



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Ort des Geschehens: ein Labor der *Hughes Aircraft Company* in der kalifornischen Stadt Culver. Am 16. Mai 1960 lässt dort der amerikanische Physiker Theodore Maiman eine spiralförmige Gasentladungslampe aufblitzen. In ihr steckt ein stabförmiger Rubin Kristall, dessen Enden verspiegelt sind (**Abb. B**). Das Blitzlicht löst in dem Rubin den ersten Laserpuls der Welt aus. Maiman konnte bald erstaunten Pressevertretern mit einem verbesserten Rubinlaser kräftige rote Laserblitze vorführen. Von ihm hörten die Reporter auch

sei zwar eine tolle Idee, sagten sie, aber eine Lösung, die noch ihr Problem suche. Trotzdem – 1964 bekam Townes zusammen mit den Russen Nicolai Basow und Aleksandr Mikhailowitsch Prokhorow den Nobelpreis für Physik. Alle drei gelten als Väter des Laserprinzips.

Heute zählen Laser zu den wichtigsten Schlüsseltechnologien. Sie befeuern die Glasfasernetze der Telekommunikation und machen dem Internet per Lichtpost Beine.

Wunderlampe aus dem Quantenland – wie der Laser zur Alltagstechnik wird

zum ersten Mal das Kunstwort „Laser“ – es steht für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, auf Deutsch „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“. Das neue Wort war bald in aller Munde. Es war mindestens so cool wie Astronaut.

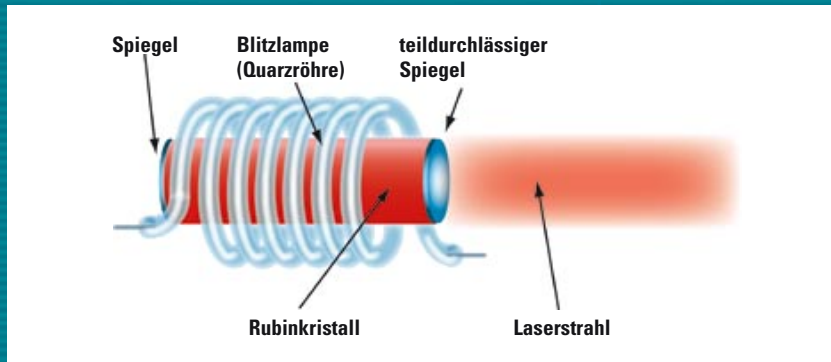
Doch die Laserpioniere mussten damals auch viel Spott einstecken. Der amerikanische Physiker Charles Townes berichtet, wie seine Kollegen ihn gerne aufzogen. Der Laser

Ohne sie wäre das Saugen großer Musik-, Video- oder Spieledateien unmöglich. Laserdioden lesen und beschreiben die Silberscheiben in CD- oder DVD-Geräten. Laserscanner lesen beim Kassieren Preisschilder, und Polizisten messen mit Laserpistolen die Geschwindigkeit von Autos. Starke Gaslaser schneiden in der Industrie Bleche, helfen beim Formen, Biegen, Härten oder Beschichten von Werkstoffen. In der Medizin messen sie die Blutzirkulation, machen als Lichtskalpelle blutstillende Schnitte oder reparieren fehlsichtige

A

▼ Mit ultrakurzen Laserblitzen untersuchen Physiker das Verhalten der Elektronen in Atomen oder Molekülen.

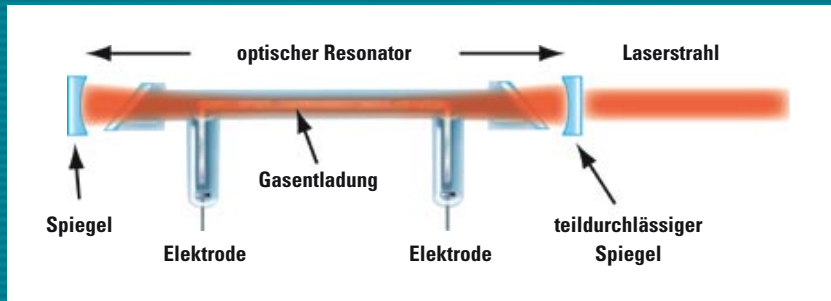




Der erste Rubinlaser.

B

Ein Gaslaser besteht aus einer modifizierten „Leuchtstoffröhre“, in der die Gasentladung das Lasermedium pumpt.



© Grafik: Roland Wengenmayr

→ Augen. Laser spüren in der Atmosphäre umweltschädliche Gase auf. In großen Schiffen oder Flugzeugen haben ringförmige Lasersysteme den Kompass ersetzt. Mit solchen Ringlasern messen Geophysiker auch kleinste Änderungen der Erdrotation.

EINE BLENDEnde IDEE

In der Grundlagenforschung spielen Laser eine zentrale Rolle. Physiker schauen mit den stärksten Laseranlagen der Welt immer tiefer in die Materie hinein und verschmelzen damit sogar Atomkerne. Mit schwächerem Laserlicht bremsen sie die Wärmebewegung der umherflitzenden Atome ab. Sie kühlen so die Atome bis fast auf den absoluten Temperaturnullpunkt hinunter und machen mit ihnen faszinierende Quantenexperimente. Sogar den schnellen Tanz der Atome und Moleküle in chemischen Reaktionen können ultrakurze Laserblitze erforschen (Abb. A).

Der Laser bezieht seine Stärke aus reiner Quantenphysik. „Es ist mir ein prächtiges Licht über die Absorption und Emission von Strahlung aufgegangen, [es ist] alles ganz quantisch“, schrieb Albert Einstein 1916 begeistert seinem Freund Emile Besso. Einstein legte damals die theoretischen Grundlagen

für den Laser, allerdings ohne dessen Erfindung voraus zu ahnen. Schon 1905 hatte er anhand des **Fotoeffekts** gezeigt, dass Licht und Materie ihre Energie nur in festen Paketen austauschen können. Beim Energieaustausch mit Materie verhält sich Licht also wie Teilchen – diese Energiequanten heißen **Photonen**. Sonst zeigt Licht meist den Charakter einer Welle. Dieser **Welle-Teilchen-Dualismus** zeichnet alle Objekte der Quantenwelt aus.

Auch Atome können Licht nur in „Energieportionen“ aufnehmen (absorbieren) oder abgeben (emittieren). 1913 entwickelte der dänische Physiker Niels Bohr ein Atommodell, das dieses Verhalten erstmals schlüssig erklären konnte: Die Elektronen rasen auf

C

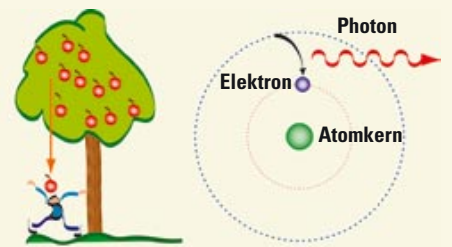
Bei der spontanen Emission fallen die Elektronen unvorhersehbar ins tiefere Energieniveau (oben). Laser brauchen die induzierte Emission, bei der ein vorbeifliegendes Photon 1 in einem Atom gezielt ein Elektron ins tiefere Energieniveau „schüttelt“. Das dabei freigesetzte Photon 2 schwingt im Gleichtakt mit Photon 1 (unten).

festgelegten Bahnen um den Atomkern. Trifft Licht auf das Atom, dann kann ein Elektron ein Photon absorbieren und mit dessen Energie auf eine höhere Bahn springen. Umgekehrt kann es auch in niedrigere Bahnen fallen. Dabei sendet es die frei werdende Energie wieder als Photon aus, das Atom leuchtet.

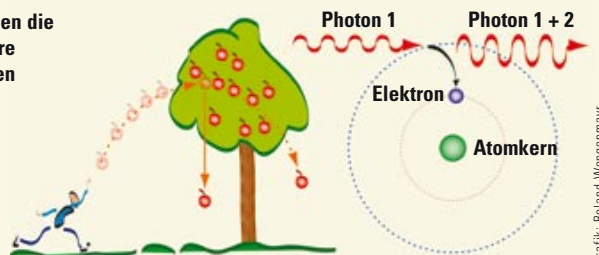
SPRUNGHAFTE ELEKTRONEN

Das Entscheidende am **Bohrschen Atommodell** war die „Quantisierung“ der Elektronenbahnen. Sie bilden eine Energieleiter mit festen Sprossen, dazwischen gibt es keine Bahnen. Die Elektronen können nur auf dieser Leiter in Quantensprüngen auf- und absteigen. Die Energie der absorbierten oder emittierten Lichtquanten muss dabei zu den Sprossenabständen passen. Die Energie eines Photons drückt sich in seiner Wellenlänge oder Frequenz aus, also in seiner Farbe. Jede Atomsorte hat eine eigene Energieleiter, deren Quantensprünge charakteristischen Lichtfarben entsprechen. Die heutige Quantenphysik verwendet zwar modernere Atommodelle. Sie haben aber wie Bohrs erstes Modell Quantenzustände mit festen Energien.

Wenn eine „klassische“ Lichtquelle wie die Sonne oder eine Glühlampe leuchtet, dann produziert sie einen optischen Brei aus vielen Lichtfrequenzen, Richtungen und „Polarisationen“. Mit Polarisation bezeichnen Physiker die Schwingungsrichtung des Lichtfeldes. Verschiedene Atomsorten mit unterschiedlichen Quantenübergängen emittieren Photonen vieler Frequenzen, also Energien oder

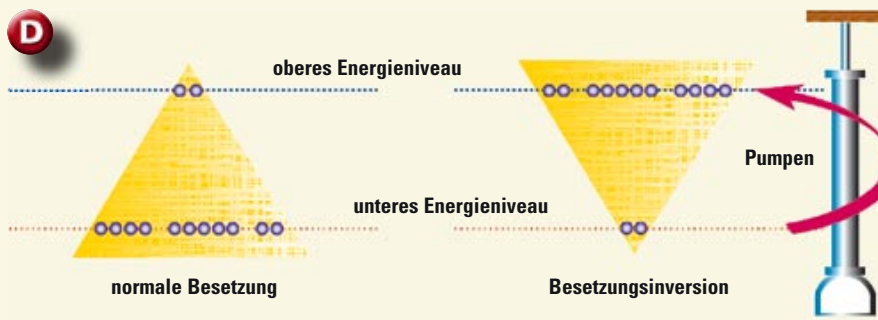


spontane Emission



induzierte Emission

© Grafik: Roland Wengenmayr



© Grafik: Roland Wengenmayr

▲ Normalerweise ist das untere Energieniveau stärker mit Elektronen (blaue Kugeln) besetzt als das obere. Die Besetzungsinversion stellt diese Pyramide auf den Kopf. Im Laser schafft sie die Voraussetzung für Lichtverstärkung über induzierte Emission.

Farben. Zudem strahlen die Atome ihre Photonen auch noch völlig unkoordiniert ab. Das Resultat ist ein perfektes Chaos mit einer breiten Farbmischung, die ein nahezu weißes Licht ergibt.

In einem Laser geht es dagegen extrem geordnet zu. Er strahlt Licht in einer sehr reinen Farbe ab, das er auch kräftig verstärkt. Dazu füttert er es ständig mit neuen Energiepaketen, mit Photonen in der exakt passenden Lichtfarbe. Dieser Verstärkungsmechanismus benutzt nur eine einzige Atomsorte. In diesen Atomen trägt wiederum ein einziger Quantensprung zwischen zwei ausgewählten Energiesprossen zur Verstärkung bei. Das ist der **Laserübergang**. Zudem emittieren diese Atome ihre Lichtquanten auch noch im präzisen Gleichtakt mit der Lichtwelle, die im Laser entsteht. Deshalb besteht Laserlicht aus sehr langen Lichtwellenzügen, wie eine lang und gleichmäßig laufende Meeresdüne. Das Licht einer Glühbirne erinnert dagegen eher an die kabbelige Wasseroberfläche eines Schwimbeckens, in dem viele Badende herumtoben.

PINGPONG MIT QUANTEN

Für die Verstärkung im Gleichtakt der Lichtwelle sorgt ein besonderer Effekt. Diese **induzierte Emission** beschrieb Albert Einstein 1917 zum ersten Mal, kurz nach seinem Brief an Emile Besso. Er hatte erkannt, dass Atome nicht nur spontan Lichtquanten abstrahlen können. Wenn ein Photon an einem Atom vorbei fliegt, kann es dieses auch gezielt zur Lichtemission anregen, indem es ein Elektron von einer höheren Bahn sozusagen herunter schüttelt, wie einen Apfel von einem Baum. Das Atom strahlt dabei ein Photon mit exakt der gleichen Energie – also Farbe – ab. Dieses neue Energiepaket schwingt sich sauber in den Rhythmus der

Lichtwelle im Laser ein. Dadurch vergrößert sich die Amplitude dieser Welle (**Abb. C**). Damit diese Lichtverstärkung funktioniert, müssen die Atome allerdings noch zwei Voraussetzungen erfüllen: Erstens müssen sich in ihnen auch Elektronen auf der höheren Sprosse des Laserübergangs befinden, und zweitens muss einer der atomaren Quantenübergänge genau der Energie der vorbeikommenden Photonen entsprechen. Im Laser passt das alles zusammen.

Einsteins Entdeckung hatte lange keine praktischen Folgen. Erst in den 1950er-Jahren erkannten einige Physiker, dass sie die induzierte Emission ganz gezielt zur Verstärkung von elektromagnetischen Wellen nutzen können. Die weitere wichtige Zutat zum Laser ist der **optische Resonator**. Ihn formen zwei Spiegel, zwischen denen die Quanten des Laserlichts wie Pingpong-Bälle hin und her laufen (**Abb. B**). Es gibt auch Laser mit noch mehr Resonatorspiegeln. Einer der Spiegel muss teilweise lichtdurchlässig sein. Durch ihn entwischt ein kleiner Anteil der Photonen und formt den Laserstrahl. Durch dieses gewollte Leck würde der Laser allerdings sofort seine Energie verlieren, besäße er keinen Lichtverstärker. Dieser Verstärker steckt im Lasermedium. Es befindet sich im Resonator und enthält genau die Atome, die im Laserübergang leuchten sollen. Wenn die Photonen beim Spiegel-Pingpong immer wieder das Lasermedium durchqueren, „schütteln“ sie die Elektronen dieser Atome herunter, die nun in Lawinen den Laserübergang hinunterfallen. Über die so stimulierte Emission schicken sie zusätzliche Photonen ins Pingpong-Spiel und das Lichtfeld im Resonator schwillt an.

Damit der Laser funktioniert, braucht er noch eine Zutat. Bis jetzt würden die Photonen nämlich das obere Energieniveau des Laser-

mediums entleeren, und dann wäre erst einmal Schluss. Der Laser braucht also noch eine Pumpe, die die Elektronen wieder ins obere Niveau des Laserübergangs schafft. Sie muss sozusagen das Fallobst wieder in den Baum hängen. Erst das permanente Pumpen stellt sicher, dass der Laser immer genug Elektronen für eine nennenswerte Lichtverstärkung zur Verfügung hat. Es versorgt den Laser auch mit frischer Energie, denn das ist klar: Wer die Äpfel wieder hoch hängt, leistet Arbeit. Manche Laser strahlen in Pulsen, andere kontinuierlich. Zur ersten Kategorie gehört Maimans Rubinlaser, dessen Pumpe das Blitzlicht der Gasentladungslampe war. Neben diesen „optisch gepumpten“ Lasern gibt es auch solche, in denen ein elektrischer Strom den Laserprozess pumpt. Dazu zählen Gaslaser wie der weit verbreitete Helium-Neon-Laser. In seinem Lasermedium erzeugen Elektroden leuchtende Gasentladungen, wie in einer Neonröhre. Auch Laserdioden – wie sie zum Beispiel in allen DVD- oder CD-Geräten stecken – werden elektrisch gepumpt.

PYRAMIDE AUF DEN KOPF GESTELLT

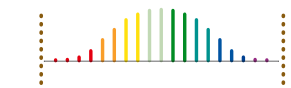
Die letzte Zutat ist das richtige Lasermedium, das die passenden Atomsorte mit dem Quantensprung in der gewünschten Lichtfarbe enthält. Es braucht aber noch eine weitere wichtige Eigenschaft: Die Elektronen müssen lange genug auf der oberen Energiesprosse seines Laserübergangs verweilen. Sie dürfen nicht zu anfällig für die **spontane Emission** sein, die sich leider nicht völlig ausschalten lässt. Die spontane Emission sabotiert die koordinierte Lichtverstärkung, denn sie lässt die Elektronen außerhalb des Gleichtakts ins niedrigere Energieniveau fallen. Zudem muss das Pumpen die untere Energiesprosse schnell genug leeren können. Nur wenn die Elektronen in diesem Quantenzustand genug Platz finden, können sie ungehindert dort hinein springen. Hat das Lasermedium diese Eigenschaften, dann kann das Pumpen in ihm den richtigen Betriebszustand herstellen, die **Besetzungsinversion**. Normalerweise verteilen sich die Elektronen über die Energieniveaus der Atome wie in einer Pyramide: Die unteren Sprossen der Energieleiter sind stark mit Elektronen bevölkert, die oberen immer dünner. Die Natur spart offenbar gerne Energie. Im Laser muss das Pumpen diese Besetzungspyramide nun auf den Kopf stellen (**Abb. D**): Im oberen Energieniveau des Laserübergangs müssen sich mehr Elektronen als im unteren sammeln. Erst dann finden die vorbeikommenden Photonen genügend Elektronen zum Herunterschütteln. →

→ Die Konstruktion eines Lasers wird umso anspruchsvoller, je kürzer die Wellenlänge seines Lichts sein soll. Mit schrumpfender Wellenlänge wächst nämlich die Energie der Photonen und damit auch der Quantensprung im Laserübergang. Je höher die obere Sprosse im Vergleich zur unteren ist, desto anfälliger reagieren die Elektronen dort auf die sabotierende spontane Emission. Mehr von ihnen fallen außerhalb des Gleichtakts mit dem Lichtfeld herunter, weniger im Rhythmus der induzierten Emission. Die frühen Laser leuchteten aus diesem Grund im langwelligeren roten oder infraroten Spektralbereich. Als der Japaner Shuji Nakamura 1995 die erste blau leuchtende Laserdiode vorstellte, war das eine Sensation. Noch viel kurzwelliger ist der Röntgenlaser, an dessen Entwicklung Physiker noch arbeiten (<http://xfelinfo.desy.de/de/projekt/2/index.html>).

E

Der Frequenzkamm unterteilt das sichtbare Lichtspektrum in viele, präzise nebeneinander angeordnete Farblinien. Hier sind allerdings nur wenige Linien angedeutet, in Wirklichkeit sind es Hunderttausende.

Frequenzkamm:



Lichtspektrum:



Der erste Prototyp des Frequenzkamms am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching.



Die aus dem Institut heraus gegründete Firma MenloSystems stellt heute Frequenzkämme in der Größe eines Schuhkartons her.

Es gibt auch Laser, die alle traditionellen Regeln brechen. Sie strahlen keine langen Lichtwellenzüge in einer reinen Farbe ab, sondern produzieren extrem kurze Pulse. Diese blitzen nur für wenige Femtosekunden oder gar Attosekunden auf. Eine Femtosekunde ist der Billiardstel Teil einer Sekunde, und eine Attosekunde ist nur ein Tausendstel dieser schon unvorstellbar kurzen Zeitspanne. Den Kurzpuls-Rekord hält derzeit mit 250 Attosekunden ein Team von Ferenc Krausz am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Krausz will mit solch kurzen Blitzen das Verhalten der Elektronen in Atomen oder Molekülen ablichten (Abb. A). Das wäre ein wichtiger Schritt zum Verständnis chemischer Reaktionen.

EIN LINEAL AUS REINEM LICHT

Einen berühmt gewordenen Kurzpuls-Laser hat Theodor W. Hänsch, ebenfalls am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, mit seinen Mitarbeitern Thomas Udem und Ronald Holzwarth entwickelt. Dieser Laser sendet viele kurze Lichtpulse hintereinander aus, die wir als kontinuierlich strahlendes weißes Licht wahrnehmen. Es unterscheidet sich aber grundlegend vom ebenfalls weißlichen Licht einer Glühlampe. Sein Spektrum besteht aus Hunderttausenden von separaten, extrem feinen Farblinien (Abb. E). Sie unterteilen das sichtbare Spektrum vom Tiefrot bis ins Violette in eine präzise „Skala“. Da diese Linien wie die Zinken eines superfeinen Kamms nebeneinander liegen, heißt das Lasergerät **optischer Frequenzkamm**. Die Garchinger Wunderlampe löste endlich ein großes Problem der Physik. Bis zu seiner Er-

findung gab es kein praktisch verwendbares Gerät, das die Frequenz von Licht – also seine Farbe – direkt und präzise messen kann. Im Prinzip besteht eine Frequenzmessung aus dem schlichten Mitzählen von Schwingungen in einer festen Zeitspanne. Doch sichtbares Licht macht in einer Sekunde fast eine Million mal einer Milliarde Schwingungen! Das ist viel zu schnell für jede Elektronik. In der Praxis mussten die Physiker deshalb ausweichen. Sie maßen mit Interferometern die Wellenlänge statt der Frequenz des Lichts. Beide Größen sind theoretisch auch völlig gleichberechtigt. Doch leider ist die Wellenlängenmessung immer viel ungenauer als eine Frequenzmessung.

Den Schlüssel zur Lösung dieses Problems lieferte eine besondere Eigenschaft der spektralen Linien des Frequenzkamms: Zwei benachbarte Linien unterscheiden sich nur gering in ihrer Frequenz. Ihre Überlagerung ergibt eine relativ langsam schwingende Schwebung von „nur noch“ einigen Hundert Millionen Schwingungen pro Sekunde. Das funktioniert wie bei zwei fast identischen Tönen in der Musik, die sich zu einem langsam an- und abschwellenden Gesamtklang überlagern. Die Garchinger Physiker „verzahnen“ diese optischen Schwebungen trickreich zu einem „Getriebe“ aus Licht. Es untersetzt die rasenden Lichtschwingungen in viel langsamere Mikrowellenschwingungen. Diese kann eine Elektronik mitzählen. Der optische Frequenzkamm erlaubt die Frequenzmessung

von jeder Lichtfarbe. Dabei ist er um sensationelle fünf Größenordnungen präziser als die besten Wellenlängen-Messungen. Er liefert auch die „Uhrwerke“ für neue optische Uhren, an denen zurzeit viele Forschergruppen arbeiten. Diese ticken hunderttausend mal schneller als die heutigen Cäsium-Atomuhren und erlauben eine entsprechend feinere Zeitmessung. Das ermöglicht beispielsweise eine viel genauere Satellitennavigation.

Theodor Hänsch erhielt 2005 den Nobelpreis für Physik, zusammen mit den beiden Amerikanern Roy Glauber und John Hall. Der Laser hat schon vielen Physikern den Weg zur höchsten Auszeichnung geleuchtet.

Schlagwörter: Fotoeffekt, Welle-Teilchen-Dualismus, Photonen, Bohrsches Atommodell, Laserübergang, induzierte/spontane Emission, optischer Resonator, Besetzungsinversion, optischer Frequenzkamm

Lesetipps: Horst Weber, Laser. Eine revolutionäre Erfindung und ihre Anwendungen. C.H. Beck, 1998; John-Mark Hopkins und Wilson Sibbett, Ultrakurze Laserblitze, Spektrum der Wissenschaft, November 2000

Internet: www.activeart.de/dim-shops/demo/lichtAtom/
www.ilt.fraunhofer.de/ger/100048.html

DIE „MAX“-REIHE

auch unter www.max-wissen.de – der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: