

Der Laser – ein rückgekoppelter optischer Verstärker in Selbsterregung

Die Frage nach der Funktionsweise eines Lasers lässt sich kurz und bündig beantworten: Ein Laser ist ein rückgekoppelter optischer Verstärker in Selbsterregung. Der in diesem Satz zusammengefasste Sachverhalt wird im Weiteren in elementarer und stark verkürzter Weise erläutert.

PROF. DR. AXEL DONGES/ISNY IM ALLGÄU

Optischer Verstärker

Wir betrachten zunächst einen isolierten optischen Verstärker. Ein optischer Verstärker bewirkt Folgendes: Fällt eine Lichtwelle mit der Amplitude E_0 auf den Eingang eines optischen Verstärkers, so tritt am Ausgang eine Lichtwelle mit der größeren Amplitude $v_0 E_0$ aus (Abb. 1). v_0 heißt Einwegverstärkung des optischen Verstärkers. Eine mögliche Phasenverschiebung der Lichtwelle beim Verstärkungsprozess bleibt im Weiteren zur Vereinfachung unberücksichtigt. Zur physikalischen Realisierung des Verstärkungsprozesses wird die so genannte induzierte Emission ausgenutzt. Diese setzt ein quantenmechanisches System (Atom, Molekül oder Festkörper) voraus, das sich im angeregten Zustand E_2 befindet (Abb. 2). Trifft nun Licht mit einer Frequenz von $f = \Delta E/h$ ($\Delta E = E_2 - E_1$; energetischer Abstand der beiden atomaren Niveaus, $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js: Plancksche Konstante) auf das System, so geht es in den Zustand mit der niedrigeren Energie E_1 über. Dabei strahlt das System Licht ab (induzierte Emission). Das emittierte Licht besitzt die gleichen Eigenschaften (bezüglich Frequenz, Ausbreitungs- und Polarisationsrichtung) wie das eingestrahlte Licht. Im Teilchenbild des Licht formuliert man diesen Sachverhalt wie folgt: Ein eingestrahktes Photon trifft auf das angeregte

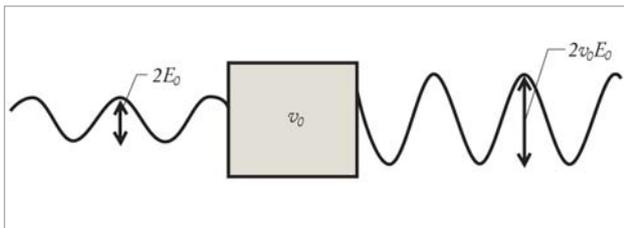


Abb. 1: Darstellung eines optischen Verstärkers als Black Box.

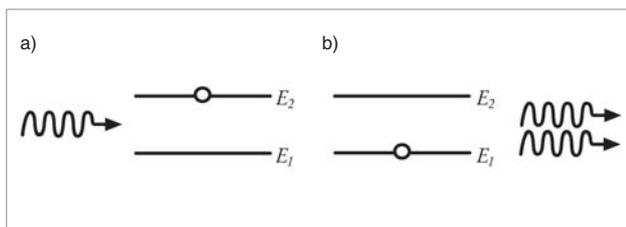


Abb. 2: Schematische Darstellung der induzierten Emission. a) Das System befindet sich vor der induzierten Emission im energetischen Zustand E_2 . b) Das System befindet sich nach der induzierten Emission im energetischen Zustand E_1 .

System (Energiezustand E_2), wodurch ein weiteres, identisches Photon erzeugt wird. Aus Gründen der Energieerhaltung geht das System dabei in einen niedrigeren Energiezustand E_1 über. Ein optischer Verstärker besteht letztendlich aus einer Vielzahl von angeregten Atomen bzw. Molekülen, die in einer linearen Struktur (z. B. dünnes Rohr) angeordnet sind. Sind diese Atome bzw. Moleküle invertiert, d. h. sind mehr Atome oder Moleküle im Zustand E_2 als im Zustand E_1 , so findet Lichtverstärkung statt, sofern das Licht die Resonanzfrequenz $f = \Delta E/h$ besitzt. Der Verstärkungsfaktor wird am größten, wenn das Licht parallel zur Richtung der größten Ausdehnung des optischen Verstärkers läuft (Abb. 3). Neben der induzierten Emission gibt es auch die spontane Emission. Dabei geht ein Atom oder Molekül ohne Einfluss von außen in einen niedrigeren Energiezustand über und emittiert dabei ein Photon. Diese Art von Lichterzeugung dominiert bei gewöhnlichen Lichtquellen. Sie spielt beim Laser nur eine untergeordnete Rolle.

Rückgekoppelter optischer Verstärker

Ein Verstärker wird zu einem rückgekoppelten Verstärker, wenn ein Teil des Ausgangssignals wieder an den Eingang des Verstärkers zurückgeführt wird. Im Fall eines optischen Verstärkers wird die Rückkopplung mithilfe von Spiegeln (dem so genannten Resonator) realisiert (Abb. 4). Auf diese Weise wird erreicht, dass zumindest ein Teil des Lichts mehrmals den optischen Verstärker durchläuft. Für die weitere Diskussion wird angenommen, dass das rückgekoppelte Licht, das erneut den optischen Verstärker durchläuft, in Phase mit dem gerade einfallenden Licht ist. Dies ist genau dann der Fall, wenn der Abstand L der beiden Spiegel und Wellenlänge λ des Lichts die Resonanzbedingung $2L = n\lambda$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) (2) erfüllen. Alle durch den optischen Verstärker laufenden Wellen sind dann in Phase und interferieren konstruktiv, d. h. das Ausgangssignal wird maximal.

Rückgekoppelter optischer Verstärker in Selbsterregung

Jeder rückgekoppelte Verstärker kann instabil werden. In diesem Fall liefert der rückgekoppelte Verstärker auch