shearografie mit räumlichem Phasenschieben bei variablem Shear,“ DGZfP e.V., Zfp heute - Wissenschaftliche Beiträge zur zerstörungsfreien Prüfung 2020, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=25485>, 2020.

A.-K. Bömkes, J. Plassmann, C. Petry und M. Schuth, „Anwendung der shearografischen Dehnungsmessung mit transientser Wärmeanregung zur zerstörungsfreien Prüfung für die Detektion von Rissen in faserverstärktem Kunststoff im Vergleich zur Thermografie,“ DGZfP Jahrestagung 2021, Osnabrück, <https://jahrestagung.dgzfp.de/portals/jt2021/bb176/inhalt/14.pdf>.

A. Hanf, C. Petry und M. Schuth, „Neue Bildverarbeitungsalgorithmen für die automatische Fehlstellendetektion bei der shearografischen Bauteilüberprüfung,“ DGZfP Jahrestagung 2021, Osnabrück, <https://jahrestagung.dgzfp.de/portals/jt2021/bb176/inhalt/p28.pdf>.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Geboren am 30.04.1990 in Traben-Trarbach

Arbeit & Promotion

Seit 01.10.2016

Assistent und wissenschaftlicher Mitarbeiter (BMW-gefördertes ZIM Projekt „Shearografie in der automatisierten Serienüberwachung“) im OGKB der Hochschule Trier

Masterarbeit

01.04.2016 - 30.09.2016

KÖHL Maschinenbau AG in Wecker, Luxemburg: Konzeptionierung von Bin Picking Applikationen (Abteilung: Robotic Systems)

Masterstudium

01.10.2014 - 30.09.2016

Hochschule Trier: Maschinenbau, Schwerpunkt Fahrzeugtechnik (Master of Engineering) (1,6)

Bachelorarbeit

03.2014 - 08.2014

Adam Opel AG in Rüsselsheim: Prüfstandsoptimierung (Abteilung: Structure Development Laboratories)

Bachelorstudium

09.2011 - 09.2014

Fachhochschule Bingen: Maschinenbau, Schwerpunkt Fahrzeugtechnik (Bachelor of Engineering) (1,9)

Praktika

02.2011 - 08.2011

Praktika bei Fischer Karosserie & Lack in Mainz, Lehmann Metallbau in Stackeden-Elsheim, Kfz-Werkstatt Harald Petry in Bremm und Gampper Armaturen in Alsenz

Bachelorstudium

04.2010 - 03.2011

Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Experimentalphysik

Zivildienst

05.2009 - 03.2010

DRK Sozialwerk Wittlich: Haus Felsenburg

Schulische Ausbildung

2000 - 2009

Cusanus-Gymnasium in Wittlich: Abitur (2,5)

Relevante Zertifikate

20.08.2020

Erfolgreiche Prüfung „Laserschutzbeauftragter gemäß § 5 OStrV, TROS Laserstrahlung und DGUV Grundsatz 303-005“

01.11.2019

Erfolgreiche Prüfung „NDT Shearography Training Level 1 & 2 according to EN 4179 / NAS 410“