

Reihe 8

Mess-,
Steuerungs- und
Regelungstechnik

Nr. 1270

Dipl.-Ing. (FH) Robert Kowarsch,
Clausthal-Zellerfeld

Heterodyne Laser- Interferometrie mittels phasengekoppelter Halbleiterlaser und Absorbanzmodulations- Nanoskopie für die Gigahertz- Schwingungsmesstechnik

Heterodyne Laser-Interferometrie mittels phasengekoppelter Halbleiterlaser und Absorbanzmodulations-Nanoskopie für die Gigahertz-Schwingungsmesstechnik

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) Robert Kowarsch
aus Ellwangen an der Jagst

genehmigt von der Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
27. August 2020

D 104

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr. rer. nat. Alfred Weber
Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. Christian Rembe
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. (FH) Robert Kowarsch,
Clausthal-Zellerfeld

Nr. 1270

Heterodyne Laser-
Interferometrie mittels
phasengekoppelter
Halbleiterlaser und
Absorbanzmodulations-
Nanoskopie für
die Gigahertz-
Schwingungsmesstechnik

VDI verlag

Kowarsch, Robert

Heterodyne Laser-Interferometrie mittels phasengekoppelter Halbleiterlaser und Absorbanzmodulations-Nanoskopie für die Gigahertz-Schwingungsmesstechnik

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1270. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

200 Seiten, 76 Bilder, 18 Tabellen.

ISBN 978-3-18-527008-6 ISSN 0178-9546,

€ 71,00/VDI-Mitgliederpreis € 63,90.

Für die Dokumentation: Optische Messtechnik – Lasermesstechnik – Laserinterferometrie – Vibrometrie – Schwingungsmesstechnik – optische Phasenregelschleife – Heterodynverfahren – Superresolution-Mikroskopie – Nanoskopie – Absorbanzmodulation

Die vorliegende Dissertation wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der optischen Schwingungsmesstechnik und hochauflösenden Mikroskopie (Nanoskopie). Sie befasst sich mit der Modellierung und Simulation von zwei zentralen Herausforderungen der Gerätetechnik der heterodynen Laser-Interferometrie für die Schwingungsmessung an Mikrosystemen bis zu 6 GHz. Zum einen wird die Auswirkung der Gigahertz-Trägererzeugung mittels phasengekoppelter Laser in einer optoelektronischen Phasenregelschleife auf die Auflösung für Schwingungsamplituden im Subpicometer-Bereich theoretisch untersucht und im Experiment demonstriert. Zum anderen wird mittels reversibel optisch schaltbarer Absorbanz in einer photochromen Dünnschicht ein Verfahren zur örtlichen Hochauflösung jenseits der Beugungsgrenze für die Reflexionsmikroskopie untersucht. Anhand der Erkenntnisse werden Näherungsformeln sowie Hinweise für die Anwendung gegeben.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

D 104

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-527008-6

Danksagungen

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Messtechnik-Lehrstuhl des Instituts für Elektrische Informationstechnik der Technischen Universität Clausthal. In dieser Zeit hatte ich die Ehre und Freude mit einer Vielzahl von ausgezeichneten Forschern und Menschen zusammenzuarbeiten, ohne deren Inspiration, deren Diskussionsfreude und Freundschaft das Vorhaben zur Promotion weitaus weniger angenehm und zielführend gewesen wäre.

Einen besonderen Dank dabei gilt dem Institutsdirektor und Lehrstuhlinhaber der Messtechnik Prof. Dr.-Ing. Christian Rembe, dass er mir die Möglichkeit und das Vertrauen gab Teil seiner Arbeitsgruppe zu werden. Er hat meine Arbeit durch seine weitreichende Erfahrung mit wertvollen Impulsen und stets neuer Inspiration betreut, dabei gab er mir stets den Freiraum mich selbst sowohl persönlich als auch fachlich weiterzuentwickeln. Zudem danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer von der Universität Bremen für die Übernahme des Korreferats.

Erst der Diskurs und die Zusammenarbeit mit vielen Wissenschaftlern hat diese interdisziplinäre Arbeit reifen lassen. Für die enge Zusammenarbeit bei unserer Initiative zum DFG-Projekt ‚NanoVidere‘ danke ich Dr. Claudia Geisler und Prof. Dr. Alexander Egner vom Institut für Nanophotonik Göttingen. Für die tiefen Einblicke in die Photochemie und -physik danke ich Prof. Dr. Andreas Schmidt vom Institut für Organische Chemie sowie Prof. Dr. Jörg Adams vom Institut für Physikalische Chemie und für die Diskussionen über Beschichtungstechnik Prof. Dr. Wolfgang Maus-Friedrichs und Prof. Dr. Sebastian Dahle. Mein Dank für die Messungen an Schwingquarz-Mikrowaagen gilt der Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Diethelm Johannsmann, besonders Frederick Meyer. Ein weiterer herzlicher Dank gilt Prof. Dr. Hyuck Choo und Dr. Hyunjun Cho vom Caltech, die ich mit Messungen an seinen Energy-Harvester für Stimmanregung unterstützten durfte, auch für die Gastfreundschaft bei meinem Besuch in Pasadena.

Für die das freundschaftliche Miteinander und die konstruktive Zusammenarbeit danke ich allen Wissenschaftlern am Institut für Elektrische Informationstechnik, insbesondere Dr.-Ing. Georg Bauer und den Mitstreitern der ersten Stunde Xiaodong Cao und Laura Mignanelli. Des Weiteren danke ich den Institutswerkstätten für die unkomplizierte Zusammenarbeit bei der Erstellung von Mechaniken und elektrischen Schaltungen. Der Umfang der vorliegenden Arbeit wäre zudem nicht möglich gewesen ohne die eifrige Mitarbeit einiger intelligenter Studenten im Rahmen ihrer Abschlussarbeit, Projektarbeit oder ihres Forschungspraktikums.

Zu guter Letzt möchte ich meiner gesamten Familie für die Unterstützung meines Promotionsvorhabens danken, allen voran meiner Frau Franziska für ihre Liebe und die tagtägliche mentale und emotionale Stütze und meinen beiden wundervollen Kindern, Charlotte und Johannes, die mit ihrer Freude und Energie mein Leben sehr bereichern.

If you can not measure it, you can not improve it.

(Lord Kelvin, 1824 - 1907)

Inhalt

Symbolverzeichnis	IX
Kurzfassung	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ansatz zur Gigahertz-Trägererzeugung	6
1.3 Nanoskopie-Ansatz für technische Oberflächen	7
1.4 Wissenschaftliche Hypothesen	10
1.5 Gliederung	11
2 Stand der Wissenschaft	13
2.1 Laser-Interferometrie zur Hochfrequenz-Schwingungsmessung	13
2.1.1 Akustooptische Trägererzeugung	14
2.1.2 Erweiterung der Messbandbreite	16
2.1.3 Elektrooptische Trägererzeugung	17
2.1.4 Trägererzeugung mittels Zwei-Wellenlängen-Laser	17
2.1.5 Trägererzeugung mittels Frequenzdifferenz-Regelung	18
2.1.6 Modelle zum Differenzphasenrauschen im Interferometer	18
2.1.7 Fazit zum Stand der Wissenschaft der Trägererzeugung	19
2.2 Nanoskopie mittels Absorbanzmodulation	19
2.2.1 Realisierbare Photochrom-Konzentrationen und Schichtdicken	20
2.2.2 Modelle und Studien zur Absorbanzmodulation	21
2.2.3 Fazit zum Stand der Wissenschaft bei der Hochauflösung mittels Absorbanzmodulation	22
3 Heterodyne Interferometrie mittels Frequenzdifferenz-Regelung	23
3.1 Laser-Interferometrie	23
3.1.1 Heterodynverfahren und Bandbreiten-Anforderung	25
3.1.2 Auswirkung von Nichtlinearität auf die Bandbreitenforderung	28
3.1.3 Phasenrauschen und Linienbreite der Laserquelle	31
3.1.4 Signalverarbeitung	33

3.2	Frequenzdifferenz-Regelung zur Trägererzeugung	33
3.2.1	Nichtlineare Modellierung	34
3.2.2	Kleinsignal-Modellierung im Arbeitspunkt	36
3.2.3	Stabilität	37
3.2.4	Halte- und Fangbereich	38
3.2.5	Flexible und dynamische Wahl der Trägerfrequenz	39
4	Amplitudenauflösung eines Interferometers mit phasengekoppelten Lasern	40
4.1	Rauschäquivalente Amplitudenauflösung	40
4.2	Modell des Differenzphasen-Rauschens	43
4.2.1	Zusammenhang des Rauschens von Differenzphase und Interferenzsignal	43
4.2.2	Varianz des Differenzphasen-Rauschens	45
4.3	Modellvalidierung	47
4.3.1	Zwei freilaufende Laser im Interferometer	47
4.3.2	Zwei ideal-gekoppelte Laser im Interferometer	47
4.4	Differenzphasen-Rauschen von phasengekoppelten Lasern	48
4.5	Numerische Simulationen mit Diskussion	49
4.5.1	Ideale OPLL mit endlicher Regelbandbreite	50
4.5.2	OPLL mit endlicher Verstärkung	51
4.5.3	Träger-Kollaps	52
4.5.4	Übergang zu Schrotrausch-begrenzter Detektion	52
4.5.5	Übergang zu Intensitätsrausch-begrenzter Detektion	54
5	Ortsauflösung der Mikroskopie und Absorbanzmodulation	56
5.1	Beugungsbegrenzte Ortsauflösung	56
5.1.1	Ortsauflösung der optischen Mikroskopie	56
5.1.2	Ortsauflösungsvermögen eines LDV-Mikroskops	58
5.2	Modellierung eines Reflexions-Nanoskops mittels Absorbanzmodulation	64
5.2.1	Photophysikalische Parameter des Photochroms BTE-I	65
5.2.2	Ratengleichung der Photokinetik	66
5.2.3	Absorption und Absorbanz	67
5.2.4	Analytische Näherung zur Photokinetik	68
5.2.5	Grenzflächenreflexion an der AML	69
5.3	Bewertungskriterien der AMI-Nanoskopie	71
5.3.1	Transmissionskontrast	71
5.3.2	Dicke der Absorbanzmodulationsschicht	71
5.3.3	Reflexionskontrast durch AMI	73
5.3.4	Verhältnis von Signal zu Störung	75

6	Simulation eines Reflexions-Nanoskops mittels Absorbanzmodulation	76
6.1	Implementierung des Simulationsmodells	76
6.1.1	Photostationarität und Abbruchkriterium	78
6.1.2	Nachverarbeitung der Simulationsdaten	80
6.2	Erkenntnisse aus strahlenoptischer Simulation	80
6.2.1	Absorbanzverteilung und resultierendes AMI-Punktbild	81
6.2.2	Steigerung der Ortsauflösung	82
6.2.3	Gesamttransmission und Störung durch Hintergrund	87
6.2.4	Photokinetik in der AML	88
6.3	Wellenoptische Erweiterung des Modells	91
6.4	Simulationsergebnisse der Parameterstudie	93
6.5	Fazit	98
6.6	Anwendung der Absorbanzmodulation in der Laser-Doppler-Vibrometrie	100
6.6.1	Besondere Anforderungen an die AML	100
6.6.2	Massebedeckung des schwingenden Bauteils durch AML	100
6.6.3	Energieeintrag in die AML	102
7	Experimentalaufbau des Laser-Doppler-Vibrometer-Mikroskops	104
7.1	Optischer Aufbau des LDV-Mikroskops	104
7.1.1	Aufbau des Laser-Doppler-Vibrometers	104
7.1.2	Photodetektoren	107
7.1.3	Aufbau des Mikroskops	110
7.1.4	Einkopplung eines kommerziellen LDV	112
7.2	Optoelektronische Phasenregelschleife	113
7.2.1	Durchstimmbarer Slave-Laser	113
7.2.2	Master-Laser	117
7.2.3	Phasendetektion	118
7.2.4	Schleifenfilter	120
7.2.5	Prozedur zum Einrasten der Phasenregelung	122
7.3	Software zur automatisierten LDV-Messung	123
7.4	Signalerfassung und -verarbeitung	125
7.4.1	Vollaussteuerung am Analog-Digital-Wandler	125
7.4.2	Demodulation und Rekonstruktion der Schwingform	125
7.5	Amplitudenauflösung der Konfigurationen des Experimentalaufbaus	127
7.5.1	LDV-Amplitudenauflösung durch Quantisierungsrauschen	128
7.5.2	Optimierung der Referenzleistung	128
7.5.3	Datenvolumen und Messzeit	129

8	Experimente	133
8.1	Demonstration einer Schwingungsmessung	133
8.2	Schwingungsmessung an einem SAW-Filter	135
8.2.1	Messung bei 600 MHz-Träger mit Si-Photodetektoren	136
8.2.2	Messung bei 2,4 GHz-Träger mit GaAs-Photodetektoren	137
8.2.3	Rastermessung der Oberflächenwelle	140
8.2.4	Messung elektromechanischer Eigenschaften	143
8.3	Biegeschwingungen an Schwingquarz-Mikrowaagen	145
8.3.1	Rastermessung der Schwingformen bei den Harmonischen	146
8.3.2	Rastermessung der anharmonischen Seitenbanden	149
9	Zusammenfassung und Ausblick	151
9.1	Zusammenfassung	151
9.2	Ausblick	156
	Anhang	158
A	Details zur Absorbanzmodulations-Mikroskopie	158
A.1	Modellierung der beugungsbegrenzten Fokusse	158
A.1.1	Näherung mittels Laguerre-Gauß-Moden	158
A.1.2	Parabolische Näherungen im Zentrum	161
A.2	Abschätzung der Schaltzyklen	161
B	Details zum Experimentalaufbau	163
B.1	Messvolumen	163
B.2	Gleichtakt-Unterdrückung im Interferometer	164
B.2.1	Abgeglicher Photodetektor	164
B.2.2	Güte der Leistungsteilung am Strahlteiler	165
B.2.3	Ausrichtung der Galliumarsenid-Photodetektoren	166
B.3	Detaillierte Bauteillisten	167
	Literaturverzeichnis	169

Symbolverzeichnis

Konstanten

ϵ_0	Elektrische Feldkonstante	$8,8541878128 \cdot 10^{-12} \text{ A s/(V m)}$
μ_0	Magnetische Feldkonstante	$1,25663706212 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$
j	Imaginäre Einheit	$j = \sqrt{-1}$
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
e	Elementarladung	$1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
h	Planck'sches Wirkungsquantum	$6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
k_B	Boltzmann-Konstante	$1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
N_A	Avogadro-Konstante	$6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Lateinische Symbole und Formelzeichen

\mathcal{A}	Absorbanz (Definition in (5.27))	–
A	Fläche	m^2
$A(f)$	Amplitudengang	
a_λ	Absorptionskoeffizient bei der Wellenlänge λ	m^{-1}
a_n	Koeffizient n -ter Ordnung eines Polynoms	
B	Bandbreite einer Resonanz	Hz
CNR	Träger-Rausch-Verhältnis (engl. ‚Carrier-to-Noise Ratio‘)	–
CSR	Träger-Seitenband-Verhältnis (engl. ‚Carrier-to-Sideband Ratio‘)	–
CT	Transmissionskontrast (Definition in (5.35)) (engl. ‚Transmission Contrast‘)	–
c_{I}	Konzentration der Photochrome im Zustand II	m^{-3}
c_{tot}	Gesamtkonzentration der (aktiven) Photochrome	m^{-3}
c_{amb}	Lichtgeschwindigkeit des (Umgebungs-)Mediums	m/s
D	Schichtdicke der AML	m
E	Elektrische Feldstärke	V/m

Symbolverzeichnis

f	Frequenz	Hz
$F(s)$	Übertragungsfunktion des Schleifenfilters	
F_0	Konstanter Übertragungsfaktor	
f_{sa}	Abtastrate (engl. „Sampling“)	s^{-1}
f_{B}	Detektorbandbreite	Hz
f_{L}	Regelbandbreite	Hz
$G(s)$	Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises	
$H(s)$	Übertragungsfunktion des Regelkreises	
I	Intensität	W/m^2
i	Elektrischer Strom	A
i, j, k, m, n	Index, Zähler, Ordnung (ganze Zahl)	–
J	Komplexe Nachgiebigkeit	m/N
K	Stationärer Übertragungsfaktor, Konstante, Verstärkung	
k	Anzahl der Quantisierungsstufen	Bit
k	Wellenzahl	m^{-1}
$k_{\mathbb{B}}$	Rate des thermischen Zerfalls aus dem Zustand \mathbb{B}	s^{-1}
ℓ_{coh}	Kohärenzlänge einer Laserquelle (Definition in (3.24))	m
l	Länge, Strecke	m
m	Masse	kg
M_{vib}	Modulationsindex der Phasenmodulation durch den Laser-Doppler-Effekt (Definition in (3.9))	–
M_{PhC}	Molare Masse des Photochroms	kg/mol
NA	Numerische Apertur des Mikroskop-Objektivs	–
NEP'	Spektraldichte der rauschäquivalenten (optischen) Strahlungsleistung (engl. „Noise-Equivalent Power“)	$\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$
NF	Rauschzahl (engl. „Noise Figure“)	–
N	(Stichproben-)Anzahl	–
N_{sa}	Speichertiefe	–
n_{amb}	Brechungsindex des (Umgebungs-)Mediums	–
OPD	Optische Pfaddifferenz	m
PR	Leistungsverhältnis (engl. „Power Ratio“)	–
X		

PR_{sat}	Charakteristisches Sättigungs-Leistungsverhältnis eines AMI-Nanoskops (Definition in (6.15))	–
P	Leistung	W
Q_x	Teil-Autokorrelationsfunktion der Größe x	
RBW	Auflösungsbandbreite (engl. ‚Resolution Bandwidth‘)	Hz
RIN'	Spektrale Leistungsdichte des relativen Intensitätsrauschens (Definition in (7.2)) (engl. ‚Relative Intensity Noise‘)	Hz^{-1}
\mathbf{r}	Ortsvektor	m
R	Reflexionsgrad (Definition in (5.34))	–
r	Radius oder radiale Koordinate	m
r, θ, z	Zylinderkoordinaten	m
R_x	Autokorrelationsfunktion der Größe x	
R_{xy}	Kreuzkorrelationsfunktion der Größen x und y	
S	(Strom-)Empfindlichkeit des Photodetektors	A/W
SBR	Signal-Störhintergrund-Verhältnis (Definition in (5.43)) (engl. ‚Signal-to-Background Ratio‘)	–
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (engl. ‚Signal-to-Noise Ratio‘)	–
SR	Teilungsverhältnis der optischen Leistung an einem Strahlteiler (engl. ‚Splitting Ratio‘)	–
s	Komplexe Frequenz	s^{-1}
s	Weg oder Weglänge	m
S_x	Spektrale (Auto-)Leistungsdichte der Größe x	$[x]^2/\text{Hz}$
S_{11}	Eingangsreflexionsfaktors eines Zweitores	–
S_{21}	Vorwärts-Transmissionsfaktors eines Zweitores	–
S_{xy}	Spektrale Kreuzleistungsdichte der Größen x und y	$[x][y]/\text{Hz}$
T	Absoluttemperatur	K
t	Zeit	s
T_{AML}	Transmissionsgrad der AML bei der Messwellenlänge λ_m	–
T	Konstante Dauer oder Periode	s
T_{LDV}	Interferometer-Verzögerung	s
T_L	Schleifenverzögerung	s
T_{stat}	Photostationäre Zeitdauer	s

Symbolverzeichnis

u	Elektrische Spannung	V
V	Volumen	m ³
v	Geschwindigkeit	m/s
W	Energie	J
w	Radius eines Laserstrahls	m
w_{PhC}	Masseanteil des Photochroms	–
x, y, z	Kartesische Raumkoordinaten	m
$x(t)$	Elektrisches Zeitsignal am Eingang	
$y(t)$	Elektrisches Zeitsignal am Ausgang	
Z_i	Zernike-Moment des OSA/ANSI-Index' i	–
Z	Elektrische Impedanz	Ω
Z_{ak}	Akustische Impedanz	Ns/m

Griechische Symbole und Formelzeichen

α	Relative Messabweichung	–
α_{eff}	Wirksamkeit des Leistungsverhältnisses über der AML-Dicke (Definition in (6.11))	–
β	Abbildungsmaßstab	–
β_{AB}	Konzentrationsverhältnis der Photochrome im Zustand A zu B (Definition in (6.8))	–
Γ	Anpassungsfaktor für das theoretische Sättigungs-Leistungsverhältnis PR _{sat} an die Simulationsergebnisse (Definition in (6.15))	–
γ	Optimierungsfaktor des Produkts aus Konzentration und atomaren Absorptionsquerschnitten eines Ziel-Photochroms für AMI bezogen auf BTE-I (Definition in (5.37))	–
$\Delta\nu$	Laser-Linienbreite	Hz
$\Delta\varphi$	Differenzphase	rad
Δx	Halbwertsbreite eines Punktbilds	m
Δz_{R}	Schärfentiefe	m
$\varepsilon_{\text{I}}^{\lambda}$	Atomarer Absorptionsquerschnitt bei der Wellenlänge λ für den Zustand I	m ²
ζ	Propagationswinkel zur Oberflächennormalen	rad

$\eta_{\mathbb{I} \rightarrow \mathbb{J}}$	Übergangswahrscheinlichkeit vom Zustand \mathbb{I} in den Zustand \mathbb{J}	–
θ	Polarwinkel	rad
ϑ	Temperatur	°C
κ	Faktor der Ortsauflösungssteigerung in Bezug zur Beugungsgrenze (Definition in (6.4))	–
Λ	Akustische Wellenlänge	m
λ	Wellenlänge der optischen Strahlung	m
ν	Frequenz einer Quelle	Hz
ν_P	Poisson-Zahl	–
ξ	Faktor des Zusatzrauschens einer Lawinen-Photodetektion	–
ϖ	Phasenargument	rad
ρ	(Massen-)Dichte	kg/m ³
ϱ	Reflexionsfaktor der Amplitude (Definition in (5.32))	–
$\sigma_{\mathbb{I} \rightarrow \mathbb{J}}^\lambda$	Interaktionsquerschnitt bei der Wellenlänge λ für den Übergang zwischen den Zuständen \mathbb{I} und \mathbb{J}	m ²
σ_x	Standardabweichung der Größe x	
τ	Verzögerung oder Verschiebung	s
τ	Zeitkonstante des Prozesses	s
Φ	Hilfsgröße (Differenz der akkumulierten Differenzphasen)	rad
ϕ	Photonenflussdichte	m ⁻² s ⁻¹
φ	Phase	rad
χ	Interferenzeffizienz	–
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹

Indices

A	Den Grundzustand des Photochroms betreffend
a	Den Aktivierungsstrahl betreffend
Airy	Des Airy-Scheibchens
ak	Akustisch
amb	Die Umgebung betreffend (engl. ‚Ambient‘)
AMI	Die Absorbanzmodulations-Bildgebung betreffend

Symbolverzeichnis

AML	Die Absorbanzmodulations-Schicht betreffend
\mathbb{B}	Den Zustand des Photochroms nach der Photoreaktion betreffend
bal	Bei Verwendung abgeglicher Photodetektoren
BB	Im Basisband (engl. ‚Base Band‘)
c	Den Träger betreffend (engl. ‚Carrier‘)
D	Am Ort des Photodetektors
det	Die Detektionsvorgang betreffend
eff	Effektiv
einzel	Bei Verwendung eines Einzelphotodetektors
el	Elektrisch
est	Geschätzt (engl. ‚Estimated‘)
exc	Angeregt (engl. ‚Excited‘)
fr	Freilaufend (engl. ‚Free-running‘)
hold	Im Haltebereich der Phasenregelschleife
I	Erster Ordnung
in	Eintreffend
kin	(Photo-)kinetisch
L	Die Regelschleife betreffend
LDV	Das Laser-Doppler-Vibrometer betreffend
LO	Den Lokaloszillator betreffend
lock	Im geregelten/eingeschwungenen Zustand
m	Den Messstrahl betreffend
M	Den Master-Laser betreffend
max	Maximalwert
mes	Den Messprozess betreffend
min	Minimalwert
mix	Den Mischprozess betreffend
mod	Den Modulationseingang des Slave-Lasers betreffend
ne	Rauschäquivalent (engl. ‚Noise Equivalent‘)
P	Eine Polstelle der Übertragungsfunktion betreffend
XIV	

Ph	Bezogen auf Photonen
PhC	Das Photochrom betreffend
PN	Phasenrauschen (engl. ‚Phase Noise‘)
τ	Den Referenzstrahl betreffend
ref	Referenz
relax	Die Relaxationsoszillation betreffend
RINlim	Intensitätsrausch-begrenzt (engl. ‚Intensity-Noise limited‘)
S	Den Slave-Laser betreffend
sa	Die Abtastung betreffend (engl. ‚Sampling‘)
sat	Gesättigt
SN	Schrotrauschen (engl. ‚Shot Noise‘)
SNlim	Schrotrausch-begrenzt (engl. ‚Shot-Noise limited‘)
stat	Im photostationären Gleichgewicht, statisch, stationär
str	Störung oder parasitär
sub	Das Substrat betreffend
T	Transversal
th	Thermisch
TIV	Transimpedanz-Verstärker
tot	Gesamt, total
tw	Laufende akustische Welle (engl. ‚Travelling Wave‘)
vib	Die Schwingung betreffend
Z	Eine Nullstelle der Übertragungsfunktion betreffend (engl. ‚Zero‘)

Abkürzungen

A	Stabiler Grundzustand des Photochroms (geöffnete Ringstruktur eines BTE)
\mathbb{B}	Zustand des Photochroms nach der Photoreaktion (geschlossene Ringstruktur eines BTE)
S_0	Grundzustand eines Fluorophors
S_1	Angeregter Zustand eines Fluorophors
L	Akustische Longitudinalmode
S	Akustische Schermode

Symbolverzeichnis

AB	Aperturblende
AC	Wechselanteil (engl. ‚Alternating Current‘)
ADU	Analog-digital Umsetzer oder Wandler (engl. ‚Analog-to-Digital Converter‘)
AMI	Absorbanzmodulations-Bildgebung (engl. ‚Absorbance-Modulation Imaging‘)
AML	Absorbanzmodulations-Schicht (engl. ‚Absorbance-Modulation Layer‘)
AMOL	Engl. ‚Absorbance-Modulation Optical Lithography‘
APP	Anamorphes Prismenpaar
AU	In Bezug zum Durchmesser des Airy-Scheibchens („Airy Unit“)
BAW	Volumenwelle (engl. ‚Bulk Acoustic Wave‘)
BPF	Bandpassfilter
BTE	1,2-bis(thienyl)ethene
BTE-I	1,2-bis(5,5'-dimethyl-2,2'-bithiophen-yl) perfluorocyclopent-1-en
CCO	Strom-gesteuerter Oszillator (engl. ‚Current-Controlled Oscillator‘)
DBR	Engl. ‚Distributed Bragg Reflector‘
DC	Gleichanteil (engl. ‚Direct Current‘)
DSO	Digitales Speicheroszilloskop
EM	Elektromagnetisch
FI	Faraday-Isolator
FK	Faser-Kollimator
HF	Hochfrequenz
HWP	Halbwellenplatte
I/Q	In-Phase / Quadratur
IDT	Interdigital-Transducer
Ir	Iris
Kon	Kondensor
L	Linse
LB	Lochblende
LD	Laserdiode
LDV	Laser-Doppler-Vibrometer
LED	Leuchtdiode (engl. ‚Light-Emitting Diode‘)
XVI	

LO	Lokaloszillator
LP	Langpass
MEMS	Mikroelektromechanisches System, Mikrosystem (engl. ‚Microelectromechanical System‘)
NCO	Numerisch-gesteuerter Oszillator (engl. ‚Numerically-Controlled Oscillator‘)
NF	Niederfrequenz
OPLL	Optoelektronische Phasenregelschleife (engl. ‚Optical Phase-Lock Loop‘)
PD	Photodetektor
PE	Peltier-Element
PIN	Engl. ‚Positive Intrinsic Negative‘
PM-SMF	Polarisationserhaltende Singlemode-Faser
PMT	Photomultiplier (engl. ‚Photomultiplier Tube‘)
PP	Planparallele Platte
PSD	Spektrale Leistungsdichte (engl. ‚Power Spectral Density‘)
PSF	Punktbild, Punktverwaschungsfunktion (engl. ‚Point-Spread Function‘)
PST	Polarisierender Strahlteiler
QCM	Schwingquarz-Mikrowaage (engl. ‚Quartz-Crystal Micro-Balance‘)
RK	Richtkoppler
SAW	Oberflächenwelle (engl. ‚Surface Acoustic Wave‘)
SF	Strahlfalle
Sp	Spiegel
ST	Nicht-polarisierender Strahlteiler
STED	Engl. ‚Stimulated-Emission Depletion‘
TEM	Transversal-elektromagnetische Mode
TIV	Transimpedanz-Verstärker
TL	Tubulinse
TPF	Tiefpassfilter
UV	Spektralbereich der ultravioletten elektromagnetischen Strahlung
VNA	Vektor-Netzwerkanalysator
VWP	Viertelwellenplatte

Mathematische Operationen und Funktionen

$\Delta(\cdot)$	Breite, Schwankung, Änderung, Diskretisierung
$\dot{(\cdot)}$	Partielle Ableitung nach der Zeit $\frac{d}{dt}$
d	Differenzial
$\langle(\cdot)\rangle_p$	Scharmittelwert
$\langle(\cdot)\rangle_t$	Zeitmittelwert
$\overline{(\cdot)}$	Mittelwert
$(\cdot)^*$	komplex Konjugierte
$(\cdot)^T$	Transposition des Vektors
$\hat{(\cdot)}$	Amplitude
$\Im(\cdot)$	Imaginärteil
$\Re(\cdot)$	Realteil
\mathbf{x}	Vektor
$H_m(\cdot)$	Struve-Funktion der Ordnung m
$J_m(\cdot)$	Bessel-Funktion erster Gattung und Ordnung m
$\delta(\cdot)$	Delta-Distribution
$\mathcal{F}\{\cdot\}(x)$	Fourier-Transformation nach der Variablen x
$(\cdot)'$	Spektrale Dichte der Größe bezogen auf 1 Hz Auflösungsbandbreite
$\binom{n}{k}$	Binomialkoeffizient
$\max\{\cdot\}$	Maximalwert der Größe

Kurzfassung

Die heterodyne Interferometrie oder auch Laser-Doppler-Vibrometrie hat sich als kontaktlose, empfindliche und genaue Schwingungsmesstechnik für die Mikrosystemtechnik in Industrie und Forschung etabliert. Aufgrund aktueller Entwicklungen insbesondere in der Nachrichtentechnik besteht der Bedarf zur Messung mikroakustischer Schwingungen bis zu 6 GHz bei Subnanometer-Amplituden. Dabei stößt die konventionelle Gerätetechnik der Interferometrie in Hinblick auf das vorteilhafte Träger- oder Heterodynverfahren an ihre Grenzen. Für eine uneingeschränkte Messfähigkeit bis 6 GHz ist eine Gerätetechnik erforderlich, die Trägerfrequenzen von mindestens 6 GHz erzeugen kann. Die konventionelle Technik zur Trägererzeugung limitiert die Interferometer des Stands der Wissenschaft und eine Messfähigkeit wird nur auf Kosten der Immunität gegen Nichtlinearitäten und der Eindeutigkeit erreicht. Die uneingeschränkte Messfähigkeit eines Interferometers erfordert zudem eine ausreichende Ortsauflösung der Schwingformen auf dem Mikrosystem. Mit steigender Schwingungsfrequenz nimmt die akustische Wellenlänge ab, sodass der Messlaserstrahl mit einer Mikroskop-Optik fokussiert werden muss. Die Beugung limitiert dabei die minimale Größe des Laserfokus und damit die Ortsauflösung, was die Messfähigkeit eines Interferometers für Schwingungsfrequenzen im Gigahertz-Bereich ebenfalls einschränkt.

In dieser Arbeit wurden die Trägererzeugung mittels phasengekoppelter Laser in einer optoelektronischen Phasenregelschleife theoretisch und experimentell untersucht, um eine Messfähigkeit von heterodynen Interferometern bei mechanischen Schwingungen bis zu 6 GHz zu erzielen. Zudem wurde die Steigerung der Ortsauflösung jenseits der Beugungsgrenze durch Absorbanzmodulations-Nanoskopie in Reflexion theoretisch analysiert. Anhand der systemtheoretischen Beschreibung der optoelektronischen Phasenregelschleife wurden Anforderungen an die Eigenschaften geeigneter Laser und der weiteren Komponenten formuliert. So muss die Regelbandbreite größer als die summierte Linienbreite der Laser sein. Als wichtige Eigenschaft des Interferometers wurde die erreichbare Schwingungsamplitudenauflösung in Abhängigkeit vom Interferometeraufbau, den phasengekoppelten Lasern und der Phasenregelschleife modelliert und numerische Simulationen durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass der Einfluss des Phasenrauschens der phasengekoppelten Laser mit steigender Schwingungsfrequenz schwindet und daher andere Rauschbeiträge, wie beispielsweise das Schrotrauschen, die Schwingungsamplitudenauflösung limitieren können. Des Weiteren wurde der Einbruch des nutzbaren Trägers analytisch beschrieben, der durch den Verlust der gegenseitigen Kohärenz bei großen Pfaddifferenzen im Interferometeraufbau entsteht. Die theoretische Modellierung vereinfacht so eine zielgerichtete Auslegung der Trägererzeugung mittels phasengekoppelter Laser für die Interferometrie.

Das theoretische, beugungsbegrenzte Ortsauflösungsvermögen eines Interferometers wurde anhand einer akustischen Oberflächenwellen hergeleitet. Es wurde gezeigt, dass die Größe des Lasermessflecks um mindestens den Faktor 8 geringer sein muss als die akustische Wellenlänge, damit die systematischen Messabweichungen vernachlässigbar bleiben. Für eine Ortsauflösung jenseits der Beugungsgrenze wurde die Absorbanzmodulations-Nanoskopie modelliert, die eine reversible, dynamische Nahfeldblende in einer Dünnschicht auf der Messoberfläche erzeugt. Das Simulationsmodell umfasst die Photokinetik, die mikroskopische Bildgebung und die Beugung an der dynamischen Nahfeldblende. Aus dem Modell wurden analytische Näherungen für eine einfache Auslegung eines Absorbanzmodulations-Nanoskops abgeleitet. Insbesondere wird eine Formel zur Steigerung der Ortsauflösung in Beziehung zu Systemparametern hergeleitet, die eine interessante Analogie zu der bekannten Auflösungsformel der STED-Mikroskopie aufweist. Eine Parameterstudie der numerischen Simulation zeigt das Potential einer Auflösungssteigerung auf $1/5$ der Beugungsgrenze bei 100 nm Schichtdicke, wenn eine Konzentrationserhöhung oder eine Verbesserung der photophysikalischen Eigenschaften des Photochroms um einen Faktor 2 gegenüber dem Stand der Technik erzielt werden kann. Diese Studie bietet die Grundlage für die Dimensionierung und den experimentellen Nachweis des Potentials der Absorbanzmodulations-Nanoskopie in Reflexion. Es wurde der weitere Forschungsbedarf zur Anwendung in der Interferometrie diskutiert.

Auf Basis der Erkenntnisse wurde ein heterodynes Laser-Doppler-Vibrometer-Mikroskop mit phasengekoppelten, monolithischen Halbleiterlasern im sichtbaren Spektralbereich ausgelegt und realisiert. Die Bandbreite der Datenerfassung limitiert die Messung auf Schwingungsfrequenzen bis 3 GHz. Die Erzeugung einer Trägerfrequenz wird durch den Photodetektor auf maximal 10 GHz begrenzt. Die Messfähigkeit des Experimentalaufbaus für Hochfrequenz-Mikrosysteme wurde anhand einer Messungen auf einem Oberflächenwellen-Filter bei 315 MHz demonstriert. Die erreichte Amplitudenauflösung von $\leq 100 \text{ fm}/\sqrt{\text{Hz}}$ für Schwingungsfrequenzen $> 1 \text{ GHz}$ ist vom Intensitätsrauschen der Halbleiterlaser und vom thermischen Rauschen der Elektronik limitiert. Somit kann die Trägererzeugung mittels phasengekoppelter Halbleiterlaser die heterodyne Interferometrie zur Messung von Schwingung bis über 6 GHz befähigen, wenn das Potential der Absorbanzmodulation zur Steigerung der Ortsauflösung ausgeschöpft wird.