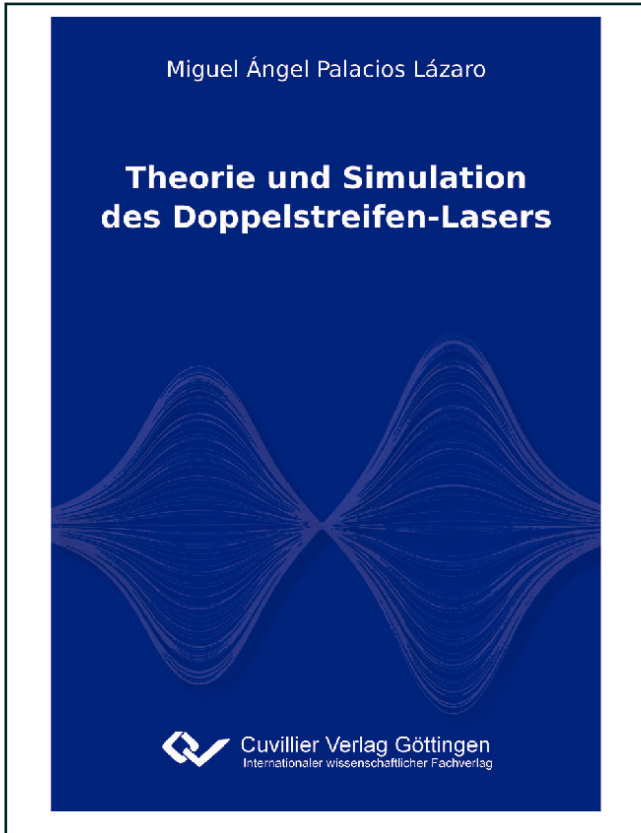




Miguel Ángel Palacios Lázaro (Autor)

Theorie und Simulation des Doppelstreifen-Lasers



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/499>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1.2 Das Lasen. Erzeugung kohärenten Lichts

1.2.1 Historischer Hintergrund

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, fand erst im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts die Übertragung eines Lichtstrahls praktische Anwendung im Bereich der Nachrichtentechnik. Die Wurzeln der theoretischen Erforschung des Lichts greifen jedoch weit tiefer in die Vergangenheit der menschlichen Geschichte.

Anscheinend war das Mittelalter eine nicht so dunkle Zeit, wie oft angenommen wird. In diesen Jahrhunderten sind zumindest die ersten, aus heutiger Sicht richtigen Theorien über das Licht und dessen Ausbreitung zu finden. Ende des 13. Jahrhunderts hat sich der deutsche Dominikaner Dietrich von Freiberg mit der Erklärung der Aufspaltung der Farben im Regenbogen befasst [1]. Bereits damals verfügt seine revolutionäre Theorie über die Behauptung, dass das Entstehen unterschiedlicher Farben ein Ausdruck der Brechung und der Reflexion des Lichts auf den Regentropfen ist.

Diese ersten Forschungen gehen von der Annahme aus, dass das Licht sich in Form von Strahlen ausbreitet. Dies beruht auf der Vorstellung des Lichts als einer Reihe von sich auf geraden Strecken bewegendem Körperchen. Die klassische Theorie des Lichts, von Sir Isaac Newton 1704 veröffentlicht [2], basiert auf den Werken von bedeutenden Vorgängern. Unter ihnen sind Willebrand Snel, Rene Descartes und Robert Boyle zu erwähnen. Descartes beschrieb das Licht als eine „Störung des Plenums“, das aus rotierenden Kugeln besteht. In seinem Werk [3] wird die Brechung des Lichts theoretisch untersucht, wobei der französische Philosoph sich auf Snels Theorie stützt.

Robert Boyle seinerseits erforschte auch die Farben und deren Beziehung zu den Eigenschaften der Körper [4]. Der Forscher erkannte, dass die Farben vom Zusammenwirken zwischen dem Licht und den Eigenschaften der Materialien, von denen die Lichtstrahlen reflektiert werden, zu Stande kommen.

Der Ruhm der Newtonschen Werke und Forschungen hat dazu beigetragen, dass seine Teilchentheorie der Strahlung als die einzige richtige Erklärung für die Lichtausbreitung galt. Andere Forscher des 17. und 18. Jahrhunderts haben trotzdem das Licht als eine Welle beschrieben. Somit wurden die am Ende des 17. Jahrhunderts veröffentlichten Theorien von Huygens und Hooke 1746 von Leonhard Euler unterstützt. Der Schweizer Mathematiker behauptete, dass die Brechung des Lichts besser mit Hilfe von Wellen als mit der herkömmlichen Theorie der Teilchen beschrieben werden könnte [5].

Anfang des 19. Jahrhunderts wurden die theoretischen Behauptungen von Huygens experimentell von Young und Fresnel bestätigt. Michael Faraday schlug 1847 vor, dass das Licht eine elektromagnetische Schwingung sehr hoher Frequenz ist. Einige Jahre später erkannte der Physiker J. C. Maxwell die Verbindung zwischen Licht und Elektromagnetismus. Dass sich die elektromagnetischen Wellen im Freiraum mit der Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, konnte nicht nur ein glücklicher Zufall sein. Damit wurde die Wellentheorie zu der einzigen richtigen Erklärung für die Natur des Lichts.

1905 kehrte Einstein jedoch zur Teilchentheorie zurück. Der von ihm beschriebene photoelektrische Effekt bestätigte wiederum die Natur des Lichts als Zusammensetzung

aus Partikeln [6]. Diese Teilchen wurden erst Jahre später von G. N. Lewis *Photonen* genannt [7]:

„Ich nehme mir die Freiheit, für dieses neue Atom, das kein Licht ist, aber eine wesentliche Rolle bei jedem Strahlungsprozess spielt, den Namen *Photon* vorzuschlagen.“

Bei zwei anscheinend richtigen Theorien über das Licht musste es eine Verbindung zwischen beiden geben. Während Einstein die Energie eines Photons quantifiziert hatte,

$$E = h\nu, \quad (1.1)$$

erkannte De Broglie, dass jeder Körper sich als eine Welle beschreiben lässt. Deren Wellenlänge wiederum quantifiziert und mit dem Moment des Körpers verbunden lautet

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (1.2)$$

Die doppelte Natur des Lichts wurde letztendlich erkannt und erklärt.

1.2.2 Licht und Materie

In diesem neuen Weg der Forschung schlug Einstein drei Arten der Zusammenwirkung zwischen dem Licht und der Materie bzw. zwischen den Photonen und den Elektronen vor:

- Bei der **Absorption** handelt es sich um den Einfall eines Photons auf ein Material, in dem der Abstand zwischen dem Leitungsband und dem Valenzband der Elektronen der Energie des einfallenden Lichtstrahls entspricht:

$$h\nu = E_c - E_v. \quad (1.3)$$

Das Photon kann vom Material aufgefangen werden, wobei ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband springt und zum Entstehen eines elektrischen Stroms beiträgt. Dies begründet den Betrieb der Photodiode.

- Die **spontane Emission** bezeichnet den Prozess, in dem ein sich im Leitungsband befindendes Elektron in das Valenzband des Materials fällt (siehe Abb. 1.1(a)). Die Energie wird in Form eines Photons freigegeben, das vom Körper abgestrahlt wird. Diese Energie, dem Abstand zwischen dem vorherigen und dem endgültigen Zustand des Elektrons entsprechend, bestimmt die Frequenz bzw. die Wellenlänge, mit der das Photon emittiert wird.

Es handelt sich um ein inkohärentes Phänomen, wobei die mit den Photonen verbundenen elektromagnetischen Felder nicht gleiche Phasen aufweisen. Auf diesem Prinzip basiert der Betrieb einer LED (aus dem Englischen: *Light Emitting Diode*), wobei das Injizieren eines Anregungsstroms für die Existenz der Ladungsträger im Material sorgt.

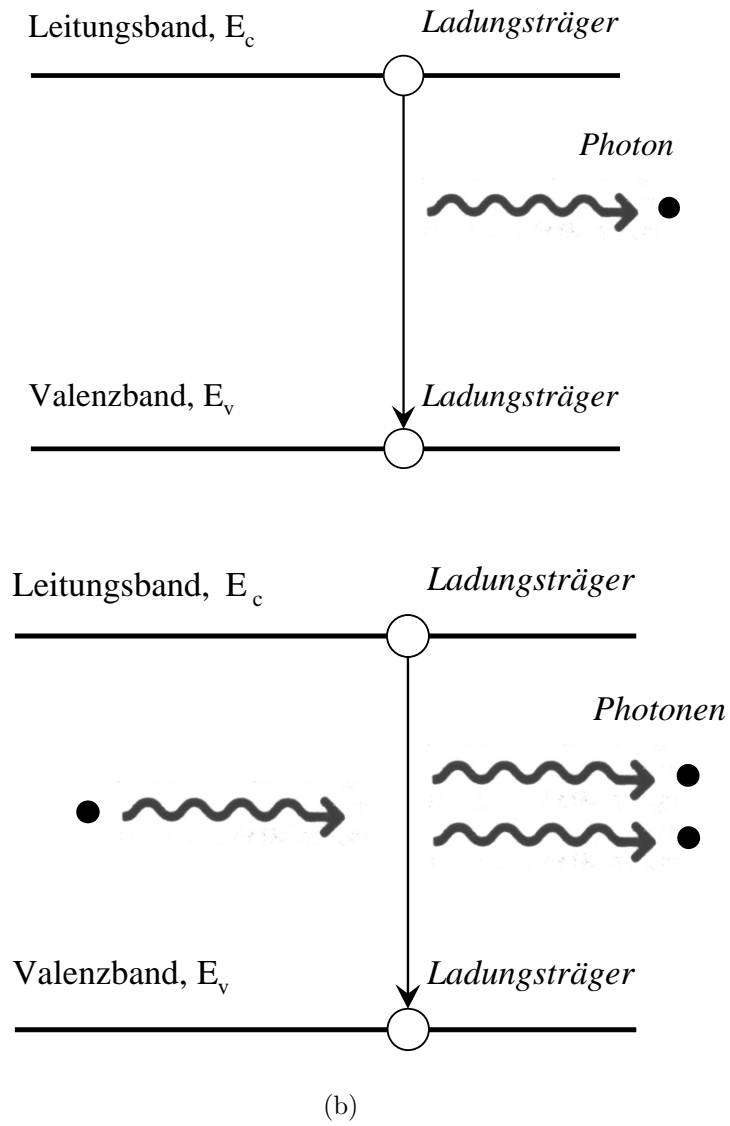


Abbildung 1.1: (a) Spontane Emission eines Photons; (b) stimulierte Emission nach dem Einfall eines Photons.

- Der dritte Prozess der Zusammenwirkung zwischen Licht und Materie ist die **stimulierte Emission**. Sie ist der spontanen Emission gewissermaßen ähnlich (siehe Abb. 1.1(b)): Ein Elektron des Leitungsbands des Materials rekombiniert, fällt in das Valenzband und emittiert ein Photon. Der Unterschied zu jener besteht darin, dass in diesem Fall das Phänomen vom Einfall eines Photons verursacht wird. Sollte dieses Photon die gleiche Energie besitzen wie der Abstand zwischen den genannten Bändern, wird die Rekombination des Ladungsträgers von ihm stimuliert. Das somit emittierte Photon weist die gleiche Phase wie das einfallende Licht auf, weswegen der Prozess als kohärent bezeichnet wird.

Bei der stimulierten Emission findet ein Prozess statt, bei dem das Moment des Systems erhalten bleiben muss. Dies führt zu folgender Gleichung:

$$\mathbf{h}_c = \mathbf{h}_p + \mathbf{h}_v, \quad (1.4)$$

wobei \mathbf{h}_c und \mathbf{h}_v die Wellenzahl des Ladungsträgers im Leitungs- und Valenzband des Materials bezeichnen. \mathbf{h}_p bedeutet die Wellenzahl des emittierten Photons. Es gilt $|\mathbf{h}_p| = 2\pi/\lambda$. Dieser Betrag ist im Vergleich zur Wellenzahl der Ladungsträger vernachlässigbar, was zu folgender Vereinfachung führt:

$$\mathbf{h}_c = \mathbf{h}_v. \quad (1.5)$$

Dies bedeutet, dass die stimulierte Emission nur möglich ist, wenn sich das Minimum der Energie des Leitungsbands und das Maximum der Energie des Valenzbands bei sehr ähnlichen Werten der Wellenzahl befinden. Sonst ist die Existenz eines weiteren Teilchens erforderlich, das das energetische Gleichgewicht des Phänomens gewährleistet. Dies ist der Fall eines Phonons. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Prozess stattfindet, ist jedoch sehr gering. Aus diesem Grund sind die Materialien, bei denen $\mathbf{h}_c \neq \mathbf{h}_v$ gilt, die so genannten indirekten Materialien, für die Erzeugung kohärenten Lichts ungeeignet.

Es muss statt dessen ein Material eingesetzt werden, bei dem die oben erwähnte Gleichung erfüllt wird. Dies ist ein direktes Material.

1.2.3 Die Erzeugung kohärenter Abstrahlung

Der Beschreibung oben zu Folge müssen zwei Bedingungen erfüllt werden, um die stimulierte Emission in einem Material zu ermöglichen. Zum einen müssen Photonen in den Bereich einfallen, in dem die Bandlücke zwischen Leitungs- und Valenzband die Erzeugung weiterer Photonen der gleichen Wellenlänge mittels Rekombination von Ladungsträgern gewährleistet. Zum anderen muss die Anzahl an Ladungsträgern stetig über einem gewissen Wert gehalten werden. Wenn dies nicht der Fall wäre, würden die Elektronen nach kurzer Zeit aus dem Leitungsband des Materials verschwinden, da alle in das Valenzband auf Grund des rekombinatorischen Prozesses gefallen sind. Wenn die Anzahl der Ladungsträger über dem erwähnten Wert bleibt, wird die Situation als Besetzungsinversion bezeichnet.

Die Befriedigung dieser Bedingungen führt zu den beiden wichtigsten Eigenschaften, die eine Struktur, die kohärentes Licht erzeugt, charakterisieren:

1 Einleitung

1. Wenn alle emittierten Photonen von der Struktur ausgestrahlt würden, kann die erste Bedingung nicht erfüllt werden. Deswegen müssen an den Seiten des Körpers teilweise reflektierende Oberflächen angebracht werden, damit ein Teil der Photonen in die Struktur zurückgeführt wird und so die Wahrscheinlichkeit des Stattfindens der stimulierten Emission erhöht wird. Der Körper wird zum Resonator.
2. Für das Erhalten der Besetzungsinversion ist die stetige Zufuhr von Ladungsträgern in das Material erforderlich. Die Struktur benötigt damit eine elektrische Schaltung, die für diese Zufuhr mittels eines Anregungsstroms sorgt.

Die Existenz der stimulierten Emission konnte 1933 von Ladenburg und Kopfermann im Labor bestätigt werden [8]. Ihre Ergebnisse konnten jedoch lange keine praktische Anwendung finden. Der nächste Vorgänger des Lasers ist der Maser: Dieses Acronym bedeutet *microwave amplification by stimulated emission of radiation*. Seine Erfindung führte zu ersten praktischen Anwendungen der stimulierten Emission. Nachdem es Charles H. Townes gelungen war, eine Besetzungsinversion in Ammoniak zu verwirklichen, führten 1953 weitere Forschungen zur Herstellung eines Masers von Charles H. Townes, J. P. Gordon und H. J. Zeiger an der Columbia University. Eine Abstrahlung bei 24 GHz wurde erzielt, wobei ein aus Molekülen von Ammoniak bestehender Strahl in einen Resonator geführt wurde. Die stimulierte Emission und das Erhalten einer Besetzungsinversion wurden damit nachgewiesen.

In den folgenden Jahren kam der Maser in unterschiedlichen Bereichen zum Einsatz. Darunter befinden sich präzise Frequenz-Referenz Maser, teleskopische Maser, Atomuhren und elektronische Verstärker.

Es bedurfte nur weiterer Forschungen, um das gleiche Prinzip wie im Maser anzuwenden und eine Abstrahlung bei optischen Frequenzen anstatt im Mikrowellenbereich zu erreichen. Dies wurde bereits von den Erfindern des Masers vorgeschlagen, da es ihnen wahrscheinlicher schien, die Verstärkung mittels stimulierter Emission bis in den Bereich der optischen anstatt lediglich der Submillimeter-Wellen zu erweitern.

Der erste Laser wurde 1960 von Theodore H. Maiman hergestellt. Mit einem aus Rubin bestehenden Kristall wurde ein roter Lichtstrahl bei 694 nm generiert. Damit wurde die Verstärkung des Lichts mittels stimulierter Emission (*light amplification by stimulated emission of radiation*, Laser) zur Realität. Ebenfalls 1960 fand die Erfindung des Gas-Lasers statt, die dem iranischen Physiker Ali Javan zu verdanken ist.

Das neue Feld entwickelte sich schnell und bereits zwei Jahre später konnte die erste Halbleiter-Laserdiode, die im nächsten Abschnitt näher erläutert wird, hergestellt werden. Verantwortlich für diesen Erfolg waren drei voneinander unabhängige Gruppen: das General Electric Forschungslabor in Schenectady, New York, das IBM Watson Forschungszentrum in Yorktown Heights, New York, und das MIT Lincoln Labor in Lexington, Massachusetts. 1963 schlugen H. Kroemer, Zh. I. Alferov und R. F. Kazarinov die Herstellung der ersten Doppelheterostruktur-Laserdiode vor, die heutzutage meist verbreitete Art des Lasers.

Seitdem hat sich der Laser zu einem unentbehrlichen Bestandteil unseres Lebens entwickelt. Die damals als „eine ein Problem suchende Lösung“ bezeichnete Erfindung kann

in der Gegenwart in den unterschiedlichsten Anwendungen gefunden werden: unter anderen in Kommunikationssystemen, CD-Spielern und chirurgischen Einrichtungen.