

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](http://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](http://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 Egnor 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
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Stand der Wissenschaft</b>	<b>13</b>
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 Hochoauflösung mittels Absorbanzmodulation . . . . .	22
<b>3 Heterodyne Interferometrie mittels Frequenzdifferenz-Regelung</b>	<b>23</b>
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
	V

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
<b>4</b>	<b>Amplitudenauflösung eines Interferometers mit phasengekoppelten Lasern</b>	<b>40</b>
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
<b>5</b>	<b>Ortsauflösung der Mikroskopie und Absorbanzmodulation</b>	<b>56</b>
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

<b>6</b>	<b>Simulation eines Reflexions-Nanoskops mittels Absorbanzmodulation</b>	<b>76</b>
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
<b>7</b>	<b>Experimentalaufbau des Laser-Doppler-Vibrometer-Mikroskops</b>	<b>104</b>
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

<b>8 Experimente</b>	<b>133</b>
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-Mikroaagen . . . . .	145
8.3.1 Rastermessung der Schwingformen bei den Harmonischen . . . . .	146
8.3.2 Rastermessung der anharmonischen Seitenbanden . . . . .	149
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
9.1 Zusammenfassung . . . . .	151
9.2 Ausblick . . . . .	156
<b>Anhang</b>	<b>158</b>
<b>A Details zur Absorbanzmodulations-Mikroskopie</b>	<b>158</b>
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>B Details zum Experimentalaufbau</b>	<b>163</b>
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
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>169</b>

# Symbolverzeichnis

## Konstanten

$\epsilon_0$	Elektrische Feldkonstante . . . . .	$8,8541878128 \cdot 10^{-12} \text{ A s}/(\text{V m})$
$\mu_0$	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

$A$	Absorbanz (Definition in (5.27)) . . . . .	–
$A$	Fläche . . . . .	$\text{m}^2$
$A(f)$	Amplitudengang	
$a_\lambda$	Absorptionskoeffizient bei der Wellenlänge $\lambda$ . . . . .	$\text{m}^{-1}$
$a_n$	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‘) . . . . .	–
$c_{\text{I}}$	Konzentration der Photochrome im Zustand I . . . . .	$\text{m}^{-3}$
$c_{\text{tot}}$	Gesamtkonzentration der (aktiven) Photochrome . . . . .	$\text{m}^{-3}$
$c_{\text{amb}}$	Lichtgeschwindigkeit des (Umgebungs-)Mediums . . . . .	$\text{m/s}$
$D$	Schichtdicke der AML . . . . .	$\text{m}$
$E$	Elektrische Feldstärke . . . . .	$\text{V/m}$

## 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 $\mathbb{B}$ . . . . .	$s^{-1}$
$\ell_{coh}$	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‘) . . . . .	$W/\sqrt{Hz}$
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		

$PR_{\text{sat}}$	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 <sup>-1</sup>
$\mathbf{r}$	Ortsvektor . . . . .	m
$R$	Reflexionsgrad (Definition in (5.34)) . . . . .	-
$r$	Radius oder radiale Koordinate . . . . .	m
$r, \theta, z$	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 <sup>-1</sup>
$s$	Weg oder Weglänge . . . . .	m
$S_x$	Spektrale (Auto-)Leistungsdichte der Größe $x$ . . . . .	[x] <sup>2</sup> /Hz
$S_{11}$	Eingangsreflexionsfaktors eines Zweitores . . . . .	-
$S_{21}$	Vorwärts-Transmissionsfaktors eines Zweitores . . . . .	-
$S_{xy}$	Spektrale Kreuzleistungsdichte der Größen $x$ und $y$ . . . . .	[x][y]/Hz
$T$	Absoluttemperatur . . . . .	K
$t$	Zeit . . . . .	s
$T_{\text{AML}}$	Transmissionsgrad der AML bei der Messwellenlänge $\lambda_m$ . . . . .	-
$T$	Konstante Dauer oder Periode . . . . .	s
$T_{\text{LDV}}$	Interferometer-Verzögerung . . . . .	s
$T_L$	Schleifenverzögerung . . . . .	s
$T_{\text{stat}}$	Photostationäre Zeitdauer . . . . .	s

## Symbolverzeichnis

---

$u$	Elektrische Spannung . . . . .	V
$V$	Volumen . . . . .	$m^3$
$v$	Geschwindigkeit . . . . .	m/s
$W$	Energie . . . . .	J
$w$	Radius eines Laserstrahls . . . . .	m
$w_{\text{PhC}}$	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 . . . . .	$\Omega$
$Z_{\text{ak}}$	Akustische Impedanz . . . . .	Ns/m

## Griechische Symbole und Formelzeichen

$\alpha$	Relative Messabweichung . . . . .	–
$\alpha_{\text{eff}}$	Wirksamkeit des Leistungsverhältnisses über der AML-Dicke (Definition in (6.11)) . . . . .	–
$\beta$	Abbildungsmaßstab . . . . .	–
$\beta_{\text{AB}}$	Konzentrationsverhältnis der Photochrome im Zustand A zu B (Definition in (6.8)) . . . . .	–
$\Gamma$	Anpassungsfaktor für das theoretische Sättigungs-Leistungsverhältnis $\text{PR}_{\text{sat}}$ an die Simulationsergebnisse (Definition in (6.15)) . . . . .	–
$\gamma$	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
$\Delta x$	Halbwertsbreite eines Punktbilds . . . . .	m
$\Delta z_{\text{R}}$	Schärfentiefe . . . . .	m
$\varepsilon_{\text{I}}^{\lambda}$	Atomarer Absorptionsquerschnitt bei der Wellenlänge $\lambda$ für den Zustand I . . . . .	$m^2$
$\zeta$	Propagationswinkel zur Oberflächennormalen . . . . .	rad

XII

$\eta_{\mathbb{I} \rightarrow \mathbb{J}}$	Übergangswahrscheinlichkeit vom Zustand $\mathbb{I}$ in den Zustand $\mathbb{J}$ . . . . .	-
$\theta$	Polarwinkel . . . . .	rad
$\vartheta$	Temperatur . . . . .	°C
$\kappa$	Faktor der Ortsauflösungssteigerung in Bezug zur Beugungsgrenze (Definition in (6.4)) . . . . .	-
$\Lambda$	Akustische Wellenlänge . . . . .	m
$\lambda$	Wellenlänge der optischen Strahlung . . . . .	m
$\nu$	Frequenz einer Quelle . . . . .	Hz
$\nu_P$	Poisson-Zahl . . . . .	-
$\xi$	Faktor des Zusatzrauschens einer Lawinen-Photodetektion . . . . .	-
$\varpi$	Phasenargument . . . . .	rad
$\rho$	(Massen-)Dichte . . . . .	kg/m <sup>3</sup>
$\varrho$	Reflexionsfaktor der Amplitude (Definition in (5.32)) . . . . .	-
$\sigma_{\mathbb{I} \rightarrow \mathbb{J}}^\lambda$	Interaktionsquerschnitt bei der Wellenlänge $\lambda$ für den Übergang zwischen den Zuständen $\mathbb{I}$ und $\mathbb{J}$ . . . . .	m <sup>2</sup>
$\sigma_x$	Standardabweichung der Größe $x$	
$\tau$	Verzögerung oder Verschiebung . . . . .	s
$\tau$	Zeitkonstante des Prozesses . . . . .	s
$\Phi$	Hilfsgröße (Differenz der akkumulierten Differenzphasen) . . . . .	rad
$\phi$	Photonenflussdichte . . . . .	m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
$\varphi$	Phase . . . . .	rad
$\chi$	Interferenzeffizienz . . . . .	-
$\omega$	Kreisfrequenz . . . . .	s <sup>-1</sup>

## 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 abgeglichener 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‘)
$\tau$	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)
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	Kondensator
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	Tubuslinse
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
$\langle(\cdot)\rangle_p$	Schmitttelwert
$\langle(\cdot)\rangle_t$	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.