

Die Revolution des Lichtes

Jakob WALOWSKI
Universität Göttingen
Tōhoku Universität, Sendai

Einleitung

Der Laser wird zusammen mit dem Transistor zu den grundlegenden technischen Erfindungen der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gezählt. Niemand hatte sich zur Zeit ihrer Entwicklung vorstellen können, in welcher Weise beide unser Leben beeinflussen werden. Im Mai 1960 wurde der erste funktionierende Laser von Theodore Maiman vorgestellt. Das 50-jährige Jubiläum des Lasers bietet eine Gelegenheit, die Funktionsweise des Lasers und die Eigenschaften von Laserlicht zu erläutern.

Beim Transistor wurde das Ausmaß seines Potentials „nur“ deutlich unterschätzt. Man dachte lediglich, er könnte die großen Vakuumröhren, die damals als Schalter benutzt wurden, als kleines Bauteil ersetzen. Niemand konnte sich vorstellen, dass die Erweiterung des Transistors zu integrierten Schaltungen Prozessoren ermöglichen würde, die heutzutage schon nahezu eine Milliarde Transistoren beherbergen. Fast jeder von uns nutzt solch einen Prozessor täglich.

Der Laser hingegen wurde sofort mit tödlichen Strahlen in Verbindung gebracht. Bereits in ihrer Juli-Ausgabe von 1960 fragte die Newsweek „Todesstrahlen als nächstes?“ Zur Beruhigung kann man anmerken, dass bis zum heutigen Tage, trotz immenser Investitionen und eines großen Aufwandes, im großen Stil vorangebracht von der Reagan Administration in den 1980er Jahren, keine „Laserkanone“ gebaut wurde. Es wurden jedoch viele andere im Alltag taugliche Anwendungen für den Laser gefunden.



Abbildung 1 Theodore Maiman und der erste Laser. Der Würfel ist der Rubinkristall, der als aktives Medium diente. Das spiralförmig aufgewickelte Rohr ist eine Gasentladungslampe, die dem optischen Pumpprozess dient. (Hughes Aircraft Company)

Geschichtliche Entwicklung

Im 18. Jahrhundert stritten sich die Gelehrten, ob Licht aus Teilchen bestehe oder ob es eine Welle sei. Isaac Newton (1643–1727) vertrat die Theorie, Licht bestehe aus kleinen Lichtteilchen, die von der Lichtquelle ausgehen. Damit konnte er das Phänomen der Lichtbrechung unter der Annahme erklären, dass das Licht in einem dichteren Medium eine höhere Geschwindigkeit habe, als in einem mit kleinerer Dichte. Christian Huygens (1629–1695) hingegen vertrat die Meinung, Licht sei eine sich ausbreitende Welle, und kam damit zum selben Ergebnis bezüglich der Lichtbrechung. Eine Welle benötigt jedoch ein Trägermedium in dem sie sich ausbreiten kann. Dazu wurde ein Hilfskonstrukt geschaffen. Man nahm an, Licht breite sich

in einem alles umgebenden Äther aus. Spätere Experimente zur Messung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien favorisierten zunächst das Wellenmodell, mussten jedoch weiter angepasst werden. Erst im Jahre 1905 deutete Albert Einstein den photoelektrischen Effekt als das Herauslösen von Elektronen aus Atomen oder Festkörpern durch Einstrahlung von Licht oder Röntgenstrahlung und verband es mit Plancks Strahlungsgesetz. Für diese Deutung erhielt er 1921 den Nobelpreis. Das Ergebnis war, dass Licht aus quantenmechanischen Teilchen, den Photonen besteht. Die Häufigkeit der Photonen kann als Amplitude einer Welle beschrieben werden. Das bedeutet also, dass Licht weder mit dem Teilchen- noch mit dem Wellenmodell vollständig beschrieben werden kann, man benötigt beides, den Teilchen-Welle-Dualismus.

Später, 1916, war es wieder Einstein, der vorschlug, dass Photonen, die auf angeregte Elektronen treffen, die Emission eines identischen Photons stimulieren können. Die betroffenen Elektronen würden in einen energetisch niedrigeren Zustand relaxieren und dabei die Energie in Form eines Photons aussenden, das identisch mit dem bestehenden ist (stimulierte Emission).

Mit diesem Wissen wäre theoretisch der Bau eines Lasers möglich. Es bedurfte jedoch noch der Entwicklung der Quantenmechanik, in den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts, und später einer neuen Generation von Physikern, die diese auch akzeptieren und anwenden würden. So wurde zuerst 1954 ein Maser, also ein Mikrowellenlaser von Charles Townes gebaut. Dies war vor dem Laser möglich, wahrscheinlich weil die Wissenschaft sich während des Zweiten Weltkrieges mehr mit der Radartechnik zur Aufspürung von feindlichen Zielen beschäftigt hat und es demzufolge viele Spezialisten gab, die sich mit der Mikrowellentechnik auskannten. Nach der Realisierung des Masers lag die Überlegung nahe, das gleiche mit Licht zu versuchen. 1958 folgten theoretische Arbeiten von Charles Townes und Arthur Schawlow zur stimulierten Lichtverstärkung. Danach begann das Rennen um den Bau des ersten Lasers. Ausgerechnet ein Außenseiter mit einem kleinen Budget gewann dieses Rennen. Im Mai 1960 war der erste funktionierende Laser in den Hughes Research Laboratories von Theodore Maiman und seinen Mitarbeitern fertig gestellt worden.

Eigenschaften von Laserlicht

Rein oberflächlich betrachtet ist ein Laser nichts anderes als eine Lichtquelle. Das von ihm erzeugte Licht hat jedoch besondere Eigenschaften, die viele Anwendungen ermöglichen. Für die Erklärung der Eigenschaften und Vorzüge von Laserlicht und der Funktionsweise des Lasers kann man eine herkömmliche Glühbirne heranziehen und benötigt die beiden Bilder der Teilchen und der Welle.

Divergenz

Eine Glühbirne, wie auch ihre Nachfolger, strahlt Licht in einem möglichst breiten Winkel ab und eignet sich, um große Flächen oder Räume zu beleuchten. Ein Laser hingegen hat eine sehr geringe Divergenz und konzentriert das ganze erzeugte Licht auf einen Punkt. Eine handelsübliche Glühbirne mit 100 Watt (mittlerweile in Europa vom Markt genommen) erzeugt Licht mit der Energie von ca. 5 Watt und strahlt es in alle Raumrichtungen ab. Beleuchtet in 5 Metern Abstand also eine Fläche von ca. 280 Quadratcentimetern. Ein Laser, der Licht mit der Energie von ca. 5 Milliwatt erzeugt, beleuchtet in 5 Metern Entfernung eine Fläche (einen Punkt) von ca. 1 Quadratmillimeter. Somit erreicht ein Laser die 50.000-fache Energiedichte. Diese bleibt für den Laser mit steigender Entfernung konstant, während sie für die Glühbirne abfällt. Kurz gesagt, die Glühbirne streut das Licht und der Laser bündelt das Licht. Die Bündelung der gesamten Intensität auf einen Punkt ermöglicht Anwendungen wie z. B. Entfernungsmessung mittels Lichtstrahlen.

Monochromasie

Eine Glühbirne soll alle Farben sichtbar machen. Dies ist nur möglich, indem sie selbst viele Farben, also Wellenlängen des Lichtes, abstrahlt – das ganze sichtbare Spektrum des Lichtes. Das Laserlicht hingegen ist monochromatisch. Der Laser erzeugt möglichst nur eine Wellenlänge (eine Farbe). Diese Eigenschaft wird z. B. beim CD-, DVD-, Bluray-Abspieler ausgenutzt, da sich Lichtstrahlen nur einer Wellenlänge besonders gut fokussieren lassen und man damit besonders kleine Strukturen unterscheiden kann. Eine andere, technisch nicht

sehr anspruchsvolle Anwendung des gebündelten monochromatischen Lichtes ist der Laserpointer.

Kohärenz

Die dritte Eigenschaft von Laserlicht ist die Kohärenz. Im Wellenbild ausgedrückt, sendet eine Glühbirne Photonen beliebig aus, und es entstehen gegeneinander verschobene Wellenfronten. In einem Laser können durch die stimulierte Emission identische Photonen erzeugt werden. Diese breiten sich in dieselbe Richtung aus und bilden insgesamt eine geordnete Wellenfront. Diese Eigenschaft kann man ausnutzen, um Hologramme herzustellen. Sie wird auch in der Schwingungsanalyse z. B. von biologischen Zellen verwendet.

Funktionsweise des Lasers

Die Laserkomponenten

Ein Laser besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten, wie in Abbildung 2 gezeigt.

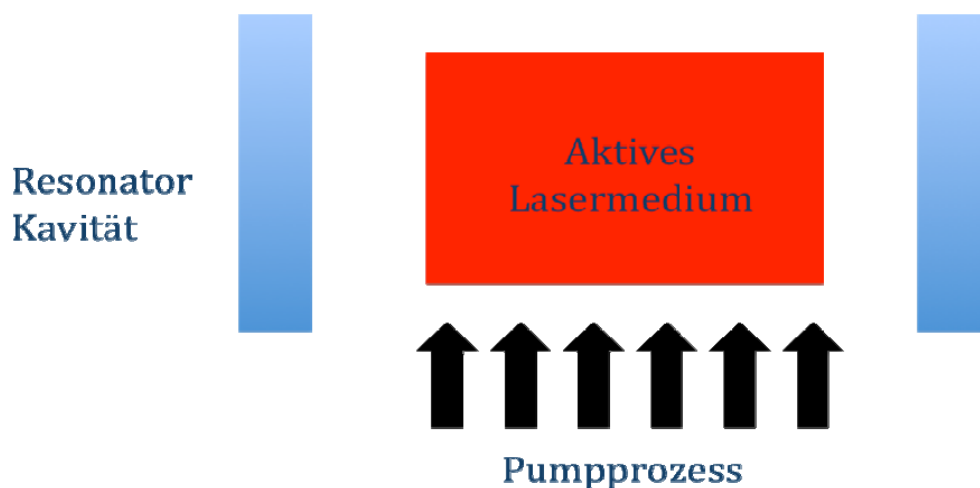


Abbildung 2 Die drei Komponenten des Lasers.

Das aktive Medium ist die Komponente, in der das Licht erzeugt wird. Es kann ein Gas, eine Flüssigkeit oder ein Festkörper sein. Fügt man den Elektronen des aktiven Mediums Energie zu, so wechseln sie aus ihrem Grundzustand in einen energetisch höheren (angeregten) Zustand über, sie werden angeregt. Relaxieren die Elektronen zurück in den Grundzustand geben sie ihre Energie in Form von Photonen ab.

Um die Elektronen in einem Medium anzuregen, benötigt man die zweite Komponente, den Pumpprozess. Ein Prozess ist schwierig als Bauteil vorstellbar, wird jedoch so bezeichnet, da je nach Medium verschiedene Prozesse und dadurch auch verschiedene Bauteile benötigt werden. Ist das Medium ein Gas, so wird einfach eine elektrische Spannung an das Gas, das sich in einem Behälter befindet, als Pumpprozess angelegt. Handelt es sich bei dem Medium um einen Festkörperkristall, so kann man seine Elektronen durch Licht anregen. Der Pumpprozess ist dann eine andere Lichtquelle (optisches Pumpen). Heutzutage ist es meistens am effizientesten, einen anderen Laser als Pumpprozess einzusetzen.

Das dritte Bauteil ist der Resonator. Er sorgt dafür, dass das vom aktiven Medium erzeugte Licht für die zum „lasern“ benötigten Prozesse ausgenutzt wird. Für einen einfachen Laser reichen prinzipiell zwei plane Spiegel aus. Aus technischen Gründen werden immer etwas gekrümmte Spiegel benutzt, weil diese einfacher zu justieren sind und in der richtigen Konfiguration besser das im aktiven Medium erzeugte Licht ausnutzen. Das vom aktiven Medium erzeugte Licht (die Photonen) wird so wieder auf das Medium zurückreflektiert und kann für die stimulierte Emission genutzt werden. Wird das Licht zwischen den beiden Resonatorspiegeln hin und her reflektiert, so steigt die Anzahl der Photonen im Resonator an. Einer der beiden Spiegel des Resonators ist teildurchlässig. Er reflektiert nicht das ganze Licht zurück, sondern lässt einen Teil durch. So entsteht der Laserstrahl des Lasers, er wird ausgekoppelt.

Anregungsprozesse im Lasermedium

Wie bereits erwähnt, muss das aktive Medium zunächst angeregt werden, damit es Licht erzeugen kann. Der erste Schritt ist die Absorption von Energie. Dazu regt der Pumpprozess die Elektronen des Mediums an und versetzt diese vom energetischen Grundzustand in einen angeregten Zustand.

Die Lebensdauer der Elektronen im angeregten Zustand ist begrenzt. Das bedeutet, dass diese irgendwann zurück in den Grundzustand wechseln. Da die Energieerhaltung gilt (Energie kann nicht verloren gehen), senden die Elektronen beim Zurückwechseln in den Grundzustand ein Photon aus, das genauso viel Energie hat, wie der Unterschied der beiden energetischen Zustände. Dieser Prozess heißt spontane Emission.

Manche dieser spontan erzeugten Photonen, die vom aktiven Medium ausgesandt werden, treffen auf einen der Spiegel und werden zurück auf das Medium reflektiert. Treffen diese Photonen auf ein Elektron im angeregten Zustand, so werden diese Elektronen unter Aussendung eines identischen Photons an das, von dem sie getroffen wurden, ihre Energie abgeben und zurück in den Grundzustand wechseln. Nun befinden sich zwei identische Photonen im Laserresonator, die sich durch das Medium hin und her bewegen können und immer mehr identische Photonen erzeugen können. Da die entstehenden Photonen identisch sind, bildet sich eine stehende Welle im Resonator aus. Dieser Vorgang heißt stimulierte Emission. Das Licht, das durch einen Spiegel ausgekoppelt wird, ist nahezu parallel, kohärent und monochromatisch.

Die drei Energieumwandlungsprozesse werden in Abbildung 3 verdeutlicht.

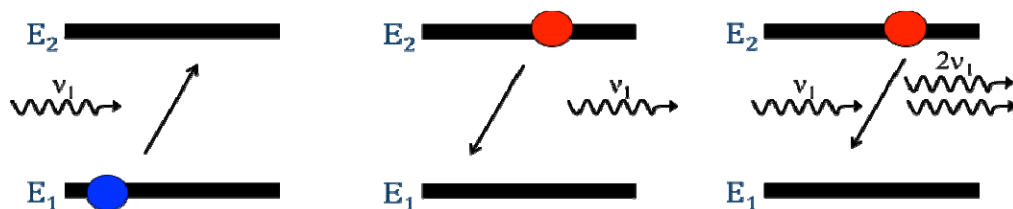


Abbildung 3 Die Energieumwandlungsprozesse, Anregung und Emission.

Energieschemata im Lasermedium

Durch die stimulierte Emission wird das für den Laser charakteristische Licht erzeugt. Für den reibungslosen Ablauf dieses Prozesses wird eine Besetzungsinversion benötigt. Das bedeutet, dass einerseits im angeregten Energieniveau immer Elektronen vorhanden sein müssen, die durch Photonen in das Grundniveau relaxieren können; andererseits müssen im Grundniveau immer genügend unbesetzte

Plätze vorhanden sein, damit die Elektronen dorthin relaxieren können. Zusätzlich müssen aber im Grundniveau immer genügend Elektronen vorhanden sein, damit der Pumpprozess stattfinden kann.

Um dieses garantieren zu können, reicht ein wie oben beschriebenes Energieschema mit einem Grundzustand und einem angeregten Zustand nicht aus. Es wird ein Drei- oder noch besser ein Vierniveausystem benötigt (Abbildung 4). Diese Niveausysteme haben beide ein Grundniveau, in dem sich die Elektronen befinden, bevor der Laser eingeschaltet wird. Sobald der Pumpprozess beginnt, werden die Elektronen angeregt und wechseln in das Pumpniveau.

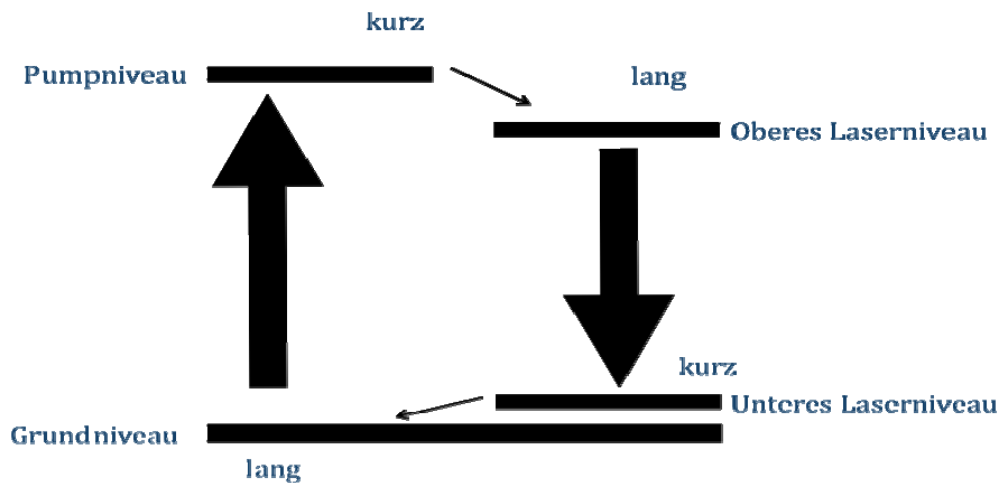


Abbildung 4 Die Energieniveaus in einem Vierniveaulaser. Beim Dreiniveaulaser fällt das untere Laserniveau raus.

Damit in diesem Niveau immer genügend freie Plätze für Elektronen aus dem Grundniveau vorhanden sind, muss das Pumpniveau sehr kurzlebig sein. Die Elektronen aus dem Pumpniveau wechseln deshalb sofort nach der Anregung ins obere Laserniveau, welches energetisch knapp unter dem Pumpniveau liegt. Dort können sich Elektronen ansammeln, sie haben dort eine längere Verweildauer. Somit sind immer Elektronen für die stimulierte Emission vorhanden. Von hier können sie dann bei einem Dreiniveausystem wieder in das Grundniveau unter Aussendung von Photonen abgeregt werden. Bei den stabileren Vierniveausystemen ist, energetisch etwas höher als das Grundniveau, das untere Laserniveau angesiedelt. In diesen Systemen

relaxieren die Elektronen aus dem oberen Laserniveau dorthin. Da dieses Niveau wiederum sehr kurzlebig ist, wechseln die Elektronen von dort aus sofort in das Grundniveau. Diese Konfiguration hat den Vorteil, dass das untere Laserniveau immer freie Plätze zur Verfügung hat, weil die Elektronen danach sofort ins Grundniveau wechseln, während beim Dreiniveausystem die relaxierten Elektronen vom Pumpprozess erst wieder angeregt werden müssen, um den Platz frei zu machen.

Beim Wechsel der Elektronen vom Pumpniveau zum oberen Laserniveau und vom unteren Laserniveau ins Grundniveau werden keine Photonen ausgesendet, weil die Energiedifferenz klein ist. Hier wird einfach Energie in Form von Wärme frei.

Besonderheit Excimer Laser

Einen besonderen Platz nehmen Excimer Laser ein. Diese Gaslaser zeichnen sich dadurch aus, dass sie kein Grundniveau haben. Die Anregung der Elektronen findet statt, wenn sich Atome zu Molekülen verbinden. Durch Aussendung von Photonen geben die Elektronen Energie ab und die Bindung der Moleküle zerbricht wieder in einzelne Atome. Diese Laser sind von Bedeutung, weil sie Licht mit Wellenlängen erzeugen, die momentan in der Chipherstellung verstärkt gebraucht werden.