

Vom Maser zum Laser – Licht als Werkzeug

Albert Einstein hat bereits 1916 die Möglichkeit der stimulierten Emission von Photonen postuliert. Aber erst 1960 baute Theodore Maiman den ersten Rubinlaser für wissenschaftliche Anwendungen. Kaum jemand konnte sich vorstellen, dass 50 Jahre danach Laser auch auf Baustellen, in der Industrie, in der Medizin und selbst in Haushalten und Verkaufsläden anzutreffen sein werden.

Der im Januar 2015 verstorbene Charles H. Townes war während der 1950er-Jahre Berater der Bell Telephone Labs (USA) in einem Projekt zur Verbesserung von Radarsystemen. Man suchte leistungsstarke und rauscharme Mikrowellensender. Townes schlug vor, die Einsteinsche Idee der stimulierten Emission umzusetzen (Einstein, 1916). Er benutzte dazu Mikrowellen, um Ammoniakgas anzuregen.

Mit Hilfe von stark inhomogenen elektrischen Feldern konnte er einen Strahl von angeregten Molekülen erzeugen, der durch ein kleines Loch in einen Behälter geleitet wurde. Entscheidend war, dass der energiereichere angeregte Zustand durch spontane Emission etwa 100 000 Mal langsamer in den Grundzustand zerfiel, als dies bei den meisten Atomen oder Molekülen geschieht. So konnte im Behälter ein quasistabiles Ungleichgewicht (eine sog. Inversion) hergestellt werden, das durch ein äusseres Feld zur Entladung stimuliert werden kann.

Stehende Welle wird verstärkt

Damit sich ein starkes äusseres Feld in Form einer stehenden Welle (analog zu einer schwingenden Saite) aufbauen konnte, wurde der Behälter in einen Metall-Resonator montiert, der genau auf die Wellenlänge der durch die Moleküle emittierten Mikrowellenstrahlung abgestimmt wurde. In einer Art Kettenreaktion stimulierte die stehende Welle die Ammoniakmoleküle, ihre Überschussenergie im Gleichtakt abzugeben, wodurch die stehende Welle weiter verstärkt wurde. Ein kleiner Teil dieser Welle konnte durch eine Öffnung als kohärente und äusserst frequenzstabile 24 Gigahertz-Mikrowellenstrah-

lung mit einer Wellenlänge von 1,25 cm nach aussen abgegeben werden: der Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) war geboren! Ein moderner Wasserstoff-Maser liefert Strahlung mit einer Frequenz von 1 420 405 752 Hertz und wird als extrem genauer Zeitgeber verwendet (sog. Atomuhr).

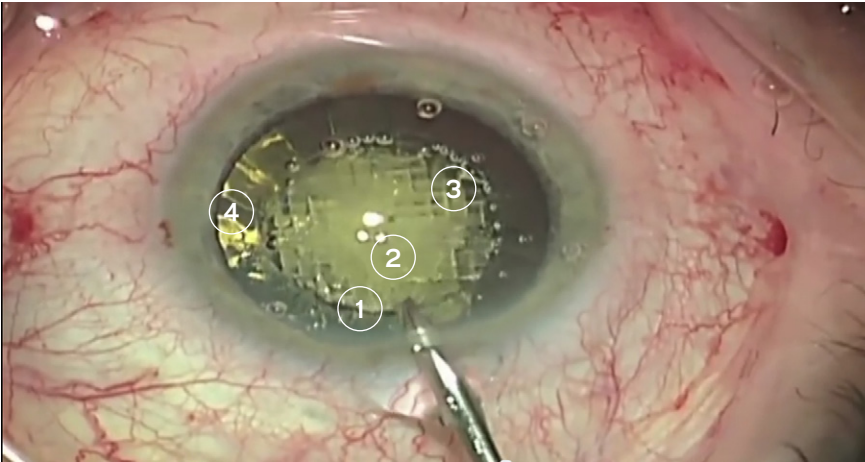
Warum war dieses Funktionsprinzip so schwierig zu begreifen? Die zugrunde liegenden Rechnungen sind nicht allzu anspruchsvoll, doch die Physiker der 1950er-Jahre erachteten die Erzeugung einer sich selbst stimulierenden Welle als logisch unmöglich. Erst das Verständnis sich selbst organisierender Systeme, das in den 1960er-Jahren entwickelt wurde, machte dieses vor allem auch für biologische Systeme zentral wichtige Funktionsprinzip verständlich.

Rubinlaser verblüfft die Fachwelt

Der Maser zeigte die Zutaten für einen optischen Laser: 1. ein langlebiger angeregter Energiezustand und ein Grundzustand; 2. ein Pumpmechanismus, der dafür sorgt, dass sich immer genügend viele Elektronen im angeregten Zustand befinden; 3. ein Resonator (für Licht zwei parallele Spiegel).

Theodore Maiman von Hughes Aircraft Company (USA) wählte als Lasermaterial einen Rubinstab, d.h. Aluminiumoxid, das mit weniger Chromatomen dotiert war, als dies bei Rubin normalerweise der Fall ist. Um einen Resonator herzustellen, wurden die Endflächen genau senkrecht zum Stab poliert, so dass die Oberflächenrauigkeit kleiner als die halbe Wellenlänge von rotem Licht wurde (kleiner als 0,3 Mikrometer). Aufgedampfte Silberschichten auf die Stabenden bildeten schliesslich den Resonator.

Damit ein Laserstrahl auf der einen Seite austreten konnte, wurde die eine Silberschicht so dünn gefertigt, dass nur rund 99 Prozent des Lichtes reflektiert wurden. Chrom kann im grünen und blauen Spektralbereich Licht einer genügend starken Lampe (z. B. Glühlampe) absorbieren und strahlungsfrei (durch Stösse) ins tiefer liegende, langlebige Laserniveau transportieren, so dass dieses dauernd mit Energie versorgt wird und eine Inversion entsteht. Und nun geschieht das Wunder von selbst! Eine vor-



Sicht durch die intakte Hornhaut ins Auge nach der Laserbehandlung bei einer Katarakt-Operation: Der vordere Teil des Linsenbeutels (1) wurde kreisförmig aufgeschnitten. Der Arzt zieht diesen (als Wolke sichtbar, 2) soeben mit einer Pinzette heraus. Das quadratische Muster (3) sind Schnitte durch die trübe Linse, die kurz danach durch dieselbe Tunnelöffnung abgesaugt wird. Die glitzernden Flächen links (4) sind ebenfalls Fragmente, die entfernt werden.

erst kleine, durch zufällige Fluktuationen entstandene Welle pendelt im Stab hin und her und stimuliert bei jedem Durchgang weitere Emissionen von Photonen im Gleichtakt, so dass im Stab eine sehr intensive monochromatische Strahlung entsteht, von der ein kleiner Teil durch den 99%-Spiegel als nahezu paralleler und kohärenter Strahl austritt.

In der Folge wurde das Prinzip dutzendfach gewandelt und es entstanden viele unterschiedliche Lasersysteme mit unterschiedlichen Wellenlängen und Leistungen für kontinuierlichen oder gepulsten Betrieb.

Femtosekundenblitze ins Auge

Laser kommen heute zum Beispiel bei Augenoperationen schon fast routinemässig zum Einsatz (vgl. Artikel S. 10). Bei einer Katarakt-Operation (Grauer Star) muss die trübe Linse zerkleinert werden, damit sie abgesaugt werden kann. Dies ist seit wenigen Jahren mit 75 Femtosekunden langen Infrarot-Laserpulsen möglich. Infrarotes Licht ist ideal, weil Hornhaut und Linse dafür durchsichtig sind und sich dieses Licht durch geeignete Linsen auf einen Brennpunkt von einem Mikrometer Durchmesser fokussieren lässt. Mit einem Energieeintrag von nur zwei Nanjoule pro Puls entstehen im Fokus explosionsartig so hohe Temperaturen, dass das Material verdampft. Die dabei entstehenden Gase (Wasserdampf und Kohlendioxid) drücken benachbarte Zellen wie ein Keil auseinander. Die Wärme verteilt sich äusserst

rasch auf ein grösseres Umfeld, das dadurch kaum aufgeheizt wird. Mit 80 Millionen Pulsen pro Sekunde erzeugt der Laser in einer Minute rund 5 Milliarden Bläschen, die computergesteuert in allen drei Dimensionen beliebig angeordnet werden können.

Das in der Figur sichtbare quadratische Muster wird durch senkrecht zur Augenoberfläche innerhalb der Linse liegende Schnittebenen erzeugt. Um das Laserlicht nicht durch die Bläschen zu stören, wird das Bläschenmuster zuerst auf der tiefsten parallel zur Augenoberfläche liegenden Ebene erzeugt. Danach wird der Laserfokus in sehr kleinen Schritten nach oben verschoben und jedesmal dasselbe Muster erzeugt. Weiter kann ein Zugangstunnel für das Absaugen der Linsenfragmente und das Einführen der neuen Kunststofflinse geschnitten werden. Zusätzlich kann bei Bedarf im gleichen Arbeitsgang eine leichte Hornhautverkrümmung korrigiert werden, indem parallel zur Augenoberfläche liegende Schichten der Hornhaut verdampft werden.

Fritz Gassmann

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

Einstein A. 1916. Strahlungs-Emission und -Absorption nach der Quantentheorie. Deutsche Phys. Ges., Verhandlungen 18:318-323

www.pulslaser.de/

www.hyperraum.tv/tag/rubinlaser/

www.leifiphysik.de/themenbereiche/atomarer-energieaustausch/ausblick