

Kapitel 1

Einleitung

Laser werden heute in vielen Anwendungsfeldern eingesetzt. Neben dem Anwendungsschwerpunkt in der Materialbearbeitung eröffnen sich mit modernen Lasern neue Einsatzfelder, wie z. B. die Medizin, die Mess- und Sensortechnik oder die Displaytechnologie. Zukünftig besitzen vor allem die optisch angeregten Festkörperlaser ein großes Anwendungspotenzial. Der Grund dafür ist die Verfügbarkeit von neuen leistungsfähigen Laserkristallen und von leistungsstarken Halbleiterdiodenlasern, die zur effizienten optischen Anregung genutzt werden. Eine wichtige Voraussetzung für die Fertigung von Lasersystemen sind optische Komponenten geprüfter Qualität. Während für Halbleiterlaser aussagekräftige Prüfverfahren eingesetzt werden, gibt es für Laserkristalle bisher keine Messvorschriften und Modelle, die vorab eine hinreichend genaue Beurteilung der Qualität der Kristalleigenschaften zulassen. Für die Definition entsprechender Prüfungskriterien ist es entscheidend, zunächst die qualitätsrelevanten Eigenschaften zu identifizieren. Daraufhin müssen die Ursachen und die Wirkung auf den Laserprozess der identifizierten Eigenschaften quantitativ beschrieben werden. Damit ist einerseits eine gezielte Optimierung der Kristallzüchtung und andererseits die Definition von Qualitätskriterien möglich.

Wesentliche Voraussetzung für die Untersuchung optischer Eigenschaften und deren Ursachen ist die Entwicklung von Verfahren, die eine präzise, quantitative und räumlich zweidimensional aufgelöste Messung der relevanten Größen ermöglichen. Von V. Wesemann [2] wurden aus diesem Grund bisher veröffentlichte Messmethoden zur Untersuchung der Doppelbrechung und der Homogenität des Brechungsindex der Kristalle, bezüglich der Genauigkeit und der räumlichen Auflösung, optimiert. Erst dadurch waren systematische, räumlich aufgelöste Messungen und ein quantitativer Vergleich der gemessenen Parameter möglich. In den bis dahin veröffentlichten Arbeiten zur Charakterisierung von Kristallen [3, 4, 5, 6] wurden nur zum Teil quantitative Messungen geringer Empfindlichkeit vorgenommen, und es erfolgte kein Vergleich der gemessenen Eigenschaften. Diese Verfahren wurden von G. Bitz [7], unter anderem zum Nachweis der Abhängigkeit von Schwelle und differentiellem Wirkungsgrad in Nd:YAG von optischen Eigenschaften, verwendet. Nachgewiesen wurde die Abhängigkeit von

der Spannungsdoppelbrechung in Resonatoren mit polarisierendem Element und der Einfluss von Inhomogenitäten des Brechungsindex, d.h. dass die Doppelbrechung und die Homogenität des Brechungsindex entscheidende Größen für die Beurteilung der Kristallqualität sind. Ein entscheidender Unterschied zwischen Laserkristallen und anderen optischen Komponenten (Linsen, Spiegelsubstrate etc.), die in sehr guter Qualität hergestellt werden können, ist die Dotierung der Laserkristalle. Durch den Einbau von Dotierungsionen wird die chemische Zusammensetzung und das Kristallgitter des Kristalls verändert, womit im Allgemeinen auch eine Änderung der optischen Eigenschaften verbunden ist. Variiert die räumliche Verteilung der Dotierungsionen im Kristall, werden auch die optischen Eigenschaften räumlich variieren. Dieser Zusammenhang zwischen den optischen Eigenschaften und der räumlichen Verteilung der Dotierungskonzentration in Nd:YAG ist bisher nicht quantitativ untersucht.

Der wissenschaftliche Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher auf der Untersuchung und quantitativen Beschreibung der Ursachen für die Spannungsdoppelbrechung und die Brechungsindexinhomogenitäten in dotiertem YAG.

Hierzu ist es notwendig, sehr präzise die Konzentration und die Verteilung der Dotierungsionen bestimmen zu können. Herkömmliche Methoden der Dotierungsbestimmung sind für diese Aufgabe unbrauchbar. Chemische Analysen ermöglichen zwar hinreichende Genauigkeiten, sind aber im Allgemeinen nicht zerstörungsfrei und liefern nur Mittelwerte über den gesamten analysierten Kristall. Aus diesem Grund wurde ein Messverfahren [1] entwickelt, das die Dotierungskonzentration mit hoher Genauigkeit und hoher räumlicher Auflösung (bis zu $50\mu\text{m}$) räumlich aufgelöst bestimmen kann. Dieses Verfahren basiert auf einer Bestimmung der Fluoreszenzlebensdauer des oberen Laserniveaus von Nd:YAG. Die Fluoreszenzlebensdauer ist durch den Effekt des Fluoreszenzquenching mit der Dotierungskonzentration verknüpft und kann daher zur quantitativen Bestimmung der Dotierungskonzentration verwendet werden.

Mit den entwickelten Verfahren können die relevanten Materialeigenschaften (Dotierungskonzentration, Schlieren und Doppelbrechung) präzise räumlich aufgelöst bestimmt werden.

Auf dieser Basis wird ein Modell zur Beschreibung von Spannungen durch räumliche Inhomogenitäten der Dotierungskonzentration entwickelt. Dieses Modell ermöglicht es, durch eine Finite-Elemente-Rechnung aus der räumlich aufgelösten experimentellen Bestimmung der Dotierungskonzentration den Spannungstensor für jeden Kristallpunkt zu berechnen. Damit kann die spannungsinduzierte Doppelbrechung in Nd:YAG erstmals quantitativ aus einer räumlich aufgelösten Bestimmung der Dotierungskonzentration vorhergesagt werden. Das Modell wird durch einen quantitativen Vergleich der aus der Verteilung der Dotierungskonzentration gewonnenen Vorhersagen mit räumlich aufgelösten Messungen der Doppelbrechung verifiziert und weiterentwickelt.

Zusätzlich zu den durch die Verteilung der Dotierungskonzentration verursachten Spannungen, treten Spannungen an Kernen und Wachstumsfacetten auf (siehe B. Cockayne et al. [8], H.L. Glass [9], M. Allibert [10] und K. Kitamura et al. [11, 12]). In der genannten Literatur

wurden die Ursachen für diese Spannungen diskutiert und ein quantitatives Modell für die maximale Spannung in undotierten Kristallen unter vereinfachten Annahmen abgeleitet. Für ein Verständnis der Spannungsverteilung in kompletten Boulescheiben ist neben der maximalen Spannung auch die räumliche Spannungsverteilung notwendig. Diese kann durch die vereinfachten Annahmen in dem Modell nur unzureichend beschrieben werden, da weder die reale Geometrie der Kerne, noch weitere Ursachen für Spannungen berücksichtigt werden können. Aus diesem Grund wurde das in dieser Arbeit entwickelte Modell dahingehend erweitert, die Kerne und ihre Form in der Spannungsberechnung zu berücksichtigen.

Die zweite wesentliche Größe für die Qualität eines Kristalls ist die Homogenität des Brechungsindex. Die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Dotierungskonzentration eines Festkörpers ist für einige Kombinationen aus Wirtskristall und Dotierung in der Literatur zu finden. Entsprechende Experimentelle Untersuchungen für Nd:CaF₂ und Nd:Glass wurden von R. Gunter et al. [13] und für Nd:YAlO₃ von K.W. Martin [14] publiziert. Vergleichbare Untersuchungen an Nd:YAG wurden meines Wissens nach bisher nicht durchgeführt. Ein Nachteil dieser Untersuchungen ist, dass der Brechungsindex jeweils an einer Stelle der Probe untersucht wurde. Räumliche Variationen der Dotierungskonzentration wurden nicht berücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen der Variation der Dotierungskonzentration und der Homogenität des Brechungsindex in Nd:YAG wird in dieser Arbeit erstmals quantitativ untersucht.

Basierend auf den Modellen und experimentellen Untersuchung in dieser Arbeit werden die optischen Eigenschaften der Laserkristalle mit bestehenden Normen (DIN/ISO 10110: „Optik und optische Instrumente, Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme“ [15]) für passive optische Komponenten (z.B. Spiegel oder Linsen) verglichen. Dadurch wird die Notwendigkeit der Erweiterung der bestehenden Norm zur Beschreibung der Laserkristalle aufgezeigt. Anhand ausgewählter Beispiele wird diskutiert, wie eine solche Erweiterung durchgeführt werden kann.

Darüberhinaus können, durch die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, die Grenzwerte bezüglich der optischen Eigenschaften der Normen auf Grenzwerte für Homogenität der Dotierungskonzentration zurückgeführt werden. Mit der Homogenität der Dotierungskonzentration wird in dieser Arbeit ein einzelner Parameter identifiziert, dessen Optimierung eine gezielte Verbesserung der Kristallzüchtung von Nd:YAG in Bezug auf die optischen Eigenschaften ermöglicht.