

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen Bestimmung des Reflexionsgrades optischer Komponenten

Von Dr.-Ing. Christoph Fleig
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. sc. nat. Wolfgang Osten

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in
der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte
bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2003

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wieder-
gabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch
bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2003

ISBN 3-8316-0274-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Formelzeichen und Abkürzungen	11
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Hintergrund und Motivation	17
1.2 Zielsetzung der Arbeit	19
1.3 Aufbau der Arbeit	20
2 Grundlagen der Reflexion	22
2.1 Charakteristische Größen optischer Komponenten	22
2.1.1 Streustrahlung	23
2.1.2 Reflexions- und Transmissionsgrad	25
2.1.3 Absorptionsgrad	26
2.2 Fresnelsche-Gleichungen	26
2.2.1 Reflexionsgrad aus den Fresnelschen-Gleichungen	26
2.2.2 Dielektrische Materialien	28
2.2.3 Metallische Materialien	30
2.2.4 Konsequenz für die Benutzung unbeschichteter Proben	32
2.3 Beschichtung optischer Komponenten	32
2.3.1 Funktionsprinzip von dielektrischen Beschichtungen	33
2.3.2 Einfallswinkel und Polarisierung bei Beschichtungen	36
2.3.3 Qualifizierung von Beschichtungen	36
2.4 Normen in der Optikcharakterisierung	37
2.5 Zusammenfassung zu Kapitel 2	38
3 Herkömmliche Verfahren zur Reflexionsgradmessung	39
3.1 Direkte Bestimmung des Reflexionsgrades	39
3.2 Reflexionsgradbestimmung nach ISO/DIS 15368	41
3.2.1 Prinzip	41
3.2.2 Kommerzielle Realisierungen	43
3.3 Indirekte Reflexionsgradbestimmung über Absorptionsgradmessungen	44
3.3.1 Prinzip	44
3.3.2 Schwachpunkte des Verfahrens	45
3.4 Indirekte Reflexionsgradbestimmung über Transmissionsgradmessungen	47
3.5 Zerfallszeitmessung	47
3.6 Weitere Verfahren	48
3.7 Messtechnische Lücke – Bedarf an einem neuen Verfahren	48
3.8 Zusammenfassung zu Kapitel 3	49
4 Reflexionsgradbestimmung nach ISO/WD 13697	51
4.1 Aufbau	51
4.2 Messprinzip	52
4.3 Signalauswertung mit Lock-in Verstärkern	53
4.3.1 Signalverarbeitung und -auswertung im Lock-in Verstärker	53

4.3.2	Signaldemodulation bei der Reflexionsgradmessung	55
4.4	Auswahl der Komponenten und Diskussion der Fehlereinflussgrößen	61
4.4.1	Laser	62
4.4.2	Strahlanpassung und -aufbereitung	63
4.4.3	Chopperblatt	65
4.4.4	Choppereinheit	67
4.4.5	Ulbrichtkugel	68
4.4.6	Homogenisierung	70
4.4.7	Speckle-Unterdrückung	70
4.5	Kalibrierung der Chopperblätter	72
4.5.1	Externe Vermessung des Chopperblattes	72
4.5.2	Nutzung einer Referenzprobe	73
4.5.3	Selbstkalibrierung des Aufbaus nach ISO/WD 13697	73
4.6	Zusammenfassung zu Kapitel 4	79
5	Experimentelle Ergebnisse	80
5.1	Realisierung des Aufbaus	80
5.2	Maßnahmen zur Reduzierung der Messunsicherheit	83
5.2.1	Leistungsschwankungen des Lasers	83
5.2.2	Rotation der Streuscheibe	84
5.2.3	Unterdrückung der Pumpstrahlung	86
5.2.4	Frequenzmodulation des Lasers	87
5.2.5	Zeitkonstante und aktive Fläche der Photodiode	88
5.2.6	Rotierender Spiegel als Alternative zur Streuscheibe	90
5.3	Untersuchungen zur Wiederholpräzision	92
5.3.1	Reproduzierbarkeit	92
5.3.2	Messunsicherheit als Funktion des Reflexionsgrades	93
5.4	Kalibrierung der Chopperblätter	95
5.4.1	Kalibrierung unter Einsatz mehrerer Chopperblätter	95
5.4.2	Kalibrierung mit Master-Slave-Phasenkopplung	97
5.4.3	Kalibrierung mit nur einem Chopperblatt	99
5.5	Zusammenfassung zu Kapitel 5	101
6	Konzepte zur Erweiterungen des Messaufbaus	102
6.1	Transmissionsgradbestimmung	102
6.1.1	Realisierung des Aufbaus	102
6.1.2	Justage der Probe	103
6.1.3	Messunsicherheit	104
6.2	Winkelaufgelöste Reflexionsgradbestimmung	105
6.2.1	Realisierung des Aufbaus	105
6.2.2	Polarisationseinstellung	106
6.2.3	Messunsicherheit	108
6.3	Ortsaufgelöste Reflexionsgradmessungen	108
6.3.1	Aufbau	108
6.3.2	Messunsicherheit	110
6.4	Reflexionsgradmessung mit identischen Strahlweglängen	110
6.4.1	Realisierung des Aufbaus	110
6.4.2	Messunsicherheit	112
6.5	Zusammenfassung zu Kapitel 6	113

7	Round Robin Experiment zur Reflexionsgradbestimmung bei 1064 nm	114
7.1	Teilnehmer	115
7.2	Proben	115
7.3	Probentransport und -reinigung	115
7.4	Ablauf des Experiments	116
7.5	Erkenntnisse aus den Vorabuntersuchungen	116
7.5.1	Homogenität der Probenoberfläche	117
7.5.2	Homogenität der Beschichtungscharge	119
7.5.3	Ursachen inhomogener Beschichtungen	120
7.5.4	Konsequenzen aus den Inhomogenitäten für das Round Robin Experiment	122
7.6	Problematik der indirekten Reflexionsgradbestimmung	122
7.7	Diskussion der Ergebnisse	123
7.7.1	Hochreflektierende Proben	125
7.7.2	Reflexionsgrad 20%	126
7.8	Zusammenfassung zu Kapitel 7	127
8	Zusammenfassung	129
9	Literatur	133
10	Anhang	141
10.1	Grundlegende Überlegungen zur Durchführung von Messungen	141
10.1.1	Ziel von Messungen	141
10.1.2	Anforderungen an ein Messverfahren	143
10.1.3	Messfehler	144
10.1.4	Qualifizierung eines Messverfahrens	145
10.2	Round Robin Experimente als methodisches Werkzeug	147
10.2.1	Auswahl der Partner	147
10.2.2	Intralabor-Untersuchungen	148
10.2.3	Durchführungsoptionen von Round Robin Experimenten	149
10.2.4	Auswertung bei Round Robin Experimenten	151

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Optische Komponenten stellen wesentliche Bestandteile von Lasersystemen dar. Bei der Erzeugung von Laserstrahlung beeinflussen die Resonatorspiegel mit ihren Eigenschaften die Beugungsmaßzahl, die auskoppelbare Leistung und damit die mögliche Verwendung der Strahlung [Eic 98, Kne 89]. Bei der Führung der Laserstrahlung zum Verwendungsort kommen optische Komponenten zum Einsatz, sei es als Bestandteile eines Strahlführungssystems oder zur Einkopplung der Strahlung in eine Faser. Am Verwendungsort der Strahlung wird diese durch optische Komponenten wie z.B. Fokussieroptiken an die Erfordernisse der jeweiligen Anwendung angepasst.

Laserverfahren müssen sich in ihren Anwendungsgebieten an konventionellen Verfahren messen lassen [Eic 91, Nie 96]. Dabei werden die zweifelsohne vorhandenen Vorteile der Lasertechnologie gegenüber anderen Technologien, wie z.B. die berührungslose und kraftfreie Energieeinkopplung [Hüg 92], den kostenmäßigen Nachteilen gegenübergestellt, welche hauptsächlich in geringen Wirkungsgraden und hohen Anschaffungs- und laufenden Kosten begründet sind [Dau 95]. Ziel der aktuellen Entwicklungsarbeiten ist es, diese Nachteile zu reduzieren. Dabei kommt der Optimierung der verwendeten optischen Komponenten durch geeignete Beschichtungen eine entscheidende Bedeutung zu.

Der Scheibenlaser als innovatives neues Laserkonzept zum Beispiel beruht auf schwach verstärkenden laseraktiven Medien [Kar 00]. Ein Anschwingen dieses Lasers ist nur bei ausreichend hochreflektierenden Resonatorspiegeln und damit geringen Auskoppelgraden möglich [Iff 90, Tra 68]. Zur Herstellung optischer Komponenten steht nur eine begrenzte Zahl verwendbarer Grundsubstrate zur Verfügung [Frö 97], mit denen sich selten hohe Reflexionsgrade erzielen lassen. So hat eine Grenzfläche Luft-Glas einen Reflexionsgrad von 4%, was für eine Benutzung als Reflektor deutlich zu wenig, für eine Linse aber zu viel ist. Ein geeignetes Mittel, um je nach Anwendungsfall ausreichend hohe Ver- oder Entspiegelungen zu erreichen, ist die Verwendung von optischen Ein- und Vielfachbeschichtungen auf den Grenzflächen. Die Optimierung von Lasersystemen geht daher einher mit der Optimierung dieser Beschichtungen. Nach dem heutigen Stand der Technik leidet diese Optimierung darunter, dass die realisierten Beschichtungsergebnisse nicht direkt mit kleiner Messunsicherheit messbar sind. Eine iterative Beschichtungsoptimierung durch eine

unmittelbare, genaue und präzise Charakterisierung der Beschichtungsergebnisse und eine sofortige Rückkopplung auf den Beschichtungsprozess ist daher nicht möglich.

Die Wechselwirkung zwischen einer optischen Komponente und Laserstrahlung lässt sich durch die vier Größen Reflexion, Transmission, Streuung und Absorption charakterisieren. Für die beiden letzten Größen stehen international verifizierte Standardmessverfahren zur Verfügung [Iso 99b, Iso 00]. Diese Größen stellen im allgemeinen Verlustgrößen dar, die man zu minimieren versucht. Im Gegensatz dazu sind Reflexions- und Transmissionsgrad Größen mit meist gewünscht hohen Werten. Ein Strahlumlenker in einem Strahlführungssystem sollte möglichst alle einfallende Strahlung reflektieren, um Verluste von teurer Laserleistung und damit die Verschlechterung des Wirkungsgrades klein zu halten. Gleiches gilt für die Fokussierlinse in einem Bearbeitungskopf, deren Transmissionsgrad und damit die zur Verfügung stehende Leistung möglichst hoch sein sollte. Kritisch für eine Anwendung ist, wenn die nicht reflektierte bzw. transmittierte Leistung absorbiert wird und es dadurch zu einer thermisch induzierten Verformung der optischen Komponenten kommt. Daraus können Veränderung der Fokuslage und des Fokusedurchmesser der Strahlung resultieren, die die geplante Laseranwendung unmöglich macht.

Für die Bestimmung des Reflexions- und Transmissionsgrades existieren bereits zwei Normentwürfe: ISO/DIS 15368 [Iso 99a] und ISO/WD 13697 [Iso 97]. Ersterer ist bereits in einer Vielzahl von kommerziellen Geräten realisiert, doch die mit ihm erreichbare Messunsicherheit ist für viele Anwendungen unzureichend. Der zweite Entwurf verspricht eine Reduktion der Messunsicherheit, die experimentelle Basis hierzu ist jedoch bis heute sehr gering. Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer veröffentlichter Verfahren, die sich aufgrund ihres beschränkten Anwendungsgebiets nicht in einem Normentwurf niedergeschlagen haben.

Ein in der Vergangenheit oft genutztes Verfahren zur Bestimmung des Reflexionsgrades war dessen indirekte Bestimmung über eine Absorptionsgradmessung. Grundvoraussetzung für dieses Vorgehen ist die Annahme, dass sowohl Streuung als auch Transmission vernachlässigbar sind und damit der Reflexionsgrad über den Energieerhaltungssatz aus dem Absorptionsgrad bestimmt werden kann. Dieses Vorgehen ist für die bei der CO₂-Wellenlänge typischerweise genutzten Kupferspiegel gerechtfertigt und liefert genaue Ergebnisse, da mit ISO 11551 ein zuverlässiges Messverfahren zur Bestimmung des Absorptionsgrades für diesen Wellenlängenbereich vorliegt.

Mit der Weiterentwicklung der Lasertechnologie von Lasern im MIR hin zu kürzeren Wellenlängen im NIR, VIS und UV wird die Charakterisierung optischer Komponenten jedoch komplexer [Ris 00a]. Es zeigt sich, dass bei der Anwendung des

Standardmessverfahrens zur Bestimmung des Absorptionsgrades [Iso 00] zunehmend Probleme aufgrund der bei kürzeren Wellenlängen typischerweise schlecht wärmeleitenden Proben [Obr 97] auftreten. Des weiteren nimmt die Streuung mit abnehmender Wellenlänge zu und ist nicht mehr vernachlässigbar, so dass eine indirekte Bestimmung des Reflexionsgrades über eine Absorptionsmessung ausgeschlossen ist. Damit steht der Optikcharakterisierung bei kürzeren Wellenlängen keine etabliertes und genaues Messverfahren zur Bestimmung des Reflexionsgrades zur Verfügung.

Eine Studie [Din 00] hat jedoch die Wichtigkeit der entwicklungsbegleitenden Normgebung verdeutlicht, wonach für den wirtschaftlichen Erfolg neuer Technologien ein frühzeitig vorhandenes Normengerüst und Repertoire an Standardmessverfahren mit die wichtigsten Einflussfaktoren sind. Diesem Aspekt trägt die Forschungspolitik in Deutschland seit Mitte der neunziger Jahre durch Förderung des CHOCLAB-Projektes (Choclab: „**CH**aracterisation of **Optical** **C**omponents and **LA**ser **B**eams“) – in dessen Rahmen auch die vorliegende Arbeit entstand - Rechnung, dessen Inhalt die nachhaltige und aktive Unterstützung der internationalen Normgebung für die Lasertechnologie ist [Cho 00b, Gin 00, Röh 00].

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Mit dieser Arbeit soll zunächst ein Überblick über den Stand der Normgebung im Bereich der Optikcharakterisierung gegeben werden, aus dem sich dann die Notwendigkeit eines Standardverfahrens für die hochgenaue und hochpräzise Reflexions- und Transmissionsgradmessung von HR-Proben ableiten lässt. Die für die Reflexionsgradmessung vorhandenen Normentwürfe ISO/WD 15368 und insbesondere ISO/WD 13697 werden mit bestehenden Messverfahren verglichen. Experimentelle Untersuchungen sollen die Möglichkeiten und Grenzen dieser Normentwürfe aufzeigen. Für erkennbare Schwächen der Entwürfe sollen alternative Vorgehensweisen erörtert werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Beurteilung eines Messverfahrens ist, inwiefern absolutgenaue Messungen möglich sind. In der vorliegenden Arbeit wird die Möglichkeit der absolutgenauen Kalibrierung des Messaufbaus nach ISO/WD 13697 untersucht. Dabei werden neben der im Normentwurf vorgeschlagenen Kalibrierung alternative Vorgehensweisen evaluiert, wobei neben der erreichbaren Genauigkeit auch der materielle und zeitliche Aufwand wichtige Beurteilungskriterien darstellen.

Anhand der Ergebnisse eines Round Robin Experiments, bei dem Partner aus der Industrie und dem Hochschulbereich Reflexionsgradmessungen durchführten, soll der gegenwärtige Stand der Technik für Reflexionsgradmessungen kritisch untersucht und

das Verbesserungspotenzial durch Einführung des Normentwurfs ISO/WD 13697 als Standardverfahren aufgezeigt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Schwerpunkt der Arbeit werden Untersuchungen zur Reflexionsgradmessung sein. Transmissionsgradmessungen sind eng damit verknüpft und lassen sich meist mit nur geringen Änderungen in den Aufbauten zur Reflexionsgradmessung durchführen. Zur leichteren Lesbarkeit der Arbeit wird deshalb die Diskussion auf Reflexionsgradmessungen beschränkt und an geeigneter Stelle auf die erforderlichen Modifikationen für eine Transmissionsgradmessung hingewiesen.

Zu Beginn der Arbeit werden die für die Optikcharakterisierung wesentlichen Begriffe vorgestellt und gegeneinander abgegrenzt. Nach einer kurzen Vorstellung der Fresnelschen-Gleichungen und typischer Substratmaterialien wird die Notwendigkeit und das Funktionsprinzip von Beschichtungen erläutert.

Inhalt des dritten Kapitels ist die Vorstellung und Bewertung gängiger Verfahren zur Reflexionsgradbestimmung. Daraus wird dann die Notwendigkeit eines Verfahrens abgeleitet, wie es im Normentwurf ISO/WD 13697 realisiert ist.

Dieses Verfahren wird in Kapitel vier vorgestellt, wobei mögliche Schwachpunkte des Verfahrens analysiert und Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden.

Im fünften Kapitel werden experimentelle Ergebnisse für die Wellenlänge $1,064\ \mu\text{m}$ präsentiert. Dabei nehmen Untersuchungen zur erreichbaren Präzision und Genauigkeit eine zentrale Rolle ein. Die Ergebnisse zur absolutgenauen Kalibrierung werden ausführlich diskutiert.

In Kapitel sechs werden Ergänzungen bzw. Modifikation zum Aufbau nach ISO/WD 13697 diskutiert, die u.a. Transmissionsgradmessungen und winkelaufgelöste Messungen erlauben.

Die Ergebnisse eines Round Robin Experimentes zur Bestimmung des Reflexionsgrades werden im siebten Kapitel vorgestellt, aus denen sich Schlüsse über die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Verfahren ableiten lassen.

In der abschließenden Zusammenfassung wird gezeigt, dass der Normentwurf ISO/WD 13697 durch seine Flexibilität große Teile des Bedarfs an Reflexionsgradmessungen abdecken kann und damit eine momentan vorhandene messtechnische Lücke zu schließen vermag. Es wird ein Vorschlag präsentiert, wie die aktuelle Praxis der Reflexionsgradbestimmung qualitativ verbessert werden kann.

Die für das Verständnis der Arbeit und die Qualifizierung der Messverfahren essentiellen Begriffe wie z.B. Präzision und Genauigkeit werden im Anhang definiert und gegeneinander abgegrenzt. Grundsätzliches zu Round Robin Experimenten wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit von Kapitel 7 im Anhang erläutert.