

Lasertypen, Anwendungen, Nobelpreise

REDAKTION

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zu Ernst Peter Fischers physikhistorischem Artikel „Fünfzig Jahre Laser: Erhellende Entdeckung“ in **Physik in unserer Zeit**, 41. Jahrgang 2010, Nr. 5, S. 220. Der hier gegebene Überblick über Lasertypen, Anwendungen und Nobelpreise, die mit dem Laser verbunden sind, erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Besonders das Gebiet der Laseranwendungen ist riesig und nur schwer komplett zu erfassen – aber auch die Einsatzgebiete in der Grundlagenforschung sind sehr vielfältig.

Lasertypen

In den 1960er und 1970er Jahren entstand eine Vielzahl von Lasertypen, die jedoch heute weitgehend wieder verschwunden sind. Selbst die lange in der Laserspektroskopie dominierenden Farbstofflaser sind inzwischen Geschichte. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf Typen, die heute die eine wesentliche Rolle spielen.

Festkörperlaser, v. a. Nd:YAG-Laser (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser) und Nd:Glas-Laser. Wellenlänge im nahen Infrarot. Wird zum Beispiel in der Materialbearbeitung dort eingesetzt, wo die Strahlung in Glasfasern umgelenkt werden muss, wofür sich die um etwa eine Größenordnung längere Wellenlänge der CO₂-Laser (s. Gaslaser) nicht mehr eignet. Ein weiteres Einsatzgebiet liegt in der Medizin, zum Beispiel bei der Behandlung von Blutschwämmen oder in der Augenheilkunde (Ophthalmologie).

Faserlaser, ein spezieller Festkörperlaser. Er besteht aus einer Glasfaser, deren dotierter Kern das aktive Lasermedium bildet. Die Faser bildet zugleich einen Lichtwellenleiter. Faserlaser werden optisch gepumpt. Sie zeichnen sich durch mehrere herausragende Eigenschaften aus: sehr hoher Wirkungsgrad, mit dem sie bis zu über 30 % der aufgenommenen elektrischen Leistung in Lichtleistung umwandeln; sehr gute Strahlqualität; lange Lebensdauer; wartungsfreier und kompakter Aufbau. Einsatzgebiete sind energiesparende Datenübertragung per Licht in Glasfasernetzen, Femtosekundenlaser und in stärkeren Varianten auch die Materialbearbeitung.

Scheibenlaser, spezieller Festkörperlaser, dessen aktives Medium eine flache Scheibe bildet, die auf ihren Kreisflächen verspiegelt ist. Eine dieser beiden großen Flächen steht in Kontakt mit einer Kühlung. So kann der Laser besser als bei anderen Kristallgeometrien gekühlt werden und verkräftet daher höhere Leistungen. Die andere Fläche hat eine Doppelfunktion: Durch sie wird der Laser optisch gepumpt, zugleich koppelt er durch sie seinen Strahl aus. Der Wirkungsgrad ist mit bis zu 25 % sehr hoch. Einsatzgebiet ist vor allem die Materialbearbeitung.

Halbleiter-Laserdioden: Festkörperlaser. Kleine Dioden sind als optoelektronische Bauteile die mit Abstand meist produzierten Laser. Einsatzgebiete sind die Datenspeicherung und optische Informationsübertragung in Glasfasernetzen, also Unterhaltungselektronik, Kommunikations- und Informationstechnik (Optoelektronik). Starke Laserdioden werden zunehmend zum optischen Pumpen von Industrielasern eingesetzt (Nd:YAG- und CO₂-Laser).

Gaslaser, v. a. CO₂-Laser werden heute als Industrielaser für Materialbearbeitung eingesetzt. Sie bringen hohe Leistung, aber ihr mittlerer Infrarotbereich erlaubt keine Umlenkung des Laserlichts durch eine Glasfaser.

Femtosekunden-Laser: Solche Ultrakurzpuls laser spielen derzeit eine wichtige Rolle in der Grundlagenforschung (vielfältige ultrakurzzeit spektroskopische Anwendungen), im Frequenzkamm (Präzisionsnormal für optische Wellenlängen) und über diesen auch in der Entwicklung optischer Uhren, die bis zu tausendmal präziser als heutige Atomuhren sind. Derzeit dringen sie allerdings auch in Anwendungsgebiete vor, besonders in der Medizin. In der Ophthalmologie (Augenheilkunde) sind sie bereits in der Femto-LASIK-Technik etabliert. Bei diesem „Brille weglassern“ lösen sie schonend die obere Schicht der Augenhornhaut (v.a. das Epithel, das viele Nerven enthält), die zunächst weggeklappt werden muss. Danach wird die tiefere Hornhautschicht so mit einem Excimer-Laser (s. chemische Laser) bearbeitet, dass sich die Brechkraft des Auges ändert.

Chemische Laser: v.a. in Form des *Excimer-Lasers* (*Excited Dimer*, Reaktion kurzlebiger dimerer Moleküle wie F₂ oder ArF) in der Anwendung. Seine UV-Strahlung wird zum Beispiel in der Lithographie feiner Halbleiterstrukturen verwendet. Ein weiteres Einsatzgebiete ist die Augenheilkunde, dort vor allem die Bearbeitung der Augenlinse beim „Brille weglassern“. Zurückgehender Einsatz in der Materialbearbeitung. Andere Typen chemischer Laser werden für den Einsatz als militärische Waffe zum Beispiel zum Abschuss von Raketen entwickelt.

Freie-Elektronen-Laser: Grundlagenforschung, völlig anderes Funktionsprinzip (Beschleunigerphysik). Im Infrarotbereich bereits länger im Einsatz, am Forschungslabor DESY in Hamburg entsteht mit dem European XFEL ein Röntgen-Laser.

Stärkster Laser

Der „stärkste Laser“ der Welt ist die National Ignition Facility (NIF) am Lawrence Livermore National Laboratory (CA). Eigentlich besteht er aus 192 starken Nd:Glas-Lasern, deren Strahlen auf einen Punkt gebündelt werden. Dort soll in einer kleinen Kapsel, die mit Deuterium und Tritium gefüllt ist, eine Kernfusion gestartet werden. An der NIF gelang der bislang stärkste UV-Laserpuls im Januar 2010 (Stand: Sommer 2010). Er erreichte 1,1 Megajoule innerhalb von wenigen Milliardstel Sekunden.

Laser in der Grundlagenforschung

Chemie:

Untersuchung und Steuerung von chemischen Reaktionen

Spektroskopie: viele Anwendungen auf verschiedenen Gebieten

- Ultrakurzzeit-Spektroskopie.

Physik allgemein:

Spektroskopie: viele Anwendungen auf verschiedenen Gebieten

- Präzisionspektroskopie
- Frequenzkamm
- Ultrakurzzeit-Spektroskopie

optische Pinzetten zur Manipulation von Mikro- und Nanoteilchen

Holografie

Hochleistungslaser: Terawatt (VULCAN etc. ...), Petawatt (GSI, NOVA...)

Interferometrie.

Quantenphysik und Quantenengineering:

Kühlen von Atomen, Ionen, magnetooptische Falle

Manipulation von kalten Atomen in Quantengasen: Bose-Einstein-Kondensat,
Mott-Zustände etc.

Quantenoptik

Quanteninformation: verschränkte Photonen, Quantenteleportation,
Quantenkryptographie etc.

Biophysik, Biowissenschaften, Medizinphysik:

optische Pinzetten zur Manipulation z. B. von DNS

Einzelmolekül-„Mikroskopie“ (mit Fluoreszenzmarkern): Beobachtung von
Zellteilungsprozessen oder Virusangriffen

Verdampfen von Zellbestandteilen (z. B. Mikrochirurgie von Chromosomen)

Öffnen von Zellwänden, um z. B. RNS oder DNS einzuschleusen.

Umwelt- und Geowissenschaften:

Atmosphärenforschung (Messung von Spurengasen und Aerosolen durch Absorption von Spektrallinien und Reflexion des Laserlichts, LIDAR)
Vermessung der Kontinentaldriftgeschwindigkeit
Ringlaser für Geoforschung (Schwankungen in der Erdrotation, Seismologie)
Messung von Höhenreliefs auf Mond und Mars mit Lasern an Bord von Raumsonden.

Astronomie und Kosmologie:

präzise Abstandsmessung Erde-Mond
Künstlicher Stern, um bei Teleskopaufnahmen mit adaptiver Optik Atmosphäreneinflüsse eliminieren zu können
Zusammenschalten von optischen Teleskopen in Sterninterferometern (Very Large Telescope Interferometer, Paranal, Chile)
Präzisionsexperimente zur Allgemeinen Relativitätstheorie (Gravitationswellen: GEO 600)
Präzisionsspektroskopie in Teleskopen (Frequenzkamm).

Paläontologie:

Mikropräparation von Fossilien.

Metrologie

Meter, Realisierung des Längennormals
Sekunde, Realisierung des Zeitnormals, derzeit mit Maser-Resonatorprinzip (Cäsium-Uhren), in Zukunft mit Laser (optische Uhr mit dem Frequenzkamm als „Uhrwerk“).

Datenverarbeitung, Informations- und Kommunikationstechnik, Unterhaltungselektronik

Datenspeicherung auf CD und DVD
Holografische Datenspeicherung
optische Datenübertragung über Glasfaser (Internet)
Quantenkryptografisch verschlüsselte Datenübertragung über Glasfasernetze (bereits zur abhörsicheren Übermittlung von Wahl-Auszählungsergebnissen in Genf eingesetzt)
Laserdrucker
Laserkreiselssysteme

Alltag

Barcode-Laserscanner
Laserpointer
Laser-Geschwindigkeitsmessung (Polizei).

Kleidungsindustrie

Bleichen von Jeans
Computer gesteuertes Zuschneiden von Stoffen.

Industrie

Historisch erste Anwendung Anfang 1970er-Jahre: Bohren von Saphiren für mechanische Uhrwerke
Schneiden, Bohren, Umformen, Schweißen
Oberflächen härten und vergüten (durch gezieltes Verdampfen)
Gravuren, Beschriftungen
Herstellung sehr kleiner Präzisionsteile (Mikromechanik)
Präzisionsmessung von Bauteilmaßen
Spurführung von führerlosen Fahrzeugen
Präzise Geschwindigkeitsmessung (Doppler-Effekt)
Trimmen von Resistoren durch Abdampfen von Material
Ändern von Kontaktierungen in Mikroschaltkreisen (ICs)
Analytik
Exakte Vermessung von Oberflächen.

Sicherheitstechnik

Holografische Sicherheitsmarkierungen (Geld, fälschungssichere Etiketten)
Biometrie.

Bau

Laser-Distanzmessgeräte
Führungsstrahl und Distanzmessung im Tunnelbau und beim Verlegen von Pipelines.

Medizin

Laserskalpell: blutstillendes Schneiden incl. Kauterisieren des Gewebes

Spektroskopie:

- Nachweis z. B. von Magengeschwür verursachenden Bakterien anhand ihrer Stoffwechselprodukte

Augen (Ophthalmologie):

- Netzhautablösung durch „Anpunkten“ therapieren
- refraktive Chirurgie: Linsenfehler korrigieren (Kurz- oder Weitsichtigkeit)
- Grauer Star: Linse zertrümmern (anstatt mit Ultraschall)

Schönheit: Ausbleichen von Hautflecken und Tätowierungen

Tumorbehandlung (Hauttumoren).

Kunst, Kultur, Unterhaltung

Lasershow

Laserprojektionssysteme (Planetarien)

Holografische Kunstwerke.

Militär (allgemein)

Infrarotlaser als Zielhilfe für Gewehre

Laser gesteuerte Bomben und Waffen

Blenden feindlicher Soldaten, ist seit 1995 durch eine UN-Konvention geächtet.

Militärische Laser-„Kanonen“

Erfolgreiche Tests seit etwa 2004. Probleme: Systeme sehr groß, schwer, teuer, einige chemische Systeme produzieren zudem giftige Abgase. Verwendete Lasertypen: Chemisch gepumpter Laser: z. B. Wasserstoff-Deuteriumfluorid wie beim THEL, Tactical High-Energy-Laser von Northrop, der 60-mm-Granaten bis auf 550 m Entfernung zerstören kann. Alternativ werden für kleinere Systeme bis 100 kW Leistung elektrisch gepumpte Festkörperlaser entwickelt.

In den 1980er-Jahren arbeiteten Physiker im Rahmen des amerikanischen SDI-Programms an satellitengestützten Röntgenlasern, die feindliche Interkontinentalraketen und Satelliten aus dem All abschießen sollten. Diese „Einmal-Laser“ sollten durch das Zünden kleiner Atombomben „gepumpt“ werden. Wachsender politischer Widerstand erzwang jedoch die Abkehr von solchen Ideen.

Nobelpreise mit engem Bezug zum Laser

Physik:

- 1964 zur Hälfte an Charles H. Townes, zu je einem Viertel an Nicolai G. Basow und Alexander M. Prochorow (grundlegende Arbeiten, die zur Entwicklung des Maser-Laser-Prinzips führten)
- 1971 Dennis Gabor (Holografie)
- 1981 je ein Viertel für Nicolaas Bloembergen und Arthur L. Schawlow (Beitrag zur Laserspektroskopie)
- 1989 zur Hälfte für Norman F. Ramsey (wichtige Beiträge zum Wasserstoff-Maser und Atomuhren)
- 1997 zu je einem Drittel an Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji und William D. Phillips (Kühlen und Einfangen von Atomen in Fallen mit Laserlicht)
- 2000 je ein Viertel für Zhores I. Alferow und für Herbert Kroemer (Heterostrukturen für Halbleiterlaser)
- 2001 Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle, Carl E. Wieman (Bose-Einstein-Kondensat, dank Laserkühlung möglich geworden)
- 2005 zur Hälfte an Roy J. Glauber (Quantentheorie der optischen Kohärenz), zu je einem Viertel an John L. Hall und Theodor W. Hänsch (Laser basierte Präzisionsspektroskopie, optischer Frequenzkamm).

Chemie:

- 1999 Ahmed Zewail (Entwicklung der Femtosekunden-Spektroskopie zur Untersuchung von chemischen Reaktionen).