

Axel Donges • Physikalische Grundlagen der Lasertechnik

Axel Donges

Physikalische Grundlagen der Lasertechnik

3. Auflage

Prof. Dr. Axel Donges (geboren 1954 in Bad König) studierte Physik an der TH Darmstadt. Heute lebt er in Isny im Allgäu, wo er an der Fachhochschule und den Berufskollegs NTA Prof. Dr. Grübler lehrt und den Fachbereich Physik und die Berufskollegs leitet. Axel Donges hält Vorlesungen aus den verschiedensten Bereichen der Physik. Sein wissenschaftliches Interesse gilt vor allem der Lasertechnik und der Didaktik der Physik.

Diejenigen Bezeichnungen von im Buch genannten Erzeugnissen, die zugleich eingetragene Warenzeichen sind, wurden nicht besonders kenntlich gemacht. Aus dem Fehlen der Markierung © kann nicht geschlossen werden, dass die Bezeichnung ein freier Warename ist. Ebenso wenig ist zu entnehmen, ob Patente oder Gebrauchsmuster vorliegen.

Der Autor hat alle Texte und Abbildungen mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Der Autor übernimmt daher weder irgendwelche Garantien für die im Buch gegebenen Informationen noch haftet er für direkte oder indirekte Schäden, die aus der Anwendung dieser Informationen folgen.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Axel Donges
Fachhochschule und Berufskollegs NTA Prof. Dr. Grübler gGmbH
Seidenstraße 12-35
88316 Isny im Allgäu

eMail: donges@nta-isny.de

Berichte aus der Lasertechnik

Axel Donges

Physikalische Grundlagen der Lasertechnik

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6392-8

ISSN 0945-084X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort zur ersten Auflage

Der vorliegende Band ist aus einer einsemestrigen Vorlesung mit zwei Semesterwochenstunden entstanden, die ich mehrmals an der Fachhochschule der Naturwissenschaftlich-technischen Akademie Prof. Dr. Grübler in Isny im Allgäu für Chemie- und Physikstudenten gehalten habe.

Es war meine Absicht, die physikalischen Grundlagen der Lasertechnik in einer elementaren Weise darzustellen. Die Fachleute mögen mir verzeihen, wenn ich teilweise die Probleme aus didaktischen Gründen allzu vereinfacht dargestellt haben sollte.

Zum Verständnis des hier behandelten Stoffes sind Grundkenntnisse in Optik, Atom- und Festkörperphysik notwendig, wie sie im Allgemeinen nach dem Abschluss des Grundstudiums (Vordiploms) vorhanden sind. Um eine in sich geschlossene Darstellung zu erreichen, werden dennoch die zum Verständnis der Laserphysik erforderlichen Grundlagen wiederholt.

Auf die vielfältigen Anwendungen des Lasers in Wissenschaft und Technik wird nicht eingegangen. Dieser Themenbereich wird in einer gesonderten, mehr technisch orientierten Vorlesung behandelt.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts bedanke ich mich bei den Herren Dr. R. NOLL (FRAUNHOFER-Institut für Lasertechnik, Aachen), Dr. C.R. HAAS und Dr. B. WEIKL (beide Lehrstuhl für Lasertechnik der RWTH Aachen).

Isny/Allgäu, im Frühjahr 1988

Axel Donges

Vorwort zur zweiten Auflage

Nachdem das Buch vergriffen war, wurde die notwendig gewordene Neuauflage genutzt, um Text und Formeln neu zu setzen. Außerdem wurden einige Tippfehler korrigiert und einige wenige Ergänzungen vorgenommen.

An der Zielsetzung des Buches hat sich nichts geändert: Es versucht, eine knappe, aber dennoch gründliche Antwort auf die Frage „*Wie funktioniert ein Laser?*“ zu geben.

Isny/Allgäu, im Frühjahr 2000

Axel Donges

Vorwort zur dritten Auflage

Im Vergleich zur zweiten Auflage wurden einige Tippfehler korrigiert. Außerdem wurden drei kleine Ergänzungen (Scheiben- und Faser-Laser, VCSEL) hinzugefügt.

Isny/Allgäu, im Sommer 2007

Axel Donges

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1. Einleitung.....	11
2. Zur Natur des Lichts	13
2.1 Welle-Teilchen Dualismus	13
2.2 Beugung	16
2.3 Kohärenz	19
2.3.1 Interferenz	19
2.3.2 Zeitliche Kohärenz	21
2.3.3 Zusammenhang Kohärenzzeit – Bandbreite	22
2.3.4 Räumliche Kohärenz	25
2.3.5 Zusammenhang Beugung – räumliche Kohärenz	27
2.3.6 Elementarbündel	29
Zusammenfassung (Kapitel 2)	30
3. Der rückgekoppelte Verstärker	33
3.1 Rückgekoppelter elektrischer Verstärker	33
3.2 Oszillator	36
3.3 Laseroszillator	37
Zusammenfassung (Kapitel 3)	38
4. Der optische Verstärker	39
4.1 Physikalische Grundlagen	39
4.1.1 Absorption und Emission von Strahlung	39
4.1.2 PLANCKSche Strahlungsformel	44
4.2 Verstärkung von Licht	47
4.3 Erzeugung des Inversionszustandes	48
4.3.1 2-Niveau-System	49
4.3.2 3-Niveau-System	50
4.3.3 4-Niveau-System	52
4.4 Superstrahler	53
4.4.1 Verstärkte spontane Emission	53
4.4.2 Stickstoff-Laser	55
Zusammenfassung (Kapitel 4)	56

5. Der Laser	57
5.1 FABRY-PEROT-Resonator.....	57
5.1.1 Aufbau	57
5.1.2 Transmissionsverhalten	58
5.1.3 Bandbreite.....	61
5.1.4 Zeitkonstante	62
5.2 Rückgekoppelter optischer Verstärker	64
5.3 Rückgekoppelter optischer Verstärker in Selbsterregung	66
5.3.1 Laserbedingungen.....	66
5.3.2 Anschwingbedingung	67
5.3.3 Longitudinales Modenspektrum	69
5.3.4 Bilanzgleichungen	72
5.3.5 Zeitliche Kohärenz	77
5.3.6 Räumliche Kohärenz	80
Zusammenfassung (Kapitel 5).....	80
6. Der nichtstationäre Laserbetrieb	83
6.1 Relaxationsschwingungen	83
6.2 Güteschaltung	89
6.3 Modenkopplung	91
6.3.1 Prinzip	91
6.3.2 Realisierung.....	96
Zusammenfassung (Kapitel 6).....	98
7. Die transversalen Moden	99
7.1 Berücksichtigung der Beugung beim FABRY-PEROT-Resonator ..	99
7.2 SVE-Näherung der Wellengleichung	102
7.3 GAUßscher Strahl	103
7.4 Transversale Grundmode stabiler Resonatoren.....	108
7.5 Symmetrischer konfokaler Resonator	112
7.6 Strahlqualität	113
Zusammenfassung (Kapitel 7).....	115
8. Spezielle Lasersysteme	117
8.1 Gas-Laser.....	117
8.1.1 He-Ne-Laser	119
8.1.2 CO ₂ -Laser	121
8.1.3 Excimer-Laser	123

8.2 Festkörper-Laser	124
8.2.1 Nd-YAG-Laser	126
8.2.2 Rubin-Laser	127
8.2.3 Vibronische Festkörper-Laser	128
8.2.4 Scheiben-Laser	129
8.2.5 Faser-Laser	130
8.3 Flüssigkeitslaser	131
8.4 Halbleiter-Laser	133
8.4.1 Bändermodell	133
8.4.2 Wechselwirkung Licht-Halbleiter	134
8.4.3 Injektions-Laser	136
8.4.3 Oberflächenemittierende Laser	140
Zusammenfassung (Kapitel 8)	141
Anhang	143
A.1 Komplexe Darstellung der harmonischen Welle	143
A.2 GAUßscher Strahl als Lösung der SVE-Wellengleichung	146
A.3 Umformung von Gleichung (7.11)	148
A.4 Phasenflächen des GAUßschen Strahls	150
A.5 Lösung des Gleichungssystems (7.27) - (7.29)	151
Verwendete Formelzeichen	153
Literaturverzeichnis	157
Sachwörterverzeichnis	161