



Wunderlampe aus dem Quantenland – wie der Laser den Alltag und die Medizin erobert

Laser sind heute überall. Sie befeuern die Glasfasernetze der Telekommunikation, machen dem Internet per Lichtpost Beine, stecken in Laserpointern oder -scannern. Starke Industrielaser bearbeiten Werkstoffe. Laser spüren in der Atmosphäre umweltschädliche Gase auf, in Satelliten erfassen sie kleinste Veränderungen auf der Erde. Jüngste Generationen „optischer“ Atomuhren messen mit Lasern die Zeit immer genauer, Laser steuern künftige Quantencomputer. Auch in der Medizin werden Laser vielfältig genutzt und können in Zukunft noch mehr leisten: Das BIRD-Team, darunter Forschende vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, will Blutproben auf winzigste molekulare Spuren zur Krebsfrüherkennung durchleuchten. Das erfordert Laser mit extrem kurzen Lichtpulsen, das Spezialgebiet von Ferenc Krausz, Direktor am Institut.

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 Rubinkristall, dessen Enden verspiegelt sind. Das Blitzlicht löst in dem Rubin den ersten Laserpuls der Welt aus. Bald konnte Maiman der Presse mit seinem Rubinlaser kräftige rote Laserblitze vorführen. Von ihm hörten die Anwesenden auch zum ersten Mal das Kunstwort „Laser“, für „Light Amplification by Stimu-

lated Emission of Radiation“, auf Deutsch „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“. Heute sind Laser nicht nur Schlüsseltechnologien, sondern auch in der Grundlagenforschung allgegenwärtig. Forschende schauen mit den stärksten Laseranlagen der Welt immer tiefer in die Materie hinein oder verschmelzen damit 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 Quantenexperimente. Oder sie entwickeln ganz neue medizinische Methoden (**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 diesen vorauszuahnen. 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 eher wie Teilchen in Form von Energiequanten, den **Photonen**. Sonst zeigt Licht oft den Charakter einer Welle. Dieser **Welle-Teilchen-Dualismus** zeichnet alle Objekte der Quantenwelt aus. Der Laser nutzt beide Eigenschaften.

ABB. A: LASER FÜR KREBSFRÜHERKENNUNG



© Thorsten Naeser, Attoworld

Christina Hofer an einem der vom BIRD-Team entwickelten Geräte: Mit ultrakurzen Laserblitzen soll es Krebs im Frühstadium in Blutproben aufspüren. Die zukünftigen Geräte sollen Tausende von Blutproben vollautomatisch analysieren.

ANGEREGTE ELEKTRONEN

Atome können Licht nur als Energiequanten aufnehmen (absorbieren) oder abgeben (emittieren). Trifft ein Photon passender Energie auf ein Elektron eines Atoms, dann kann das Elektron das Photon absorbieren und in ein Orbital höherer Energie hüpfen. Umgekehrt kann das Elektron wieder auf seinen alten Platz herunterfallen, dabei emittiert es das überschüssige Energiequant erneut als Photon: Das Atom leuchtet.

Die Elektronen der Atomhülle lassen sich gruppenweise nach Energiestufen ordnen. Jeder Stufenabstand entspricht einem Quantensprung zwischen zwei benachbarten Energieniveaus in der Elektronenhülle. Eine „klassische“ Lichtquelle wie die Sonne oder eine Glühbirne besteht nun aus vielen verschiedenen Atomen, die wild durcheinander leuchten. Verschiedene Atomsorten mit unterschiedlichen Quantenübergängen emittieren Photonen vieler Frequenzen, also Energien oder Farben. Ihr unkoordiniertes Abstrahlen produziert ein optisches Chaos mit einer breiten Farbmischung, die ein nahezu weißes Licht ergibt.

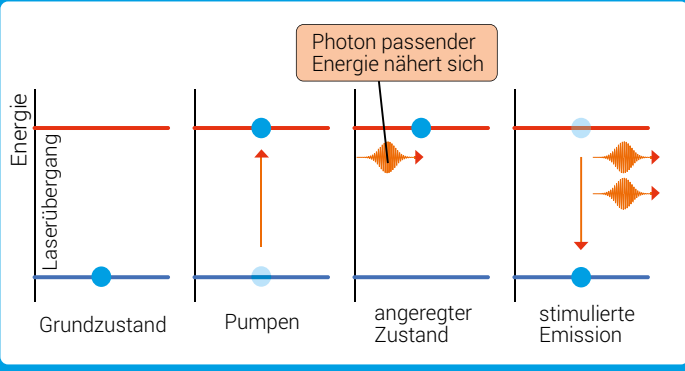
In einem Laser geht es dagegen extrem geordnet zu. Er strahlt Licht in einer sehr reinen Farbe ab, das er kräftig verstärkt. Dazu füttert er es ständig mit neuen Energiepaketen, mit Photonen in der exakt passenden Lichtfarbe. Dieser Verstärkungsmechanismus benutzt nur wenige, aufeinander abgestimmte Atomsorten, die zusammenwirken. In diesem „Atomkollektiv“ trägt wiederum ein einziger Quantensprung zwischen zwei speziell geeigneten Energieniveaus zur Verstärkung bei. Das ist der **Laserübergang**. Zudem emittieren diese Atome ihre Lichtquanten auch noch im präzisen Gleichtakt mit der Lichtwelle, die sich im Laser wie in einem Resonanzkörper aufschwingt. Deshalb besteht Laserlicht normalerweise aus sehr langen Lichtwellenzügen, im Gegensatz zum Glühbirnenlicht.

PINGPONG MIT QUANTEN

Für die Verstärkung im Laser sorgt ein besonderer Effekt. Diese **stimulierte Emission** beschrieb Albert Einstein 1917, kurz nach seinem Brief an Besso. Er hatte erkannt, dass Atome nicht nur spontan Lichtquanten abstrahlen können, diese **spontane Emission** dominiert das Leuchten klassischer Lichtquellen. Wenn ein Photon an einem Atom vorbeifliegt, kann es dieses auch gezielt zur Lichtemission anregen, indem es ein Elektron von einem höheren Energieniveau sozusagen herunterschüttelt. Das Atom strahlt dabei ein Photon mit exakt der gleichen Energie – also Farbe – ab. Im Laser sind allerdings viele gleichartige Atome gemeinsam an der stimulierten Emission beteiligt. Damit die Lichtverstärkung funktioniert, müssen diese Atome zusammen zwei weitere Voraussetzungen erfüllen: Erstens müssen sich Elektronen auf dem höheren Energieniveau des Laserübergangs befinden, zweitens muss dieser Laserübergang genau der Energie der vorbeikommenden Photonen entsprechen (**Abb. B**).

Damit das alles im Laser zusammenpasst, benötigt er einen **optischen Resonator** aus zwei Spiegeln. Ihr Abstand ist exakt auf ein Vielfaches der zu verstärkenden Laserwellenlänge justiert. Zwischen ihnen laufen die Quanten des Laserlichts wie Pingpong-Bälle hin und her (**Abb. C**). 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 verliert der Laser allerdings permanent Energie. Deshalb benötigt er einen Lichtverstärker, der immer neue Elektronen im Laserübergang nachliefert. Das macht das **aktive Lasermedium**. Es steckt im Resonator und enthält die Atome, die im Laserübergang leuchten sollen. Wenn die Photonen beim Spiegel-Pingpong immer wieder das Lasermedium durchqueren, „schütteln“ sie die Elektronen dieser Atome so, dass sie in Lawinen den Laserübergang hinunterfallen. Diese stimulierte Emission wirft immer neue Photonen

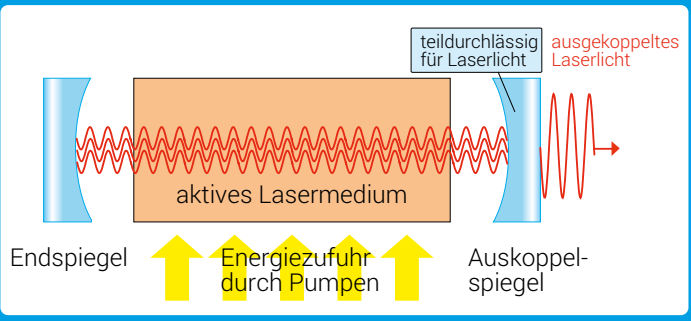
ABB. B: STIMULIERTE EMISSION



© R. Wengenmayr / CC BY-NC-SA 4.0

Laserübergang zwischen Grundzustand und angeregtem Zustand der Atome im aktiven Lasermedium. Von links nach rechts: Ein Elektron wird in den oberen Zustand gepumpt, dann kommt ein Photon passender Energie vorbei und stimuliert das Elektron, im Gleichtakt ein zweites Photon gleicher Energie abzustrahlen, wobei es wieder in den Grundzustand zurückfällt. Danach wiederholt sich das Spiel immer weiter, solange der Laser läuft.

ABB. C: AUFBAU EINES LASERS



© R. Wengenmayr / CC BY-NC-SA 4.0

ins Pingpong-Spiel, und das Lichtfeld im Resonator schwillt an. Allerdings fehlt noch eine Zutat: Der Laser braucht noch eine „Pumpe“, die immer neue Elektronen in das sich entleerende obere Niveau des Laserübergangs nachliefert. Dieses permanente **Pumpen** versorgt den Laser auch mit Energie. 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 die weit verbreiteten Laserdioden.

PYRAMIDE AUF DEN KOPF GESTELLT

Das Lasermedium muss die passende Atomsorte mit dem Quantensprung in der gewünschten Lichtfarbe enthalten. Überdies braucht es noch eine weitere wichtige Eigenschaft: Die Elektronen müssen lange genug auf dem oberen Energieniveau seines Laserübergangs verweilen. Sie dürfen nicht zu anfällig für die spontane Emission sein, die sich 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 das untere Energieniveau schnell genug leeren. Nur wenn die Elektronen in dem unteren Quantenzustand genug Platz finden, können sie ungehindert dort hineinfallen.

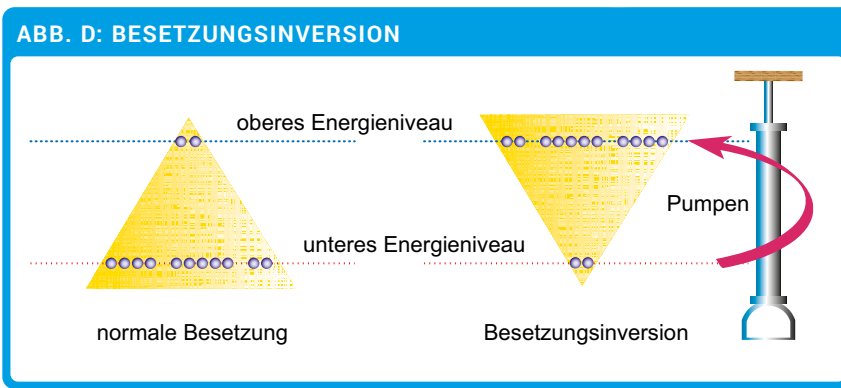
Hat das Lasermedium diese Eigenschaften, dann kann das Pumpen in ihm den richtigen Betriebszustand herstellen, die **Besetzungsinversion**. Normalerweise verteilen sich die Elektronen über die Energieniveaus der Atome wie in einer Pyramide: Die unteren Niveaus sind stark mit Elektronen bevölkert, die oberen immer dünner. Die Natur spart gerne Energie. Das Pumpen muss 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, die sich „herunterschütteln“ lassen.

Allerdings geschieht das Pumpen in den meisten Lasern nicht in einem einzigen Quantensprung, sondern mit Zwischenzuständen. Außerdem wird die Konstruktion eines Lasers umso anspruchsvoller, je kürzer die Wellenlänge seines Lichts sein soll. Mit schrumpfender Wellenlänge wächst nämlich die Energie der Photonen und damit auch der nötige Quantensprung im Laserübergang. Je höher das obere Energieniveau im Vergleich zum unteren liegt, desto anfälliger reagieren die Elektronen dort auf die sabotierende spontane Emission. Immer weniger von ihnen fallen im Rhythmus der induzierten Emission herunter. Die frühen Laser leuchteten aus diesem Grund im langwelligen roten oder infraroten Spektralbereich. Als der Japaner Shuji Nakamura 1995 die erste blau leuchtende Laserdiode vorstellte, war das eine Sensation. Noch viel kurzwelligere Röntgenlaser wie der European XFEL in Hamburg funktionieren wegen dieses Problems ganz anders. Sie beschleunigen freie Elektronen fast auf Lichtgeschwindigkeit und jagen sie dann durch ein wellenförmiges Magnetfeld: Das zwingt die Elektronen, nach vorne gerichtetes Röntgenlaserlicht abzustrahlen.

MIT LASERN GEGEN KREBS

Es gibt Laser, die kein „typisches“ Laserlicht erzeugen. Sie strahlen keine langen Lichtwellenzüge in einer reinen Farbe ab, sondern produzieren extrem kurze Pulse in einem Gemisch von Frequenzen. Besonders wichtig sind Femtosekundenpulse, denn auf dieser Zeitskala ändern sich chemische Bindungen und schwingen die Moleküle. Eine Femtosekunde ist der 10^{15} -te Teil einer Sekunde (0,000000000000001 Sekunden). Selbst Licht kommt in einer Femtosekunde nur 300 Nanometer weit – das entspricht dem Durchmesser eines Herpes-Virus.

Ein Pionier der **Ultrakurzpuls**-Forschung ist Ferenc Krausz, Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik. Dieses Team, zu dem auch Forschende der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in München gehören, will einen Traum verwirklichen: Ultrakurze Laserlichtblitze sollen es ermöglichen, bei Blutproben „gesund“ von „krank“ zu unterscheiden. Dazu nutzt es Infrarot-Laserpulse mit nur wenigen Femtosekunden Dauer. Im Messergebnis soll eine lernfähige Software nach Spuren von Molekülen suchen, die etwas über den Gesundheitszustand aussagen. „Zuerst wollen wir die häufigsten Krebsarten nachweisen können“, erklärt Mihaela Žigman, Leiterin der Breitband-Infrarotdiagnostik-Gruppe (BIRD): „Lungenkrebs, Brustkrebs, Prostatakrebs und Blasenkrebs.“ Die neue Technik soll Krebs schon früh am



Normalerweise ist das untere Energieniveau der Atome im Lasermedium 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.

molekularen „Fingerabdruck“ im Blut entdecken, lange bevor sich gefährliche Tumore im Körper verbreiten können. Die Molekularbiologin ist zudem Direktorin am Center for Molecular Fingerprinting in Budapest. Von dort erhalten die Garchingler Tausende von Blutproben, die der Biologe Frank Fleischmann in einem speziellen Tiefkühlverfahren mit flüchtigem Stickstoff für viele Jahre haltbar einlagert.

Die Entwicklung der nötigen komplexen Lasertechnologie leitet der Physiker Alexander Weigel. Er und Fleischmann führen im Garchingler Labor der LMU zu einem der gerade laufenden Geräte. „Dieser sogenannte Infrassampler [Abb. A] zieht automatisch Proben ein“, erklärt Fleischmann. Dann durchleuchtet das Gerät sie mit dem Infrarot-Laserlicht. Dessen kurzer Puls entspricht gerade mal einer einzigen Lichtschwingung und enthält viele verschiedene Infrarotfrequenzen. Solche Infrarot-Laserpulse regen dann unterschiedlichen Biomoleküle in den Blutproben zu charakteristischen Schwingungen an. „Der kurze, starke Infrarotpuls ist wie ein Gongschlag“, sagt Weigel. Jedes Biomolekül entspricht einem kleinen Gong, der nach dem Schlag in einer charakteristischen Frequenz nachschwingt. Dieses Nachschwingen macht die Moleküle selbst zu kleinen Sendern, die Infrarotlicht aussenden.

Das gesendete Antwortlicht ist extrem schwach, weshalb das Team es mit einer speziellen Empfänger methode aufzeichnet, elektro-optisches Sampling genannt. Nach dem kurzen, sehr hellen Infrarotlichtpuls, dem „Gongschlag“, wird es sofort dunkel. Nun lässt sich ungestört das Antwortlicht analysieren. Dazu tastet das elektro-optische Sampling die Wellenform des schwingenden elektrischen Feldes vom Antwortlicht ab. „Allerdings wäre eine Elektronik dafür viel zu langsam“, erklärt Weigel. Das Infrarotlicht, das von den Molekülen ausgesandt wird, schwingt nämlich mit einer Frequenz von bis zu mehreren zehn Terahertz. Ein Terahertz entspricht einer Billion, oder 10^{12} Schwingungen pro Sekunde. Entsprechend schnell muss der „Scanner“ sein, um die Wellenformen der

Schwingungen zu erwischen. Die Garchingler nutzen dafür Femtosekunden-Laserpulse, die sie mit dem Antwortlicht überlagern. Diese kurzen Laserpulse tasten dann die elektrischen Feldschwingungen des Antwortlichtes ab, ungefähr wie ein Scannerstreifen, der über ein Blatt Papier wandert. Damit das funktioniert, muss das anregende Infrarotlicht echtes Laserlicht sein, eine starke Infrarotlampe wäre nicht genug. Nur dann lässt sich das Abtastlicht exakt auf die Form der abzutastenden Welle abstimmen. Das sich ergebende Lichtsignal kann dann aufgenommen und elektronisch verarbeitet werden, während das Instrument die nächste Probe vorbereitet. Das gemessene Signal gleicht einem „Fingerabdruck“ der Moleküle. Es zeigt so Änderungen im Blut an, die durch Krankheiten wie Krebs hervorgerufen werden. Mit Hilfe von Maschinenlernen wird das System an vielen Proben darauf trainiert, von selbst die gesuchten Änderungen der molekularen Fingerabdrücke zu erkennen.

Nicht nur die Signale der Moleküle selbst sind sehr schwach. Die gesuchten Moleküle sind auch in teils extrem geringen Konzentrationen in der Blutprobe vorhanden. Und zum Durchleuchten müssen diese Proben auch noch selbst wenige Mikroliter winzig sein. Ein Infrassampler muss darin die gesuchten Moleküle in Mengen von wenigen Nanogramm nachweisen können, erklärt Mihaela Žigman: „Noch ist das BIRD-Projekt Grundlagenforschung und frühestens in zehn bis 15 Jahren reif für den breiten Einsatz in der Medizin.“ Doch dann wäre es ein großer Fortschritt für die Gesundheitsvorsorge.

Schlüsselbegriffe

Aktives Lasermedium, Besetzungsinversion, Fotoeffekt, Laserübergang, elektrisches/optisches Pumpen, optischer Resonator, Photonen, stimulierte/spontane Emission, Ultrakurzpuls, Welle-Teilchen-Dualismus

Link-Tipps

- **Attosekunden-Physik**
www.mpg.de/t061
- **BIRD-Projekt** (engl.)
www.mpg.de/t062
- **Laser** (Grundlagen mit Unterrichtsmaterial)
www.mpg.de/t063

Video-Tipps

- **Wie kurz ist eine Attosekunde?**
www.mpg.de/t064 > QR
- **Infrarotsensorik** (Vortrag)
www.mpg.de/t065

