

Michael Schuth
Wassili Buerakov

Handbuch Optische Messtechnik

Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch,
Fertigung und Qualitätssicherung



HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Michael Schuth

Wassili Buerakov

Handbuch Optische Messtechnik

Praktische Anwendungen für Entwicklung,
Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung

HANSER

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schuth, Fachhochschule Trier

Dr. Wassili Buerakov, Fachhochschule Trier

ISBN: 978-3-446-43634-3

eBook-ISBN: 978-3-446-43661-9

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf vorheriger Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen in folgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebensowenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigen auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne des Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

© 2017 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Cornelia Rothenaicher

Umschlagmotiv: AMETEK GmbH – Division Creaform Deutschland

Umschlagrealisation: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Firmengruppe APPL, Wemding

Printed in Germany



Vorwort

Wohl keine Technologie dieser Welt hat in den letzten Jahren ein so rasantes Wachstum erlebt wie die Photonik. Computer, Smartphones, 3D-Filme, digitale Fotokameras. Optische Technologien im weitesten Sinne haben unser Leben wesentlich verändert und werden es weiterhin tun. Zum Beispiel in der Medizintechnik sind Geräte, die auf der Photonik begründet sind, wegweisende Hilfsmittel, um unsere Mediziner zu unterstützen. Operationen werden von Kameras überwacht und liefern, eingebunden in Analysegeräte, wichtige Informationen. Beispiele sind: Tumorbehandlungen im Gehirn, Vermessung von Implantaten bei künstlichen Knie- und Hüftgelenken, Detektionen von Krebsgeschwüren, ja sogar die Formfassungen von Zahnprothesen werden mit optischen Systemen erfasst, ausgewertet und umgesetzt.

Auch in der Industrielandschaft sind optische Technologien nicht mehr wegzudenken und stehen auf Wachstumskurs. Weitreichende, zukünftige Entwicklungen sind zu erwarten, in denen optische Sensoren Messergebnisse liefern:

- Beim autonomen Fahren, um die Mobilität des Menschen zu verbessern
- In der Informationsverarbeitung in Form von Bildern, Videos, Animationen usw.
- Bei der Erforschung neuer Galaxien und des Weltraums (z.B. Rohstoffgewinnung auf dem Mond, dem Mars oder von Kometen, sowie die Erschließung neuer Lebensräume)
- Beim Einsatz individueller, robotergestützter Pflegedienste für ältere und erkrankte Menschen, um den Bedarf an Pflegekräften, zumindest teilweise zu kompensieren.
- Bei der Miniaturisierung von Schaltkreisen und der Erhöhung der Speicherkapazität zur Datenverwaltung (Stichwort optische Computer)
- Bei Analysegeräten, auch für den häuslichen Gebrauch, welche beispielsweise mit dem Smartphone

in Verbindung stehen (Beantwortung einfacher Fragen, wie „Was habe ich noch im Kühlschrank?“, „Sind meine Rollläden unten?“, „Ist der Herd abgeschaltet?“, „Sind Einbrecher im Haus?“).

- Analysegeräte zur Energieberatung („Welche Geräte sind ein- bzw. ausgeschaltet?“, „Wie ist die Temperaturverteilung rund um die Firma bzw. ums Haus?“)
- Veränderungen in der Arbeitswelt durch verstärkten Einsatz von „Home-Office-Systemen“, gekoppelt mit optischer Signalverarbeitung
- In der Agrarwirtschaft, zur Analyse des Pflanzenwachstums, mit Hilfe optischer Sensoren, welche direkt am Traktor befestigt werden.
- Industrie 4.0 ist ohne optische Messtechnik nicht umzusetzen

Die weitreichenden Einsatzmöglichkeiten optischer Messtechnik sind verbunden mit den Hauptvorteilen der Systeme wie:

- Zerstörungsfreie Prüf- und Messmethode
- Materialunabhängige Einsatzmöglichkeit
- Ganzflächige Überprüfbarkeit
- Kontaktlose Analyse
- Digitale Datenermittlung, -aufbereitung, -transfer und -protokollierung in einem Ablauf

Motivation

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an Büchern, Firmenbroschüren und Forschungsberichte, welche die Grundlagen der optischen Systeme erläutern. Dabei werden die physikalischen Zusammenhänge hergeleitet sowie die mathematischen Wege und Herleitungen diverser Algorithmen beschrieben. Genau hierin unterscheidet sich das Ihnen vorliegende „Handbuch Optische Messtechnik (HOM)“.

Es wird bewusst auf seitenlange, mathematische Herleitungen verzichtet. Im Vordergrund steht der Anwender, der ein Verfahren sucht, um eine komplexe, messtechnische Aufgabe zu lösen und dafür ein schnelles,

anwenderfreundliches, präzises und aussagekräftiges Messsystem benötigt. Das Handbuch ist daher ein Nachschlagewerk, um gezielt für verschiedene Messaufgaben das geeignete System zu finden und gleichzeitig Alternativen aufzuzeigen. Alle Messsysteme werden daher in diesem Buch anhand einer sorgfältig aufbereiteten Struktur erläutert. Die physikalischen Grundlagen werden durch übersichtliche Prinzipskizzen vorgestellt und beschrieben. Mehrere Anwendungsbeispiele aus der Industrie werden aufgeführt, die zudem zur Findung eigener Lösungswege anregen. Innerhalb kürzester Zeit ist jeder in der Lage, geeignete Systeme anhand der Übersichtstabellen, Verfahrensbeschreibungen und Anwendungsbeispiele für die vorliegende Messaufgabe auszuwählen. Ebenfalls können gezielt Fragen an Systemlieferanten gestellt werden.

Dank

Zum Schluss möchten wir uns bei den Mitarbeitern des Hanser Verlages bedanken, ohne dessen Unterstützung dieses Handbuch nicht zustande gekommen wäre. Insbesondere gilt unser Dank Herrn Herzberg, der uns bei der Gestaltung stets zur Seite gestanden hat.

Weiterhin gilt unser aufrichtiger Dank den über 40 beteiligten Firmen, den Mitarbeitern und Fachleuten, dessen Informationen und Anwendungsbeispiele wesentlich zum Gelingen dieses Handbuches beigetragen haben.

Trier, den 24.07.2017

*Wassili Buerakov
Michael Schuth*

PS:

Sollten Sie Anregungen, Hinweise und Ergänzungen haben, so sprechen Sie bitte den Hanser Verlag oder direkt die Autoren an. Wir freuen uns über jeden kreativen Hinweis.

Prinzipiell sind viele optische Messmethoden bekannt, aber die Umsetzung in die tägliche, industrielle Anwendung steht noch weit am Anfang.

Brauchen Sie weitere Unterstützung? Sprechen Sie uns an. Wir freuen uns auf Sie um ggf. weitere Details mit Ihnen zu besprechen.

Kontakt: schuth@hochschule-trier.de, Betreff: HOM

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Die Autoren	XXV
Firmen, die mit Praxisbeispielen im Handbuch vertreten sind	XXVII
Einleitung	XXIX
1 Geschichte der Optik	XXIX
2 Bedeutung der optischen Technologien heute	XXXV
2.1 Bedeutung der optischen Technologien in der Technik	XXXV
2.2 Bedeutung der optischen Technologien im Militärsektor	XXXVIII
2.3 Bedeutung der optischen Technologien in der Medizin	XXXVIII
3 Bedeutung der optischen Technologie in Zukunft	XL
4 Literaturverzeichnis	XLIII

TEIL I

3D-Formerfassung

1 Einleitung	3
1.1 Historischer Rückblick	3
1.2 Nichtoptische Messtechnik	3
1.3 Übersicht	5
2 Lichtschnittverfahren	9
2.1 Verfahrensgrundlagen	9
2.2 Beschreibung des Lichtschnittverfahrens	10
2.3 Messeinflüsse beim Lichtschnittverfahren	13
2.4 Grenzen des Lichtschnittverfahrens	14
2.5 Kalibrierung beim Lichtschnittverfahren	15
2.6 Nachbearbeitung der Messdaten beim Lichtschnittverfahren	16
2.7 Anwendungsbeispiele für das Lichtschnittverfahren	17
2.7.1 Geometriekontrolle von Gussrohren	17
2.7.2 Prüfung von Jochprofilträgern ohne Taktzeitverlust	19

2.7.3	Vermessen eines Traktors	20
2.7.4	Engineering eines Flugzeuginnenraums – vom Scan zum 3D-CAD-Modell	21
2.7.5	Robotergeführte optische CMM-Scanner	23
2.7.6	Verbau von Windschutzscheiben	24
2.7.7	Spalt-Bündigkeitsmessung an Karosserieteilen	25
2.7.8	Nietenprüfung im Flugzeugbau	25
2.7.9	Vermessen von Karossen	25
2.7.10	Reverse Engineering im Rennsport	26
2.7.11	Vermessen und Auswerten der Tornadolinie	29
2.7.12	Das messtechnische Geheimnis der Poleposition von Red Bull Technology	31
2.7.13	Einsatz multisensorischer Messsysteme in Fertigung von hochpräzisen Bauteilen	33
2.7.14	Optische Qualitätssicherung im Fahrzeugbau bei Volvo	35
2.7.15	Optische Untersuchung von im Gesenk geschmiedeten Implantaten	36
2.7.16	Vermessung von Blechteilen im Automobilbau	38
2.7.17	Digitalisieren eines komplexen Türschließsystems	38
2.7.18	Laserscantechnik in einer Zinkdruckgießerei	42
3	Streifenprojektion	44
3.1	Verfahrensgrundlagen	44
3.2	Beschreibung des Streifenprojektionsverfahrens	45
3.2.1	Zeitlich codierte Verfahren	45
3.2.2	Gray-Code	46
3.2.3	Phasen-codierte Verfahren	46
3.2.4	Frequenzcodierte Verfahren	47
3.2.5	Örtlich codierte Verfahren	47
3.2.6	Sonstige Codierverfahren	48
3.2.7	Vergleich der Codierverfahren	48
3.2.8	Streifenprojektionstechniken	49
3.2.9	Zweikamerasysteme	49
3.2.10	Vermessung von Kleinstrukturen bzw. kleinen Objekten	50
3.3	Kalibrierung bei der Streifenprojektion	50
3.4	Anwendungsbeispiele der Streifenprojektion	50
3.4.1	Systemlösung ATOS (GOM GmbH): Vollflächige Geometriemessung	51
3.4.2	3D Digitalisierung eines Gebissabdrucks	55
3.4.3	Schadensanalyse bei Pkw-Pkw-Kollisionen	56
3.4.4	Fahrzeuginnenraumvermessung	57
3.4.5	Nicht-industrielle Anwendungen (Archäologie)	57
3.4.6	3D-Vermessung von Jagdwaffen	58
3.4.7	3D-Vermessung im Werkzeugbau	60
3.4.8	3D-Vermessung im Formenbau	61
3.4.9	Digitalisierung eines Fahrzeugdesignmodells	61
3.4.10	Optische Qualitätssicherung des neuen Honda Civic	63
3.4.11	Schnelle Nietenprüfung im Flugzeugbau	66
3.4.12	Untersuchung von Spaltmaßen im Automobilbau	67
3.4.13	Untersuchung eines Turbinenlaufrads	68
3.4.14	3D-Qualitätsprüfung von Getriebegehäusen für Nutzfahrzeuge	70

3.4.15	3D-Qualitätsprüfung von Lagergehäusen für Vier-Takt-Motoren	71
3.4.16	3D-Qualitätsprüfung von Turbinenschaufeln	72
3.4.17	3D-Qualitätsprüfung und Fahrzeugvermessung in der Formel 1™	73
4	Photogrammetrie	75
4.1	Prinzip der Photogrammetrie	75
4.1.1	Verfahrensgrundlagen	75
4.1.2	Messverfahren der Photogrammetrie	76
4.2	Anwendungsbeispiele der Photogrammetrie	78
4.2.1	Einsatz mobiler optischer Koordinatenmesstechnik beim Aufbau von Offshore-Windenergieanlagen	78
4.2.2	Qualitätssicherung an BMW-Cabriolets	83
4.2.3	Mobile 3D-Koordinatenmesstechnik für den Schiffbau	90
4.2.4	3D-Vermessung von Fenstern für Luxusyachten	95
4.2.5	Vermessung der Rotorblattflansche von Windkraftanlagen	95
4.2.6	Messen unter anspruchsvollen Bedingungen	97
4.2.7	3D-Inspektion von Zügen	99
5	Triangulationssensor	101
5.1	Verfahrensgrundlagen	101
5.2	Messverfahren des Triangulationssensors	101
5.3	Anwendungsbeispiele der Triangulationssensoren	102
5.3.1	Dickenmessung von Gummibahnen für das Baugewerbe	102
5.3.2	Dickenmessung von Folie	103
5.3.3	Zweiseitige Dickenmessung mit Laserprofilsensoren	103
6	Weißlichtinterferometrie	106
6.1	Verfahrensgrundlagen	106
6.2	Beschreibung des Weißlichtinterferometrieverfahrens	107
6.3	Anwendungsbeispiele der Weißlichtinterferometrie	108
6.3.1	Vergleich zu taktilen Messsystemen	108
6.3.2	Oberflächenuntersuchungen mit Weißlichtinterferometrie	109
7	Optische Kohärenztomografie	111
7.1	Verfahrensgrundlagen	111
7.2	Messverfahren der optischen Kohärenztomografie	111
8	Konfokale Mikroskopie	113
8.1	Verfahrensgrundlagen	113
8.2	Messverfahrens der konfokalen Mikroskopie	114
8.3	Anwendungsbeispiele der konfokalen Mikroskopie	116
8.3.1	Vermessung der Schneidkante einer Gewindeschneidplatte	116
8.3.2	Oberflächenstruktur- und Rauheiterfassung	118
8.3.3	Anwendungsbeispiele aus der Medizintechnik	120

8.3.4	Konfokale Mikroskopie bei additiven Fertigungsverfahren	121
8.3.5	Untersuchung von Mikrostrukturen in Forschung und Produktion	122
9	Chromatisch-konfokales Messverfahren	125
9.1	Verfahrensgrundlagen	125
9.1.1	Beschreibung des chromatisch-konfokalen Messverfahrens	125
9.1.1.1	Chromatisch-konfokale Spektralinterferometrie	127
9.2	Anwendungsbeispiele der chromatisch-konfokalen Mikroskopie	128
9.2.1	Untersuchung von Dichtelementen und -flächen	128
9.2.2	Anwendungsbeispiele aus der Medizin	129
10	Streulichtsensor	131
10.1	Verfahrensgrundlagen	131
10.2	Messverfahren des Streulichtensors	132
10.3	Anwendungsbeispiele des Streulichtensors	134
10.3.1	Rauheitsmessung während des Walzenschleifens	134
10.3.2	Flächenrauheitsmessung von Kegelrollen	134
10.3.3	100%-Messung bei gehonten Lagerringen	135
11	Lasertracer	136
11.1	Verfahrensgrundlagen	136
11.2	Messverfahren des Lasertracers	137
11.3	Anwendungsbeispiele der Lasertracer	138
11.3.1	Inspektion von Flugzeugen	138
11.3.2	Steigerung der Effizienz von Wasserkraftwerken	140
11.3.3	Vermessung von Schienenfahrzeugen und deren Komponenten	143
12	Autofokussensor	145
12.1	Verfahrensgrundlagen	145
12.2	Messverfahren des Autofokussensors	145
13	Kontrastvergleichsautofokussensor	149
13.1	Verfahrensgrundlagen	149
13.2	Messverfahren des Kontrastvergleichsautofokussensors	149
13.2.1	Telezentrische Zoomobjektive für die Kontrastvergleichsautofokussensoren	150
13.2.2	Optische Grenzen des Kontrastvergleichsautofokussensors	151
14	Interferometrische Abstands- bzw. Entfernungsmessung	153
14.1	Verfahrensgrundlagen	153
14.2	Messverfahren zur interferometrischen Abstands- bzw. Entfernungsmessung	154
14.2.1	Homodyne Interferometrie	154
14.2.2	Homodyne Interferometrie mit Quadraturerfassung	155
14.2.3	Heterodyne Interferometrie	155
14.2.4	Vermessung von großen Bauteilen mithilfe eines Laserradars	156

15	Konoskopische Holografie	159
15.1	Verfahrensgrundlagen	159
15.2	Messverfahren der konoskopischen Holografie	160
16	Ellipsometrie	162
16.1	Verfahrensgrundlagen	162
16.2	Messverfahren der Ellipsometrie	163
17	3D-Formprüfinterferometrie	165
17.1	Verfahrensgrundlagen	165
17.2	Beschreibung des Messverfahrens der 3D-Formprüfinterferometrie	166
17.3	Aufbau und Funktionsweise des Prismeninterferometers	167
17.4	Anwendungsbeispiele der 3D-Formprüfinterferometrie	169
17.4.1	Ebenheitsprüfung von polierten, geläppten, flachgehonten und feingeschliffenen Präzisionsteilen	170
17.4.2	Messung großer Flächen	170
18	Mehrwellenlänge-Interferometrie	172
18.1	Verfahrensgrundlagen	172
18.2	Messverfahren der Mehrwellenlänge-Interferometrie	173
18.3	Anwendungsbeispiele der Mehrwellenlänge-Interferometrie	176
18.4	Linsenvermessung mithilfe eines Mehrwellenlängen-Interferometers	176
19	Fokus-Variation	179
19.1	Verfahrensgrundlagen	179
19.2	Messverfahren der Fokus-Variation	180
19.3	Anwendungsbeispiele der Fokus-Variation	181
19.3.1	Hochgenaue Oberflächenmessung von Schaftwerkzeugen in der spangebenden Industrie	181
19.3.2	3D Oberflächenmessungen in der Mikropräzisionsfertigung	182
20	Deflektometrie	184
20.1	Verfahrensgrundlagen	184
20.2	Messverfahren der Deflektometrie	185
20.3	Anwendungsbeispiele der Deflektometrie	186
21	Makyoh-Sensor	188
21.1	Verfahrensgrundlagen	188
21.2	Messverfahren mit Makyoh-Sensor	189
22	Schattenwurfverfahren	190
22.1	Verfahrensgrundlagen	190

22.2	Beschreibung des Schattenwurfverfahrens	191
22.3	Anwendungen des Schattenwurfverfahrens	191
22.3.1	Berührungslose Schneidkantenvermessung	191
22.3.2	Automatische Holzplattenvermessung	192
23	Terrestrisches Laserscanning	193
23.1	Verfahrensgrundlagen	193
23.2	Messverfahren des terrestrischen Laserscannings	194
23.3	Anwendungsbeispiele des terrestrischen Laserscannings	196
23.3.1	Terrestrische Flugzeugvermessung	197
23.3.2	Digitalisierung des Wasserkraftwerkes Atlantis	197
23.3.3	Terrestrische Truck-Vermessung	198
24	Shape from Shading	199
24.1	Verfahrensgrundlagen	199
24.2	Messverfahren Shape from Shading	200
25	Hybride Messverfahren	202
25.1	Verfahrensgrundlagen	202
25.2	Beschreibung der hybriden Messverfahren	203
25.3	Anwendungsbeispiele der hybriden Messverfahren	205
26	Literaturverzeichnis zu Teil I	207
TEIL II		
Temperaturerfassung		
1	Einleitung	211
1.1	Historischer Rückblick	211
1.2	Nichtoptische Messtechnik	212
1.3	Grundbegriffe	212
1.4	Übersicht	213
2	Thermografie	215
2.1	Verfahrensgrundlagen	215
2.2	Messverfahren der Thermografie	216
2.2.1	Wichtige Einflussgrößen bei thermografischen Messungen	217
2.2.1.1	Emissionsgrad	217
2.2.1.2	Atmosphäreneinfluss bei thermografischen Messungen	219
2.2.1.3	Einfluss von Strahlungsquellen bei thermografischen Messungen	219
2.2.1.4	Aufbau einer modernen Thermografiekamera	220
2.2.1.5	Einfluss der Auflösung einer Thermografiekamera	220
2.2.1.6	Kalibrierung	221

2.3	Anwendungsbeispiele der Thermografie	221
2.3.1	Bauthermografie	222
2.3.2	Thermografische Untersuchung von Elektrobauteilen	223
2.3.3	Thermografische Untersuchung einer Großraumpumpe	223
2.3.4	Thermografische Untersuchung von Elektroanlagen	224
2.3.5	Thermografie in der vorbeugenden Instandhaltung	225
2.3.6	Automatische Zustandsüberwachung von Gießpfannen (Transport von Flüssigstahl)	227
2.3.7	Steuerung der Temperaturverteilung in Druckgussformen	231
2.3.8	Steuerung der Temperaturverteilung bei Thermoformingprozessen	232
2.3.9	Kontrolle von Bierfässern	232
2.3.10	Detektion von Mikroleckagen	233
2.3.11	Erfassung der Temperaturverteilung bei Überwachungsaufgaben	234
2.3.12	Schlackedetektion	235
2.3.13	Detektion von Reststoffen in Edelstahlformen	236
2.3.14	Wahrnehmung menschlicher Gefühle	237
2.3.15	Thermografische Untersuchungen der Zerspanzone	239
2.3.16	Wärmebildkameras im Bereich der Brennstoffzellen- und Batterietechnologie	241
3	Pyrometrie	243
3.1	Verfahrensgrundlagen	243
3.2	Messverfahren der Pyrometrie	243
3.2.1	Bauarten der Pyrometer	244
3.2.2	Einfluss des Messabstands auf pyrometrische Messungen	246
3.2.3	Kalibrierung	248
4	Faseroptische Temperaturmessung	249
4.1	Verfahrensgrundlagen	249
4.2	Messverfahren der faseroptischen Temperaturmessung	250
4.2.1	Integriertes faseroptisches Messsystem (DTS) mit Messung der Raman-Streuung	251
4.2.2	Integriertes faseroptisches Messsystem (DTS) mit Messung der Rayleigh-Streuung	252
4.2.3	Faseroptische Temperaturmessung mit Faser-Bragg-Gittern	253
4.2.4	Kombination aus faseroptischer und pyrometrischer Temperaturmessung	254
4.2.5	Thermochrome faseroptische Temperaturmessung	255
4.2.6	Weitere faseroptische Messprinzipien	256
5	Literaturverzeichnis zu Teil II	257
TEIL III		
Strömungsuntersuchung		
1	Einleitung	261
1.1	Historischer Rückblick	261
1.2	Nichtoptische Messtechnik	262

1.3	Übersicht	263
1.4	Dopplereffekt	263
2	Laser-Doppler-Anemometrie (LDA/LDV)	265
2.1	Verfahrensgrundlagen	265
2.2	Messverfahren der LDA	266
2.2.1	Zweistrahl-Laser-Doppler-Anemometrie	267
2.2.2	Referenzstrahl-Laser-Doppler-Anemometrie	268
2.2.3	Weitere Laser-Doppler-Anemometrie-Ausführungen	269
3	Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA)	270
3.1	Verfahrensgrundlagen	270
3.2	Messverfahren der PDA	270
4	Laser-2-Fokus Anemometrie (L2F)	272
4.1	Verfahrensgrundlagen	272
4.2	Messverfahren der L2F	272
5	Particle Image Velocimetry (PIV)	275
5.1	Verfahrensgrundlagen	275
5.2	Messverfahren der Particle Image Velocimetry	276
5.3	Anwendungsbeispiele	278
5.3.1	Anwendung des Verfahrens PIV in der Motorenentwicklung	278
5.3.2	Anwendung des Verfahrens PIV in der Fluidmechanik	279
6	Particle Tracking Velocimetry (PTV)	281
6.1	Verfahrensgrundlagen	281
6.2	Messverfahren der Particle Tracking Velocimetry	281
7	Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)	284
7.1	Verfahrensgrundlagen	284
7.1.1	Messverfahren der laserinduzierten Fluoreszenz	284
7.2	Anwendungsbeispiele	285
7.2.1	Anwendung des Messverfahrens LIV bei Untersuchung von Zerstäubungsprozessen	285
7.2.2	Anwendung des Messverfahrens PLIF bei Untersuchung von Verbrennungen	287
8	Doppler Global Velocimetry (DGV)	288
8.1	Verfahrensgrundlagen	288
8.2	Messverfahren der Doppler Global Velocimetry	288
9	Sonstige Verfahren zur Untersuchung von Fluidströmungen	290
9.1	Global Phase Doppler (GPD), Interferometric Particle Imaging (IPI)	290

9.2	Teilchenbasierte Stoß-Visualisierung (TSV)	291
9.3	Filtered Rayleigh Scattering (FRS)	291
9.4	Anwendungsbeispiele der Verfahren IMI (Interferometric Mie Imaging) und Shadow bei Untersuchung von Partikeln	292
9.5	Sonderverfahren – Interferometrische Mehrwellenlängen-Kinematografie	293
10	Literaturverzeichnis zu Teil III	294
TEIL IV		
Optische Untersuchung mechanischer Schwingungen und Bewegungsanalyse		
1	Einleitung	297
1.1	Historischer Rückblick	297
1.2	Nichtoptische Messtechnik	298
1.3	Übersicht	298
1.4	Grundbegriffe	298
1.4.1	Mechanische Schwingung	299
1.4.2	Darstellung von Schwingungen	300
1.4.3	Übertragungsfunktion	300
1.4.4	Messen von Schwingungen	301
2	Laservibrometrie	303
2.1	Verfahrensgrundlagen	303
2.2	Messverfahren der Vibrometrie	304
3	Bildkorrelation	305
3.1	Verfahrensgrundlagen	305
3.2	Messverfahren der Bildkorrelation	306
3.3	Anwendungsbeispiele für die Bildkorrelation zur Schwingungsmessung	309
4	Holografie zur Schwingungsmessung	311
4.1	Verfahrensgrundlagen	311
4.2	Messverfahren der Holografie	311
4.2.1	Elektronische Speckle-Pattern-Interferometrie (ESPI)	313
4.2.2	Erweiterung der klassischen Holografie auf dynamische Schwingungsanalyse	316
5	Bildbasierte Schwingungsanalyse und Videostroboskopie	318
5.1	Verfahrensgrundlagen	318
5.2	Messverfahren der Videostroboskopie und der bildbasierten Schwingungsanalyse	319
5.3	Anwendungsbeispiele der bildbasierten Schwingungsanalyse und der Videostroboskopie ..	320
5.3.1	Vibrationsanalyse an einer Elektronikplatine	320
5.3.2	Prüfung der Rotorblätter von Windenergieanlagen	320
5.3.3	Hochgeschwindigkeitsmessung von Radbewegungen	322

6	Shearografie zur Schwingungsmessung	325
6.1	Verfahrensgrundlagen	325
6.2	Verfahren der Shearografischen Schwingungsmessung	326
6.3	Anwendungsbeispiel der Shearografischen Schwingungsanalyse	328
7	Faseroptische Schwingungsmessung	331
7.1	Verfahrensgrundlagen	331
7.2	Verfahren der faseroptischen Schwingungsmessung	332
8	Literaturverzeichnis zu Teil IV	333
TEIL V		
Oberflächenanalyse		
1	Einleitung	337
1.1	Historischer Rückblick	337
1.2	Mechanische Grundlagen	338
1.2.1	Oberflächenrauheit, Form- und Lagetoleranzen	338
1.2.2	Rauheitskenngrößen	339
1.2.3	Übersicht der Normen	350
1.3	Nichtoptische Messtechnik	350
2	Optische Verfahren vs. taktile Verfahren	353
2.1	Messbereich/Messgenauigkeit der optischen Verfahren	354
2.2	Typische Anwendungen der Verfahren	354
2.3	Übersicht der optischen Verfahren	354
3	Streulichtverfahren zur Oberflächenanalyse	356
4	Weißlichtinterferometrie zur Oberflächenanalyse	357
5	Fokusvariation zur Oberflächenanalyse	359
6	Streifenprojektion zur Oberflächenanalyse	363
7	Konfokalmikroskopie zur Oberflächenanalyse	365
8	Literaturverzeichnis zu Teil V	369

TEIL VI**Messen von mechanischen Spannungen**

1	Einleitung	373
1.1	Historischer Rückblick	373
1.2	Nichtoptische Messtechnik	373
1.3	Mechanische Grundlagen der Spannungen	374
1.4	Übersicht	376
2	Spannungsoptisches Durchlichtverfahren (klassische Spannungsoptik)	378
2.1	Verfahrensgrundlagen	378
2.2	Messverfahren der Durchlicht-SPO	379
2.3	Anwendungsbeispiele des Verfahrens der Spannungsoptik (SPO)	383
2.3.1	Untersuchung von Brillengläsern und Gestellen	383
2.3.2	Untersuchung von Kerbwirkungen und Spannungsverläufen zur Bauteiloptimierung und mechanischen Analyse	385
2.3.3	Spannungsverläufe „einfrieren“	387
2.3.4	Messung von Restspannungen in Glasflaschen	387
3	Spannungsoptisches Reflexionsverfahren	391
3.1	Verfahrensgrundlagen	391
3.2	Funktionsweise des Reflexionsverfahrens	392
3.3	Anwendungsbeispiele des Reflexionsverfahrens	393
3.3.1	Untersuchung des Spannungsverhaltens in Knochen durch Implantate	394
3.3.2	Messungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie	394
4	Thermoelastische Spannungsanalyse (TSA)	396
4.1	Verfahrensgrundlagen	396
4.2	Funktionsweise der TSA	397
4.3	Anwendungsbeispiel der TSA	398
5	Shearografie zur Messung von Spannungen	400
5.1	Verfahrensgrundlagen	400
5.2	Funktionsweise der Shearografie zur Spannungsmessung	401
6	Holografie zur Messung von Spannungen	404
6.1	Verfahrensgrundlagen	404
6.2	Funktionsweise der holografischen Spannungsmessung	405
6.3	Anwendungsbeispiel Scheibenbremsuntersuchung zur holografischen Spannungsmessung	407

7	Bildkorrelation zur Messung von Spannungen	409
7.1	Verfahrensgrundlagen	409
7.2	Funktionsweise der Bildkorrelation zur Spannungsmessung	410
7.3	Anwendungsbeispiele der Bildkorrelation	412
7.3.1	Untersuchung eines Zahnrads	412
7.3.2	Untersuchung einer Rohrzange	412
7.3.3	Untersuchung von zugbelasteten Rundproben	413
7.3.4	Untersuchung von scherbelastrerten Proben	414
7.3.5	Untersuchung von Rissen	414
8	Literaturverzeichnis zu Teil VI	416
TEIL VII		
Abstands- und Geschwindigkeitsmessung		
1	Einleitung	419
1.1	Historischer Ruckblick	419
1.2	Nichtoptische Messtechnik	419
1.3	Grundbegriffe	421
1.4	Übersicht	421
2	Interferometrische Abstands- und Geschwindigkeitsmessung	423
2.1	Verfahrensgrundlagen	423
2.2	Das Messverfahren zur interferometrischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung	424
3	Laserdistanzmessung	426
3.1	Verfahrensgrundlagen	426
3.2	Das Messverfahren zur Laserdistanzmessung	427
3.2.1	Einzelpulsmessung	427
3.2.2	Phasenvergleichsmessung	428
3.2.3	Puls-Akkumulations-Messverfahren	428
4	Lasertriangulation	430
4.1	Verfahrensgrundlagen	430
4.2	Das Messverfahren zur Lasertriangulation	431
4.3	Anwendungsbeispiele der Lasertriangulation	433
4.3.1	Vermessung von Spannstaht	433
4.3.2	Automatische Positionierung von Synchronringen	433
5	Konfokale und chromatisch-konfokale Abstandsmessung	434
5.1	Verfahrensgrundlagen	434
5.2	Das Messverfahren der konfokalen und der chromatisch-konfokalen Abstandsmessung ...	435

5.2.1	Konfokale Abstandsmessung	435
5.2.2	Chromatisch-konfokale Abstandsmessung	436
6	Radiointerferometrie	438
6.1	Verfahrensgrundlagen	438
6.2	Das Messverfahren der Radiointerferometrie	439
6.3	Astronomische Abstandsmessung	439
6.3.1	Parallaxe	440
6.3.2	Rotverschiebung	442
7	Literaturverzeichnis zu Teil VII	444
TEIL VIII		
Verformungsmessung		
1	Einleitung	447
1.1	Historischer Rückblick	447
1.2	Nichtoptische Messtechnik	448
1.3	Übersicht	449
2	Holografie zur Verformungsmessung	451
2.1	Verfahrensgrundlagen	451
2.2	Das Verfahren der Holografie	452
2.3	Anwendungsbeispiele der Holografie zur Verformungsmessung	455
2.3.1	Verformungsmessung eines Bremssattels und Vergleich mit FEM-Berechnungen	456
3	Shearografie zur Verformungsmessung	461
3.1	Verfahrensgrundlagen	461
3.2	Das Messverfahren Shearografie	462
4	Bildkorrelation zur Verformungsmessung	467
4.1	Verfahrensgrundlagen	467
4.2	Das Messverfahren Bildkorrelation	468
4.3	Anwendungsbeispiele der Bildkorrelation	470
4.3.1	Formänderungsanalyse von Umformvorgängen	470
4.3.2	Messen der Verformung von Zug-, Druck- und Biegeproben	471
4.3.3	Dynamische Verformungsmessung	473
4.3.4	Einsatz der Bildkorrelation in der Medizin	475
4.3.5	Untersuchung von Brücken mithilfe der Bildkorrelation	478
4.3.6	Einsatz der Bildkorrelation in der Fahrzeug- bzw. Luftfahrtindustrie	479
4.3.7	Untersuchung einer Flugzeugtür	481
4.3.8	360°-Untersuchung eines Druckbehälters	482

5	Streifenprojektion zur Verformungsmessung	484
5.1	Verfahrensgrundlagen	484
5.2	Das Verfahren der Streifenprojektion	485
5.3	Anwendungsbeispiele der Streifenprojektion	486
5.3.1	Untersuchung einer Membran	486
6	Photogrammetrie zur Verformungsmessung	488
6.1	Verfahrensgrundlagen	488
6.2	Das Verfahren der Photogrammetrie	489
6.3	Anwendungsbeispiele der Photogrammetrie	490
6.3.1	Untersuchung von Solarpanels	490
6.3.2	Verformungsmessung in der Klimakammer	491
6.3.3	Photogrammetrie zur Verformungsmessung in der Raumfahrt	493
7	Literaturverzeichnis zu Teil VIII	497
TEIL IX		
Detektion von Schäden		
1	Einleitung	501
1.1	Historischer Rückblick	501
1.2	Nichtoptische Messtechnik	502
1.3	Übersicht optischer Messverfahren	505
2	Terahertz	506
2.1	Verfahrensgrundlagen	506
2.2	Messverfahren für Terahertz-Strahlung	507
2.3	Anwendungsbeispiele	510
2.3.1	Erkennung verborgener Ondulationen in GFK-Materialien	510
2.3.2	Porenartige Materialdefekte in einem keramischen Kühlkörper	512
2.3.3	Untersuchung von Dichtringen in Kunststoffrohren	512
3	Thermografie	514
3.1	Verfahrensgrundlagen	514
3.2	Messverfahren der Thermografie	515
3.2.1	Passive Thermografie	517
3.2.2	Aktive Thermografie	518
3.2.3	Verfahren der aktiven Thermografie zur Überprüfung von Solarzellen	523
3.3	Anwendungsbeispiele der Thermografie zur Schadensdetektion	524
3.3.1	Detektion von Gaseinschlüssen im Schaum von Instrumententafeln (passive Thermografie)	524
3.3.2	Prüfung von Faserverbundwerkstoffen (Lockin-Thermografie)	525
3.3.3	Qualitätskontrolle an Leder (Lockin-Thermografie)	526

3.3.4	Kontrolle des Rumpfs von Flugzeugen (Lockin-Thermografie)	527
3.3.5	Inspektion von Laserschweißnähten (Puls-Thermografie)	528
3.3.6	Inspektion von Faserverbundwerkstoffen (Transienten-Thermografie)	529
3.3.7	Inspektion von Instrumententafeln (Transienten-Thermografie)	530
3.3.8	Inspektion von Turbinenschaufeln (ultraschallangeregte Thermografie)	530
3.3.9	Inspektion von Bauteilen aus Faserkeramik und aus Faserverbundwerkstoff (ultraschallangeregte Thermografie)	531
3.3.10	Prüfverfahren mit aktiver Thermografie in der Solarzellenproduktion	532
3.3.11	Thermografische Überprüfung von Faserverbundwerkstoffen (Lockin-Thermografie)	533
4	Computertomografie	535
4.1	Verfahrensgrundlagen	535
4.2	Messverfahren der Computertomografie	536
4.2.1	Erzeugung der Röntgenstrahlung	537
4.2.2	Detektion der Röntgenstrahlung	538
4.2.3	Einteilung der Röntgengeräte	540
4.3	Anwendungsbeispiele der Computertomografie	542
4.3.1	Computertomografie als Teil der Produktentwicklung	544
4.3.2	Fehler- und Maßanalyse im Leichtbau und Messdatengewinnung für Simulationen	545
4.3.3	Poren- und Restwandstärkeanalyse mittels der CT	546
4.3.4	Untersuchung von Turbinenschaufeln	547
4.3.5	Computertomografische Untersuchung von mechanischen Maschinen	547
4.3.6	Computertomografische Untersuchung von Einspritzinjektoren	547
4.3.7	Computertomografische Überprüfung von Fügenähten an Faserverbundbauteilen	549
5	Shearografie zur Detektion von Schäden	552
5.1	Verfahrensgrundlagen	552
5.2	Verfahren der shearografischen Detektion von Schäden	554
5.3	Anregungsarten zur shearografischen Fehlerdetektion	556
5.4	Anwendungsbeispiele der Shearografie zur Detektion von Schäden	565
5.4.1	Shearografische Untersuchung einer CFK-Platte	565
5.4.2	Shearografische Untersuchung von Druckleitungen	566
5.4.3	Endoskopische Untersuchung einer beschädigten Turbinenschaufel	567
5.4.4	Shearografische Inspektion von Helikopter-Rotorblättern	568
5.4.5	Shearografische Untersuchung der Windkrafträder	570
5.4.6	Shearografische Untersuchungen im Schiffbau	572
5.4.7	Automatisierte shearografische Untersuchungen in der Produktion	574
6	Holografie zur Detektion von Schäden	576
6.1	Verfahrensgrundlagen	576
6.2	Verfahren der holografischen Detektion von Schäden	577
6.3	Anwendungsbeispiel der Holografie zur Detektion von Fehlstellen	580

7	Laservibrometrie zur Detektion von Schäden	582
7.1	Verfahrensgrundlagen	582
7.2	Verfahren zur Detektion von Schäden mittels Laservibrometrie	583
7.2.1	Laservibrometrische Detektion von Fehlstellen mittels Lamb-Wellen	584
7.2.2	Detektion von strukturellen Fehlstellen mittels Laservibrometrie	585
8	Literaturverzeichnis zu Teil IX	587
TEIL X		
Normen in der optischen Messtechnik		
1	Einleitung	591
1.1	Historie, Rückblick im Bereich Normung	591
1.2	Qualitätsmanagement, Normenbezug auf die Qualität von Produkten	592
2	Basiswissen Normung	594
2.1	Normen im Alltag	594
2.2	Zuordnung von Normen	595
2.2.1	Nationale (Deutsche) Normen	595
2.2.2	Europäische Normen	595
2.2.3	Internationale Normen	596
3	Übersicht von Normen in der Messtechnik, optischen Messtechnik	597
3.1	Allgemeine Normen der Messtechnik	597
3.2	Definitionen in der optischen Messtechnik	597
3.3	Magnetpulverprüfung (optisch)	598
3.4	Koordinatenmessgeräte (optisch)	598
3.5	Bestimmung und Messung von optischen Größen	598
3.6	Optische Komponenten und Messgeräte	598
3.7	Kalibrierung von optischen Systemen	599
3.8	Herstellung optischer Komponenten	599
3.9	Qualitätskontrolle für optische Systeme	599
3.10	Sicherheit optischer Systeme	599
3.11	Allgemeine Zahlen optischer Normen	600
4	Literaturverzeichnis zu Teil X	601

TEIL XI**Laserschutz**

1	Einleitung	605
2	Gefahren von Laserstrahlung	606
2.1	Schädigung des Auges	606
2.2	Schädigung der Haut	607
2.3	Schädigungen im Umfeld von Laserstrahlung	607
3	Klassifizierung von Laserstrahlung	609
4	Rechtliche Grundlagen	611
5	Schutzmaßnahmen	613
5.1	Technische und bauliche Schutzmaßnahmen	613
5.2	Organisatorische Schutzmaßnahmen	618
5.3	Persönliche Schutzmaßnahmen	619
6	Zusammenfassung	624
	Literaturhinweis zu Teil XI:	624

TEIL XII**Optische Komponenten und Grundlagen**

1	Einleitung	629
2	Licht und Optik	630
2.1	Eigenschaften des Lichts	630
2.2	Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes	631
2.3	Beugung	632
2.4	Brechung	632
2.5	Reflexion	634
2.6	Polarisation	635
2.6.1	Linear polarisiertes Licht	635
2.6.2	Unpolarisiertes Licht	636
2.6.3	Zirkular und elliptisch polarisiertes Licht	636
2.6.4	Polarisatoren	636
3	Optische Bauelemente	639
3.1	Linsen	639
3.2	Spiegel	644
3.3	Prismen, Reflexionsprismen	644

3.4	Okulare	648
3.5	Blende	649
3.6	Objektive	650
3.7	Strahlteiler	651
3.7.1	Geometrische Strahlteiler	651
3.7.2	Physikalische Strahlteiler	651
3.7.3	Periodische Strahlteiler	652
3.8	Fassungen optischer Bauelemente	652
3.8.1	Fassungsarten	653
3.8.2	Konstruktionsgrundsätze für das Fassen optischer Bauelemente	653
3.8.3	Gläseraufnahmen, Halterungen verschiedenster Art	654
3.9	Glasfaserkabel (Lichtwellenleiter LWL, Endoskope)	655
3.9.1	Arten von Fasern	658
3.9.2	Fügen von Lichtwellenleitern (LWL)	660
4	Lasertechnik	661
4.1	Allgemeines zur Lasertechnik	661
4.2	Stationen in der Geschichte der Lasertechnik und Optoelektronik	662
4.3	Grundlagen der Lasertechnik	662
4.3.1	Anregungsformen	663
4.3.2	Wechselwirkung von Photonen und Atomen	663
4.3.3	Absorption eines Photons	664
4.3.4	Ionisation eines Atoms	664
4.4	Laser und Lasersysteme	666
4.4.1	Prinzipieller Aufbau eines Lasers	666
4.4.2	Festkörperlaser	667
4.4.3	Gaslaser	670
4.4.4	Flüssigkeitslaser	672
4.4.5	Weitere Laser	672
5	Grundlagen der Interferometrie	673
6	Allgemeines zu flächendeckenden Prüf- und Messverfahren, Einführung	675
7	Literaturverzeichnis zu Teil XII	677
	Stichwortverzeichnis	679

Die Autoren



Prof. Dr. Ing. Michael Schuth

ist seit 1996 als Prof. an der Hochschule Trier und Leiter des Technikums für optische Messtechnik, Konstruktion, Gerätebau und Bauteiloptimierung (OGKB). Er ist seit vielen Jahren im Projektmanagement, der Projektierung und der zeichnerischen Gestaltung in der Konzeptionierung und der 3D-CAD-Entwicklung tätig. Er leitet und moderiert seit 1998 Projektarbeiten, Teamsitzungen und Seminare von innovativen Industrieprojekten aus unterschiedlichen Branchen des Maschinenbaus und der Fahrzeugtechnik.

Als Technologiebeauftragter hat er viele Jahre auf der Schnittstelle zwischen der Industrie und der Hochschule gearbeitet. Seit 2002 ist er als Gutachter für Industrieunternehmen und für die ISB (Investitions- und Strukturbank Rheinland-Pfalz, Wirtschaftsförderung) tätig. Von 2010 bis 2012 lehrte er als Gastprofessor an der Universität Luxembourg, Fachrichtung Maschinenbau. Seit 2013 ist er als Gutachter für DFG tätig. Mitgliedschaften: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO), Normenausschuss für Materialprüfung DIN Deutsches Institut für Normung.



Dr. Ing. Wassili Buerakov

Studium des Maschinenbau an der Hochschule Trier mit Abschluss B. Eng., anschließend Masterstudium mit Abschluss M. Eng. Promotion an der Universität des Saarlandes auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und experimenteller Modalanalyse mittels optischer Messverfahren. Parallel zur Promotion Tätigkeit im Laboratorium für optische Messtechnik an der Hochschule Trier. Seit 2016 Industrietätigkeit im Bereich der Qualitätssicherung und zerstörungsfreier Werkstoffprüfung.

Firmen, die mit Praxisbeispielen im Handbuch vertreten sind

- AICON 3D Systems GmbH
- Alicona GmbH
- Ametek GmbH
- Automation Technology
- BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)
- Becker Photonik GmbH
- Carl Zeiss Automated Inspection GmbH & Co. KG
- Confovis GmbH
- Creaform
- Dantec Dynamics GmbH
- Duwe 3D AG
- Flir Systems GmbH
- FRT GmbH
- GLM Lasermeßtechnik GmbH
- GOM GmbH
- Hexagon Metrology
- Illis GmbH
- InfraTec GmbH
- Keyence
- LAMTech GmbH
- Laser 2000 GmbH
- LaVision GmbH
- Lasermet Ltd
- Limes Messtechnik und Software GmbH
- Mahr GmbH
- MEL GmbH
- Micro-Epsilon Messtechnik GmbH
- Micro-Measurements (a brand of Vishay Precision Group)
- Nano Focus
- Nikon Metrology
- OGP Messtechnik GmbH
- OptoSurf GmbH
- Steinbichler GmbH
- Stress Photonics
- SynView GmbH
- ViALUX GmbH
- Wenzel Volumetrik GmbH
- YXLON International GmbH
- Zygot GmbH
- 8tree Company

Einleitung

Optik (griechisch: *ὀπτική*) ist die Lehre vom Licht. Als Teilbereich der Physik beschreibt sie die Gesetzmäßigkeiten der Ausbreitung von Licht und dessen Wechselwirkung mit Materie. Sie ist im Folgenden von der technischen Optik unterschieden, die sich mit der Nutzbarkeit optischer Grundlagen in technischen Systemen befasst.

1 Geschichte der Optik

Die Entwicklung der Optik über einen Zeitraum von nunmehr mindestens dreitausend Jahren (Hecht 2014) beginnt mit teils irrigen Annahmen zum Sehvorgang und mündet in der jüngeren Geschichte mit der Anerkennung des Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts. Neben der Mechanik ist die Optik der wohl am frühesten erforschte und auch angewendete Zweig der Physik.

Funde belegen die Fähigkeit der Ägypter – bereits um 3000 v. Chr. – Glas für die Schmuckherstellung zu schmelzen (Bliedtner 2010). Die Entwicklung der Sandformtechnik um 1500 v. Chr. ermöglichte die Herstellung von Glashohlkörpern (Bliedtner 2010). Vor allem die Erfindung der Glasmacherpfeife um 500 v. Chr., vermutlich durch die Phönizier, bedeutete einen Entwicklungsschub in der Glasverarbeitung (Bliedtner 2010) und damit auch der Herstellung optischer Bauelemente.

Im zweiten Buch Mose 38.8 (Exodus um ca. 1250 v. Chr. (Rienecker 2013) ist von der Herstellung eines Bronzebeckens aus den „Bronzespiegeln der Frauen“ zu lesen (Hecht 2014). Und in der lateinischen Übersetzung¹ von Alhazens Schatz der Optik (Ibn-al-Haitam,

¹ Opticae Thesaurus



Bild 1 Gebündeltes Sonnenlicht reflektiert an „Spiegeln“ zur Vernichtung der feindlichen Flotte (Ibn-al-Haitam, 1572)

1572, Wilde 1838) ist eine Legende illustriert, nach der Aristoteles Konkav-Spiegelflächen zur Lichtbündelung nutzte, um die Schiffe der römischen Invasoren in Brand zu setzen² (Bild 1).

Ihren Ursprung nimmt die wissenschaftliche Form der Optik im antiken Griechenland. Nach der Sehstrahltheorie von Pythagoras von Samos (etwa 580–500 v. Chr.) (Scholl 2001) beruht der Sehvorgang auf einem Sehstrahl diskreter Länge als heiße Ausdün-

² Ein nachgestellter Versuch 2005 am MIT erbrachte keine Bestätigung der Legende. (Heilmann 2013).