

Übertragung und Wechselwirkung von Laserstrahlung und Ultraschall in Glasfasern

von

**Dipl.-Ing. Désiré NGAMBIA MBAMOU
aus Tonga / West Kamerun**

**von der Fakultät V: Maschinen- und Verkehrssysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation**

Berlin 2001

D 83

Désiré Ngambia Mbamou

**Übertragung und Wechselwirkung von
Laserstrahlung und Ultraschall in Glasfasern**

Institut für Medizinische/Technische Physik und Lasermedizin
Universitätsklinikum Benjamin Franklin - FU Berlin

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Ngambia Mbamou, Désiré:

Übertragung und Wechselwirkung von Laserstrahlung
und Ultraschall in Glasfasern / Désiré Ngambia Mbamou.

Aachen : Shaker, 2002

(Medizin und Technik ; Bd. 2002, 1)

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2001

ISBN3-8322-0751-1

Copyright Shaker Verlag 2002

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-0751-1

ISSN 0948-0781

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Diese Arbeit ist

meinen Schwestern

Félicité,

Eugénie,

Audry,

Sidonie,

meinem Bruder

Robert,

meinen Eltern

Esther und

François

gewidmet.

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| 1 Einführung und Zielsetzung | 1 |
| 1.1 Einleitung zur Aufgabenstellung..... | 1 |
| 1.2 Stand der Physik, Medizin und Technik | 1 |
| 1.2.1 Physikalische Effekte zur Licht-Schallwelle-Wechselwirkung | 2 |
| 1.2.2 Ultraschalltechnik in der Medizin..... | 4 |
| 1.2.3 Lasertechnik in der Medizin | 5 |
| 1.2.4 Effekte der simultanen Übertragung in der Medizin bzw. Medizintechnik..... | 7 |
| 1.3 Aufgabenstellung mit Lösungskonzept..... | 7 |
| | |
| 2 Elastomechanik koaxial-mehrschichtiger zylindrischer Medien | 9 |
| 2.1 Werkstoffanalyse - Eigenschaften einiger Schichtmaterialien..... | 9 |
| 2.1.1 Kern- und Mantelmaterialien | 10 |
| 2.1.2 Eigenschaften einiger Coatingsmaterialien..... | 11 |
| 2.2 Hookesches Gesetz..... | 12 |
| 2.3 Elastische Untersuchung | 15 |
| 2.3.1 Dichte eines koaxial-mehrschichtigen zylindrischen Mediums $\rho_{M,n}$ | 16 |
| 2.3.2 Elastizitätsmodul eines koaxial-mehrschichtigen zylindrischen Mediums $E_{M,n}$ | 18 |
| 2.3.3 Schubmodul eines koaxial-mehrschichtigen zylindrischen Mediums $G_{M,n}$ | 20 |
| 2.3.4 Poisson-Zahl eines koaxial-mehrschichtigen zylindrischen Mediums $\nu_{M,n}$ | 22 |
| 2.4 Axiome der Mechanik | 34 |
| 2.4.1 Das erste Axiom der Mechanik: Impulssatz | 34 |
| 2.4.2 Das zweite Axiom der Mechanik: Drehimpulssatz..... | 34 |
| 2.5 Schallgeschwindigkeiten | 35 |
| 2.5.1 Schallgeschwindigkeit für Longitudinalwellen $V_{L,M,n}$ | 35 |
| 2.5.2 Schallgeschwindigkeit für Dehnungswellen $V_{D,M,n}$ | 39 |
| 2.5.3 Schallgeschwindigkeit für Transversalwellen $V_{Tr,M,n}$ | 42 |
| 2.5.4 Schallgeschwindigkeit für Torsionswellen $V_{To,M,n}$ | 46 |
| 2.5.5 Schallgeschwindigkeit für Biegewellen $V_{B,M,n}$ | 51 |
| 2.6 Diskussion zur berechneten elastomechanischen Größen | 52 |
| | |
| 3 Elektromagnetische und Akustische Wellenübertragung | 59 |
| 3.1 Elektromagnetische Wellenübertragung..... | 59 |
| 3.1.1 Optische Grundbegriffe..... | 59 |
| 3.1.2 Die elektromagnetischen konstitutiven Relationen | 61 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.3 Die Maxwellschen Gleichungen | 62 |
| 3.1.4 Maxwellsche Gleichungen zur Aufstellung der charakteristischen Gleichung | 63 |
| 3.1.5 Elektromagnetisch gespeicherte Energiedichte | 72 |
| 3.2 Akustische Wellenübertragung | 73 |
| 3.2.1 Akustische Grundbegriffe | 73 |
| 3.2.2 Grundgesetze der akustischen Wellenübertragung | 77 |
| 3.2.3 Akustische charakteristische Gleichungen und Grenzfrequenzen | 84 |
| 3.2.4 Akustisch gespeicherte Energiedichte | 94 |
| 3.2.5 Schallwellenwiderstand eines koaxial-mehrschichtigen Stabes $Z_{M,n}$ | 95 |
| 3.2.6 Maximal einzukoppelnde Schallintensität und Schalleistung..... | 100 |
| 3.3 Diskussion zur Übertragung von Licht- und Schallwellen | 102 |
| 4 Faserdesign und Wechselwirkungsparameter | 107 |
| 4.1 Faserdesign zur Simultanübertragung..... | 107 |
| 4.2 Parameter zur simultanen Wellenübertragung..... | 111 |
| 4.2.1 Materialparameter zum akustooptischen und optoakustischen Effekt..... | 111 |
| 4.2.2 Einfluss der Schallwellen auf die optische Brechzahl des Mediums..... | 113 |
| 4.2.3 Amplitude der Variation der Brechzahl..... | 115 |
| 4.2.4 Einfluss der Schallwellen auf die optische numerische Apertur | 117 |
| 4.2.5 Einfluss der Schallwellen auf die optische Wellendifferentialgleichung | 119 |
| 4.2.6 Betriebsparameter zum akustooptischen Effekt..... | 120 |
| 4.3 Tabellarische und Graphische Auswertungen der Ergebnisse | 123 |
| Tabelle 4-2. Optische numerische Apertur einiger Glasfasern | 123 |
| Tabelle 4-3. Erste akustische numerische Apertur einiger Glasfasern zur Übertragung von Longitudinalwellen | 124 |
| Tabelle 4-4. Zweite akustische numerische Apertur einiger Glasfasern zur Übertragung von Longitudinalwellen..... | 125 |
| Tabelle 4-5. Erste akustische numerische Apertur einiger Glasfasern zur Übertragung von Transversalwellen..... | 126 |
| Tabelle 4-6. Zweite akustische numerische Apertur einiger Glasfasern zur Übertragung von Transversalwellen..... | 127 |
| Tabelle 4-7. Numerische Aperturen einiger Glasfasern zur Simultanübertragung von Laserstrahlung und longitudinalen Ultraschallwellen | 128 |
| Tabelle 4-8. Numerische Aperturen einiger Glasfasern zur Simultanübertragung von Laserstrahlung und transversalen Ultraschallwellen..... | 129 |
| Tabelle 4-9. Normalisierte Parameter zur Simultanübertragung und max. Faserkernradius zur Single-Mode-Lichtübertragung | 130 |

| | |
|--|------------|
| Bild 4-1. Faserkernradius zur Single-Mode-Schallwellerübertragung bei verschiedenen Ultraschallfrequenzen in der Ultraschallchirurgie..... | 131 |
| Bild 4-2. Faserkernradius zur Single-Mode-Schallwellerübertragung bei verschiedenen Ultraschallfrequenzen in der Ultraschalltherapie | 132 |
| Bild 4-3. Faserkernradius zur Single-Mode-Schallwellerübertragung bei verschiedenen Ultraschallfrequenzen in der Ultraschalldiagnostik | 134 |
| Bild 4-4. Einfluss der Schallintensitäten in der Medizin auf die absolute Änderung der optischen Brechzahl bei longitudinalen bzw. transversalen Wellen | 135 |
| Bild 4-5. Einfluss der Schallintensitäten in der Medizin auf die absolute Änderung der optischen NA bei longitudinalen bzw. transversalen Wellen..... | 136 |
| 4.4 Diskussion über Faserdesign und die Wechselwirkungsparameter | 137 |
| 5 Analytische Wechselwirkungsuntersuchung | 139 |
| 5.1 Vorwärts kollineare Wechselwirkung | 139 |
| 5.1.1 Eindimensionale Differentialgleichung | 139 |
| 5.1.2 Analytischer Wirkungsgrad | 141 |
| 5.2 Zweidimensionale Wechselwirkung..... | 147 |
| 5.2.1 Zweidimensionale Differentialgleichung..... | 147 |
| 5.2.2 Analytischer Wirkungsgrad | 150 |
| 5.3 Dreidimensionale Wechselwirkung..... | 159 |
| 5.3.1 Kartesisches Koordinatensystem | 159 |
| 5.3.2 Zylinderkoordinatensystem..... | 167 |
| 5.3.3 Analytische Untersuchung der Sonderfälle..... | 170 |
| 5.4 Diskussion zur analytischen Wechselwirkungsuntersuchung..... | 181 |
| 6 Split-Step-Fourier-Methode zur Wechselwirkungsuntersuchung | 183 |
| 6.1 Split-Step-Fourier-Algorithmus | 183 |
| 6.2 Numerische Untersuchung der eindimensionalen Wechselwirkung | 184 |
| 6.2.1 Einführung zum eindimensionalen Split-Step-Fourier-Algorithmus..... | 184 |
| 6.2.2 Eindimensionale Lösung nach der Split-Step-Fourier-Methode | 188 |
| 6.3 Numerische Untersuchung der zweidimensionalen Wechselwirkung..... | 190 |
| 6.3.1 Einführung zum zweidimensionalen Split-Step-Fourier-Algorithmus | 190 |
| 6.3.2 Zweidimensionale Lösung nach der Split-Step-Fourier-Methode..... | 193 |
| 6.4 Numerische Untersuchung der dreidimensionalen Wechselwirkung..... | 197 |
| 6.4.1 Kartesisches Koordinatensystem | 197 |
| 6.4.1.1 Einführung zum 3D Split-Step-Fourier-Algorithmus..... | 197 |

| | |
|--|------------|
| 6.4.1.2 Dreidimensionale Lösung nach der Split-Step-Fourier-Methode | 200 |
| 6.4.2 Zylinderkoordinatensystem..... | 204 |
| 6.4.2.1 Einführung zum 3D Split-Step-Fourier-Algorithmus..... | 204 |
| 6.4.2.2 Dreidimensionale Lösung nach der Split-Step-Fourier-Methode | 207 |
| 6.5 Split-Step-Fourier-Methode zur Untersuchung der Sonderfälle | 211 |
| 6.6 Diskussion zur numerischen Wechselwirkungsuntersuchung | 223 |
| 7 Zusammenfassung mit Ausblick..... | 225 |
| 7.1 Zusammenfassung | 225 |
| 7.2 Ausblick | 226 |
| 8 Schrifttum..... | 228 |
| Anhang | 234 |
| A1 Begriffsverzeichnis..... | 234 |
| A.2 Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen..... | 235 |
| A.2.1 Große lateinische Buchstaben | 235 |
| A.2.2 Kleine lateinische Buchstaben | 236 |
| A.2.3 Große griechische Buchstaben..... | 237 |
| A.2.4 Kleine griechische Buchstaben | 237 |
| A.3 Mathematische Grundlagen | 239 |
| A.3.1 Vektorenanalyse..... | 239 |
| A.3.2 Besselsche Differentialgleichungen und Neumansche Additionsregeln..... | 241 |
| A.3.3 Fourier-Transformation | 242 |
| A.4 Danksagung | 244 |
| A.5 Lebenslauf | 245 |