

# **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 Polarisation 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	Winkelauflöste 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 Fokusdurchmesser 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 Anwendungsbereichs 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 CO<sub>2</sub>-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 etablierte und genaue 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: „CHaracterisation of Optical Components and LAser Beams“) – 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 Experiments 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.