

# Kultur & Technik

Zeitschrift des Deutschen Museums München

1/1979 DM 5.-/öS 50.- Verlag Karl Thiemig München



»Gefährdeter Baum« von Max Pfaller aus der ADAC-Sammlung »Auto in Kunst«. Eine Manifestation des überwundenen Traumas? Immerhin wurde dem Automobilclub jahrelang nachgesagt, er meine es mit den Bäumen am Straßenrand nicht allzu gut. (80 x 80 cm, 1975)

Robert Schwankner

# Der Laser

»Es war eine ganz abenteuerliche Zeit, voll von Überraschungen und Enttäuschungen, von Erfolgen und von tiefliegenden Schwierigkeiten, deren Diskussion uns bis an die Grundlagen aller physikalischen Erkenntnis geführt hat.« So der Atomphysiker Werner Heisenberg über die »goldene« Physik der 20er Jahre, der Geburtsstunde der Lasertheorie.



Premiere des Bühnenlasers in  
Mozarts Zauberflöte während der  
Opernfestspiele 1970  
im Nationaltheater München

# 1917-1978

Die gesteuerte Umsetzung der Energie ist so alt wie die Menschheit selbst, denkt man zum Beispiel an das schon im alten Ägypten angewendete Prinzip der Niveauregelung von Öllampen. Dieses Verfahren der Selbststeuerung oder Rückkoppelung erwies sich als sehr fruchtbar und kehrte in abgewandelter Form wieder. Bekannte Fälle sind Pendeluhr und Dampfmaschine. Für elektrische Systeme wurde dieses Prinzip von A. Meißner (1913) in seiner Rückkoppelungs-(Dreipunkt-)Schaltung angewandt und damit die Verstärkung höherfrequenter Schwingungen ermöglicht. Mit der beginnenden Quantenmechanik am Anfang unseres Jahrhunderts war durch die theoretischen Arbeiten von Planck, Bohr und vor allem Einstein das Fundament für die Entwicklung des Transistors, der Tunnel diode (zur Übertragung höchstfrequenter Schwingungen) und schließlich des Lichtverstärkers, des Lasers, gelegt. Die erste Arbeit, die an Einsteins grundlegende Publikation »Zur Quantentheorie der Strahlung<sup>1</sup>« von 1917 direkt anknüpfte, erschien 1953 von J. Weber, University of Maryland. Sie befaßt sich mit Mikrowellenverstärkung durch Substanzen, die sich nicht im thermischen Gleichgewicht befinden.

In den Jahren 1954/55 gelang es den Amerikanern Gordon, Zeiger und C. H. Townes sowie den Russen N. G. Basov und A. M. Prochorow, Mikrowellenverstärker nach Webers Vorstellungen zu realisieren: den ersten Ammoniak-Maser (mikrowave amplification by stimulated emission of radiation). Im Jahr 1958 äußerten A. L. Schawlow und Townes die Vermutung, daß es möglich sei, dieses Prinzip auf hohe Frequenzen des sichtbaren Lichtes anzuwenden. Völlig überraschend gelang 1960 T. H. Maiman von den Hughes Research Laboratories –

dem großen Außenseiter – die Entwicklung des optischen Masers, auch Laser genannt. In seiner zunächst in der Zeitschrift Nature publizierten Arbeit »Stimulated Optical Radiation in Ruby<sup>2</sup>« beschreibt Maiman, wie es ihm gelungen war, den ersten Rubinimpuls laser in Betrieb zu setzen. Damit leitete er eine Phase atemberaubender Fortschritte ein, die sich nur mit dem Siegeszug des 15 Jahre vorher erfundenen Transistors vergleichen läßt.

Weitere Meilensteine dieser Entwicklung stellen der Bau des ersten Gaslasers 1962 durch Javan, W. R. Bennett und D. R. Herriott, im gleichen Jahr die Erfindung des Halbleiterlasers und die Inbetriebnahme des ersten chemischen Lasers 1965 durch J. V. Kasper und G. C. Pimentel dar.

## Vergessener Erfinder?

Schawlow, Miterfinder des Lasers, äußerte sich in der amerikanischen Wissenschaftszeitschrift Science vom 28. Oktober 1977: »I find myself very puzzled but that is how patent law works.« Was war geschehen? Schawlow ist der Schwager von Townes, der zusammen mit Prochorow und Basov 1964 den Nobelpreis der Physik bekommen hatte »... für grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der Quantenelektronik, die zur Konstruktion von Oszillatoren und Verstärkern auf der Basis des Maser-Laser-Prinzips führte«. In der Rubrik »News and Comment« von Science Nr. 148 war eine Bombe geplatzt: Nach zwanzigjährigem ermüdenden Kampf mit der Bürokratie hatte der Amerikaner Gordon Gould am 11. Oktober 1977 ein Patent für optisch gepumpte Lichtverstärker erhalten. Grundlage für diese Zuerkennung waren Goulds notariell beglaubigte Labortagebücher aus den Jahren 1957/58. Durch eine Reihe von unglücklichen Umständen

(militärisches Geheimhaltungsgebot u. a.) hatte Gould damals seine Forschungsergebnisse nicht veröffentlichen können. Jetzt war ihm ein erster Teilerfolg beschieden. Goulds Patentansprüche decken etwa ein Drittel des derzeitigen Lasermarkts ab. Zwar weist der glücklich-unglückliche Erfinder zur Zeit etwa 60 000 Dollar Anwaltschulden vor, dürfte sich aber nach Angaben von Science bald in den Club der Multimillionäre einreihen. Gould wird am Umsatz der Laserindustrie – das sind mehrere Milliarden Dollar jährlich – auch rückwirkend beteiligt werden müssen.

## Quantenmechanik für Spaziergänger

Der Ausdruck Laser hat in keiner Sprache seine Wurzel, sondern stellt ein weiteres Beispiel für die in angelsächsischen Ländern heimische und ins Physiker-Neudeutsch übernommene Vorliebe für Abkürzungen dar: light amplification by stimulated emission of radiation. Dies bedeutet übersetzt etwa: Lichtverstärkung durch erzwungene Aussendung von Strahlung.

In diesen wenigen Worten ist schon das ganze Wirkungsprinzip des Lasers festgelegt, zu dessen qualitativer Beschreibung wir zunächst einige historische Betrachtungen anstellen werden – Betrachtungen zu dem schrittweise gewachsenen Verständnis der Wechselwirkung von Licht und Elektronen.

Die Physik des 19. Jahrhunderts, von vielen schon zu einer abgeschlossenen Wissenschaft erklärt, erlebte mit den Arbeiten von L. Boltzmann, W. C. Röntgen, den Curies, Rutherford und vielen anderen eine neue Blüte. Es ging all diesen Wissenschaftlern »ein wenig wie Kolumbus, der Indien suchte und Amerika fand«, wie Carl Friedrich von Weizsäcker

einmal über Werner Heisenberg sagte. Die Folgen der Revolutionen – der Quanten- und Relativitätstheorie sowie der Thermodynamik – waren in ihrer Tragweite noch nicht abzusehen. Nach der Daltonschen Wiederbelebung des Atombegriffs folgte aus Gasentladungsexperimenten die grundlegende Erkenntnis, daß sich die neutralen Atome aus negativen und positiven Ladungsträgern aufbauen; aus dem Verhalten dieser Ladungsträger in Magnetfeldern schloß man, daß die positiven Ladungsträger wesentlich schwerer sein mußten als die negativen.

Bald darauf erkannte Philip Lenard bei der Bombardierung von Metallfolien mit Elektronen (und wenig später Rutherford bei ähnlichen Targetexperimenten), daß man gewissermaßen nach einem »Geist« schoß, da die Projektile die Metallfolien praktisch ungehindert durchdrangen. Bei genauerer Untersuchung des Phänomens jedoch stellte Rutherford fest, daß einige wenige der Projektile zurückgestreut wurden, also auf etwas »Festes« getroffen hatten. Dieses Feste, das aufgrund der mathematischen Analyse des Phänomens positive Ladung tragen mußte, nannte Rutherford den Atomkern. Der positive Atomkern als Zentralgestirn wird laut Rutherford von negativ geladenen Elektronen in einer diffusen leicht durchdringlichen Hülle umkreist. Nahezu die gesamte Masse des Atoms ist im Kern vereinigt, der nach dem Prinzip der Elektroneutralität von den negativen Elektronen umgeben ist. Bald begann man die Grenzen dieser Vorstellung zu erkennen. Nach dem Maxwellschen Konzept der klassischen Elektrodynamik strahlen bewegte Ladungen beständig Energie ab. Die Elektronen müßten also beständig Energie verlieren und damit Spiralbahnen folgend in das positiv geladene »Zentralgestirn«, in den Kern, stürzen.

Diesen Überlegungen standen aber die experimentellen Arbeiten des Basler Gymnasiallehrers J. Balmer entgegen, die er schon 1885 in seiner »Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs« niedergelegt hatte<sup>3</sup>. Balmer unterwarf Wasserstoff der elektrischen Entladung durch hohe

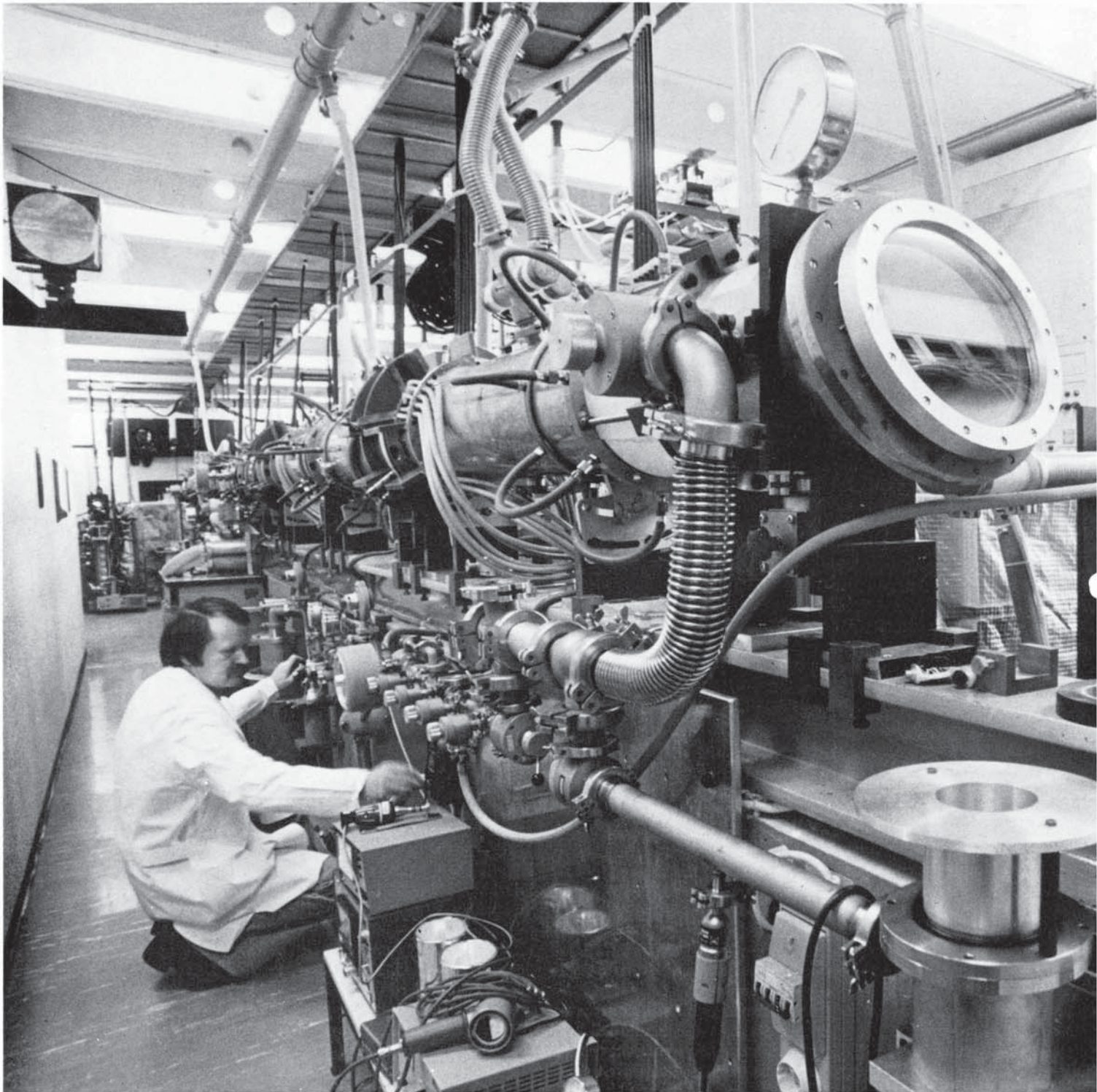
Spannung in einer nahezu evakuierten Röhre und zerlegte das entstehende Licht mittels Prismen und Gitter spektral. Dabei fiel ihm auf, daß etwa im Gegensatz zum Licht einer Kerzenflamme das Wasserstofflicht kein kontinuierliches Spektrum, sondern stets vier scharfe diskrete Linien, also ein *diskontinuierliches Spektrum*, er-

gab. Diese Diskontinuität der Spektren aber war mit der These der kontinuierlichen Energieabgabe bewegter Elektronen – das heißt mit den Spiralbahnen um den positiv geladenen Kern – unvereinbar!

Aus diesem Dilemma half ein junger dänischer Physiker: Niels Bohr. Ihm gelang die Befreiung

aus den Fesseln der klassischen Physik, indem er die Bedenken der Elektrodynamik beiseite schob. Er stellte sich kühn auf den Standpunkt, daß kontinuierliche Spektren, die experimentell nicht nachzuweisen sind, eben nicht existieren und man dies einfach hinnehmen müsse. Bohr ermöglichte damit die Synthese der experi-

mentellen Ergebnisse Balmers mit der 1900 erstmals in den Arbeiten Plancks angedeuteten und später von Einstein konsequent vertretenen Quantentheorie. Sie besagt, daß im Bereich atomarer Dimensionen Energie nur in Form kleinster Pakete, sogenannter Quanten – also *niemals kontinuierlich* –, übertragen werden kann.

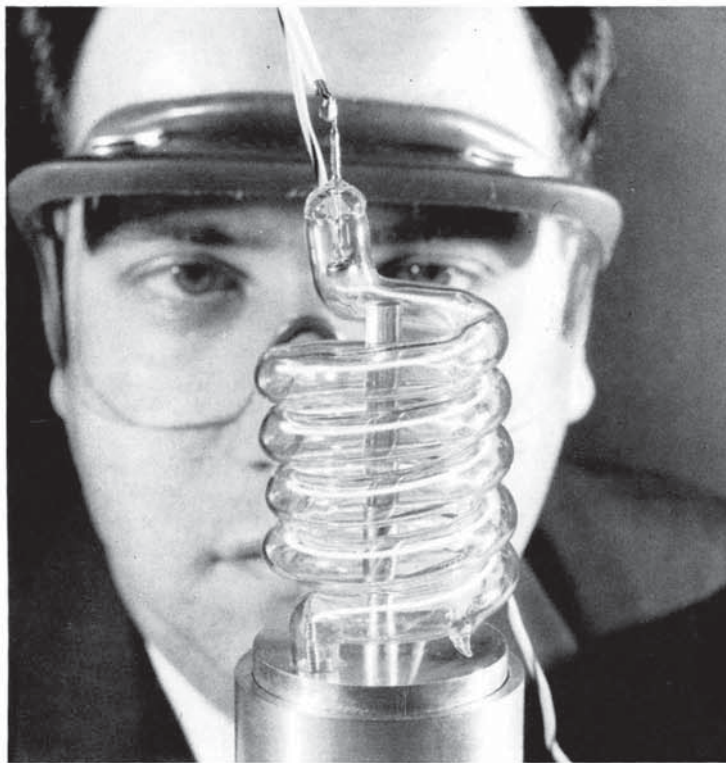


## Theodor H. Maiman, der Vater des Rubinlasers

Die Energie eines derartigen Quants ist gleich der Frequenz des zu- oder abgestrahlten Lichtes multipliziert mit einer Konstanten, dem sogenannten Planckschen Wirkungsquantum:

$$E = h \cdot \nu$$

(E = Energie des Quants, h = Plancksches Wirkungsquantum,  $\nu$  = Frequenz)



Lasergrundprinzip aufgedeckt. Die in das Anregungsniveau gepumpten Elektronen werden gezielt durch geeignete Quanten in Phase abgerufen. Nach dem Dualismus kann man einem Lichtquant eine Welle zuordnen. Die Erregerwelle und die dem abgerufenen Photon zugeordnete Welle sind in Phase und überlagern sich. Durch Reflexion kann man diese Wellen in sich zurückwerfen. Der Vorgang schaukelt sich zunehmend auf.

Fällt Licht durch ein transparentes Medium, wird es normalerweise durch Streuung geschwächt – man spricht von passiven Medien. Nach dieser Blackbox-Betrachtung müßte ein Medium, das mehr Licht abgibt als hineingeschickt wird, als aktives Medium bezeichnet werden. Nach dem Energieerhaltungssatz muß bei passiven Medien die absorbierte Lichtenergie in Form von Wärme abgegeben und bei aktiven Medien zugeführt werden. Die Energiezuführung beim aktiven Medium bezeichnet man auch als energetisches Pumpen.

Durch Einstrahlung von Licht – Pumpen mit einer Blitzlampe – erreicht man die Boltzmann-Inversion, das heißt, daß sich mehr Teilchen des Ensembles im angeregten Zustand als im Grundzustand befinden. Unter der Fülle der nach dem Pumpvorgang eintretenden spontanen Emissionen werden mit Sicherheit mehrere Photonen axial emittiert. Diese rufen weitere Photonen durch stimulierte Emission ab. Werden die Enden des Stabes mit chromatisch-selektiven hochwertigen Spiegeln versehen, so läuft der Strahl in sich zurück, wird am anderen Ende wieder reflektiert und so fort. Einer der beiden Endspiegel des Resonators, wie man das System aktives Medium/Spiegel nennt, wird auf ca. 2 % Transmission ausgelegt. An dieser Seite kann der Laserstrahl austreten. Durch die hohe Parallelität des Laserstrahls, die durch das beschriebene Resonatorsystem bewirkt wird, erreicht man unwahrscheinlich hohe Leistungsdichten. Die geringe Strahldivergenz des Lasers trat erstmals bei den Entfernungsmessungen Erde/Mond zutage (Laufzeitmessungen Erde/aufgestellter Spiegel/Erde).

Im Jahr 1913 stellte Niels Bohr im Philosophical Magazine seine kühne Theorie unter dem Titel »On the Constitution of Atoms and Molecules« vor. Seine wesentlichen Gedanken sind in den beiden Bohrschen Postulaten niedergelegt:

1. Für jedes Elektron gibt es eine Anzahl von stationären Zuständen (Niveaus) im Atom, in denen es existieren kann, ohne Energie abzustrahlen – die klassischen Kreisbahnen. Das Atom kann seinen Energiezustand dadurch ändern, daß die Elektronen von einem stationären Zustand direkt in einen anderen übergehen – Zwischenzustände gibt es nicht. Die Bahnradien sind eine gequantelte Größe.
2. Beim Quantensprung des Elektrons von einem Niveau in ein anderes werden Lichtquanten absorbiert bzw. emittiert; diese Quanten genügen der Planckschen Frequenzbedingung.

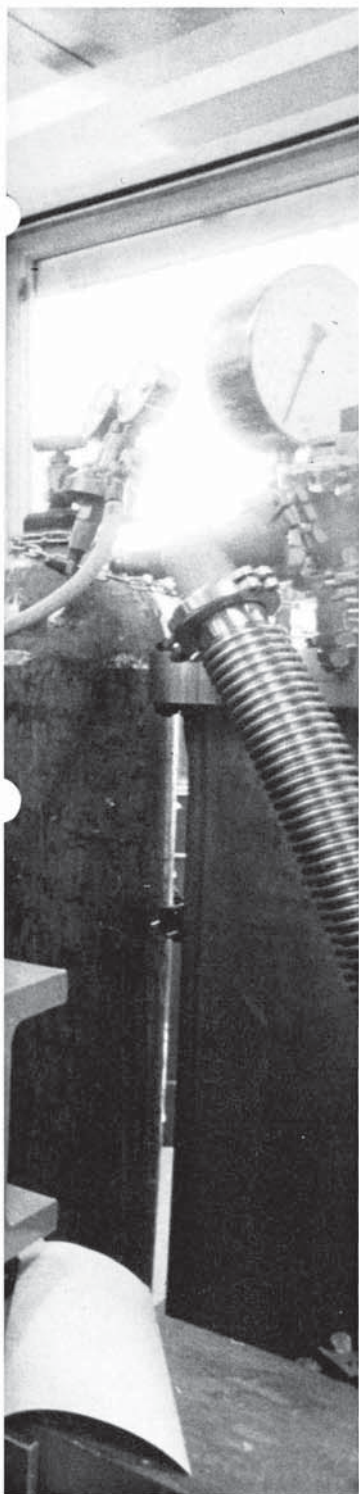
### Deutung der Wechselwirkung Photon Elektron

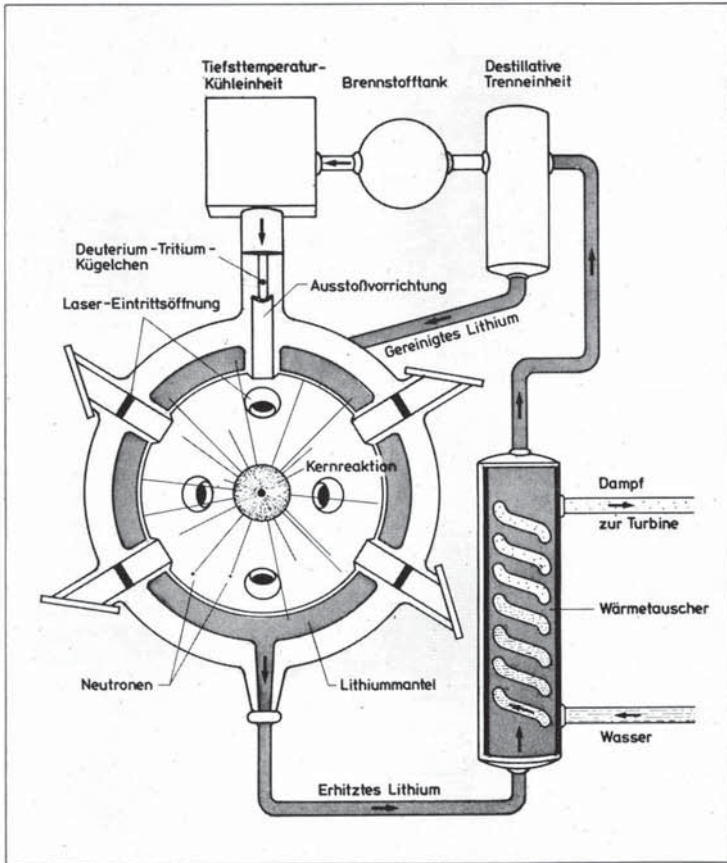
In seiner Arbeit »Zur Quantentheorie der Strahlung« befaßt sich Albert Einstein mit den Wechsel-

**»Asterix III« des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik zählt zu den stärksten Lasern der Welt. Er erreicht für  $10^{-10}$  Sekunden  $10^{12}$  Watt – mehr als die 15fache Leistung aller Kraftwerke der Bundesrepublik zusammen**

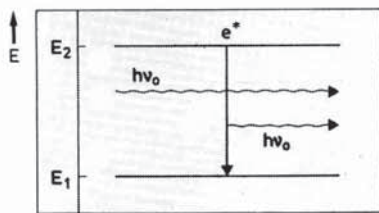
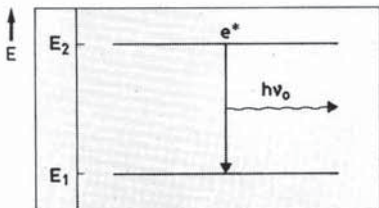
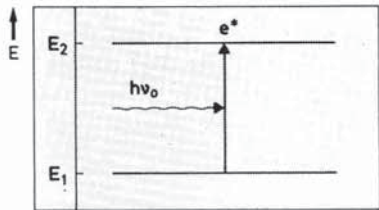
wirkungen zwischen Licht und Elektronenhülle der Atome beziehungsweise zwischen Lichtquanten und Elektronen. Er unterscheidet dabei drei Phänomene – das der Absorption, der spontanen und der stimulierten Emission:

Ein Elektron wird durch die von einem Photon übertragene Energie von einem Grund- in einen Anregungszustand gehoben (Absorption); in diesem Zustand verweilt das Elektron nur sehr kurze Zeit. Bei der Rückkehr in den Grundzustand gibt es zwei Möglichkeiten der Emission: Aus den thermodynamischen Untersuchungen Boltzmanns folgt für ein Ensemble von Teilchen (falls mehrere Energiezustände nebeneinander existieren), daß sich bei positiver Temperatur stets mehr Teilchen im Grund- als im Anregungszustand befinden. Die Elektronen im Anregungszustand werden statistisch unter Emission eines Lichtquants in das Grundniveau zurückspringen (spontane Emission). Die andere Möglichkeit der Emission ist jedoch die für das Laserprinzip entscheidende: Bestrahlt man ein Elektronensemble, das Elektronen im Grund- und Anregungszustand beinhaltet, mit Licht (das nach der Planckschen Frequenzbedingung dem Elektronensprung-Anregungs-/Grundzustand entspricht), so werden die Elektronen im Anregungszustand *nicht statistisch* unter Quantenemission abgerufen, *sondern gezielt* (stimulierte Emission). Damit ist das





Schema eines Laserfusionsreaktors



Wechselwirkung Photon Elektron. Von oben nach unten: Absorption, spontane Emission, stimulierte Emission

$$h\nu_0 = E_2 - E_1 = \Delta E$$

oder, weniger bildlich ausgedrückt, die Wellen im Gleichtakt schwingen. Damit ist das elementare Grundprinzip des Lasers dargestellt.

Jeder Laser verfügt über die Grundelemente Pumpmechanismus, Resonator, aktives Medium. Man unterscheidet kontinuierlich arbeitende Laser wie zum Beispiel Gaslaser (Argonlaser, Helium-Neon-Laser) und Puls laser (Rubinlaser). Fast jedes Anwendungsgebiet hat in den letzten beiden Jahrzehnten seinen »eigenen« Laser entwickelt. Man kann auch Pumpmechanismen differenzieren: externe durch Blitzlampen, Neutronenbestrahlung; interne durch Gasentladung, chemische Energie; unterschiedliche Resonatorlänge von Zehntelmillimetern bis zu mehreren Metern (Halbleiterlaser, Faltlaser); unterschiedliche Leistung (von Millibis Terawatt); nach dem Aggregatzustand des aktiven Mediums (Festkörper-, Gas-, Ionen- und Flüssigkeitslaser); nach der Art des Strahlungsvorganges (Elektronenanregung, Molekularschwingungsanregung)<sup>4</sup>.

## Anwendung heute und morgen

**Laserisotopentrennung.** Die hohe Monochromasie des Lasers macht man sich bei der Trennung von Isotopen zunutze. Wie schon der Name Isotop ausdrückt, handelt es sich hierbei um Nuklide, denen der gleiche Platz im periodischen System der Elemente zukommt; die Isotope haben nahezu identische Eigenschaften. Bisher sind vier Verfahren bekannt, um das natürliche Uran 235/238 mit dem alleinspaltbaren Uran 235 anzureichern, was zur wirtschaftlichen Ausnutzung der Kernspaltung unbedingt erforderlich ist. Drei dieser Verfahren basieren auf Gassdiffusionstrennungen (K. Clusius und G. Dickel, Institut für physikalische Chemie der Universität München, 1938), die den geringen Massenunterschied der beiden Isotope ausnutzen. Durch die unterschiedliche Kernmasse wird auch die Kernstruktur und damit die Effektivladung verändert; dies wirkt sich auf die Anregungsfähigkeit seiner Valenzelektronen aus, die bei beiden Isotopen etwas unterschiedlich ist. Die »Spektrosko-

piker« bezeichnen diesen Effekt, der bisher wegen der geringen Monochromasie der verfügbaren Lichtquellen kaum ausgenutzt werden konnte, als Masseneffekt. Durch Verdampfen und Bestrahlen von Uran beziehungsweise Bestrahlen einer gasförmigen Uranverbindung mit dem natürlichen Isotopengemisch Uran 235/238 ist es jetzt aufgrund der hohen Monochromasie möglich geworden, selektiv nur eines der beiden Isotope anzuregen, zu ionisieren. Das »Sortieren« übernimmt dann ein Magnetfeld, das die ionisierten Atome ausfiltert. Ein neuer Weg zur günstigen billigeren Isotopenanreicherung tat sich damit auf. Die Anwendung der Isotopentrennung wird jedoch nicht auf die Kernspaltung beschränkt bleiben. Auch in der Nuklearmedizin sind Bestrebungen im Gange, radioaktive Diagnostika durch stabile Isotope zu ersetzen. So wären jene durch Laserisotopentrennung erstmalig zu einem vernünftigen Preis zu erhalten.

**Laserfusionsreaktor.** In verschiedenen Laboratorien der Welt wird fieberhaft auf dem Gebiet der Kernfusion gearbeitet; sie könnte die Lösung aller Energieprobleme der Menschheit bedeuten. Ein Weg wird zum Beispiel im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching versucht: Ein tiefgefrorenes Kügelchen (Pellet) aus Deuterium/Tritium fällt in den hochevakuierten Reaktionsraum ein; gleichzeitig wird es von mehreren Hochleistungslasern beschossen. Dabei tritt der sogenannte Raketeneffekt auf: Explosionsartig verdampft die Materie an der Oberfläche des Kügelchens und strömt als heißes Plasma weg, der Rückstoß des nach außen fortfliegenden Materials erzeugt nach dem Newtonschen Reaktionsprinzip eine Druckwelle, die ins Innere der Kugel läuft. Dosierte man nun die Bestrahlung geschickt und stimmt die zeitliche Abfolge der Laserblitze ab, so läßt sich erreichen, daß alle durch Raketeneffekt erzeugten Druckwellen im selben Moment im Zentrum des Kügelchens aufeinandertreffen. Dort pressen sie das Material auf das Zehntausendfache seiner ursprünglichen Dichte zusammen, für einige hundert Milliardstelsekunden klettert die Temperatur

# Der Laser

Ein weiterer Vorteil des Laserlichts ist seine ausgezeichnete Monochromasie, eine bis dahin unerreichte Frequenzstabilität des Lichts. Unter Kohärenz des Laserlichts versteht man, daß die den Photonen zugeordneten Lichtwellen in Phase den Resonator verlassen, daß das Licht quasi wie Soldaten im Gleichschritt marschiert

auf 1 Milliarde Grad, und der Druck steigt auf über 100 000 Milliarden Bar, also auf Werte, die diejenigen im Inneren des Dauerfusionsofens Sonne um den Faktor 100 übertreffen. Die Fusion läuft so rasch ab, daß ein Überschuß an Kernverschmelzungsenergie erzeugt wird, bevor das Pellet auseinanderfliegt.

Erst kürzlich machte eine Meldung aus den USA Schlagzeilen. Amerikanische Wissenschaftler setzten in Los Alamos erstmals den mit 0,5 Terawatt stärksten Kohlendioxidlaser der Welt für Kernverschmelzungsversuche ein. Bisher wurde allerdings der «scientific break-even point», der Punkt, bei dem mehr Energie entsteht als hineingesteckt wird, noch nicht erreicht. Bis dahin sind noch eine Menge technischer Probleme zu lösen.

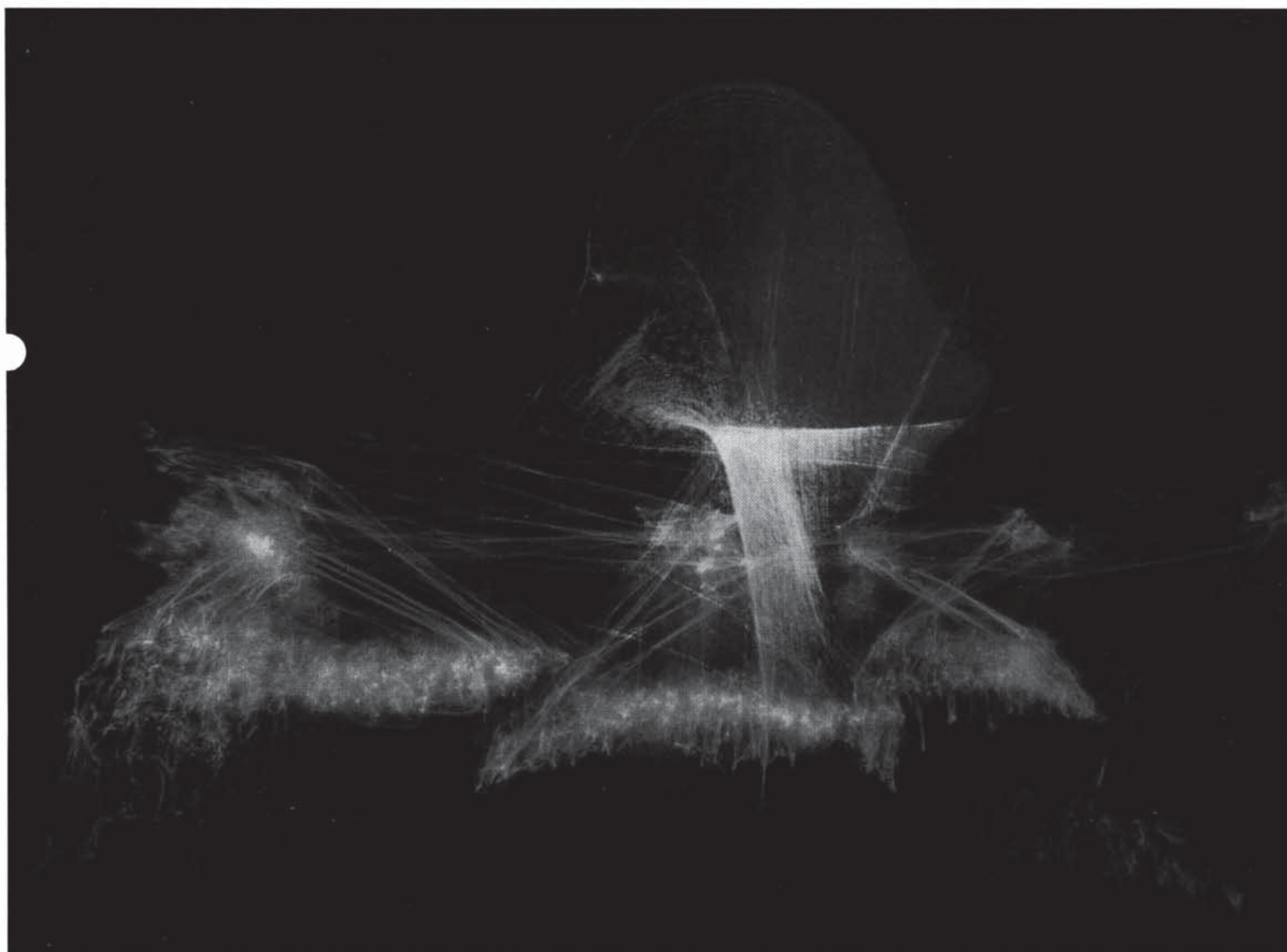
**Laserspektroskopie.** Die Verwendung von Lasern in der Spektroskopie läßt aufgrund ihrer ausgezeichneten Abstimmbarkeit und hohen Monochromasie direkte Vermessungen von Hyperfeinstrukturen der Atomhülle zu in einem Bereich, der nur noch von der Unschärferelation begrenzt wird. Das also ermöglicht Experimente, auf die man noch vor wenigen Jahren nicht hoffen konnte. Eine interessante Anwendung des Lasers ist die Untersuchung der Atmosphäre auf Schadstoffe. Die einfachste Anwendung, die über große Meßstrecken durchgeführt werden kann, ist die Laserluftphotometrie. Es wird dabei bestimmt, wieviel Laserlicht durch eine definierte Luftschicht ungehindert hindurchkommt oder, in anderen Worten, wieviel Licht durch Staub, Aerosole und dergleichen

ausgestreut wird und damit die Photozelle nicht mehr erreicht<sup>5</sup>. Mittels Laser abstimmbarer Frequenz kann das optische Analogon des Radars (radio detecting and ranging), das Lidar (light detecting and ranging), verwirklicht werden. Die Reichweite derartiger Meßgeräte, die Luftverunreinigungen qualitativ und quantitativ selektiv erfassen können, beträgt bereits bis zu fünf Kilometer. Jeder Schadstoff (SO<sub>2</sub>, HCl usw.) weist charakteristische unterschiedliche Absorptionswellenlängen auf.

**Laserchemie.** Während es zahlreiche meßtechnische Laseranwendungen in der Chemie gibt, so zum Beispiel in der polarimetrischen und der photometrischen Analyse, etabliert sich inzwischen ein neuer Zweig der Chemie, die Laserchemie. Durch selektive und intensive

Schwingungsanregung von Molekülen gelingt es bereits (Arbeitsgruppe für Laserforschung am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Privatdozent Dr. K. L. Kompa, und am Institut für anorganische Chemie der Universität München, Lehrstuhl Professor Dr. Heinrich Nöth)<sup>6</sup>, vereinzelt zu Molekülen zu gelangen, die man auf thermischem Weg nicht erhalten konnte. Die bisherigen Experimente zeigen, daß bei der Anregung endothermer Reaktionen

**Auf die ganze Größe des Bühnenbildes projiziert der Laser eine Vielzahl stehender oder bewegter Farbfiguren, die – im Gegensatz zu Lichteffekten mit herkömmlichen Bühnenscheinwerfern – eine starke räumliche Wirkung haben. Entstanden im Forschungslaboratorium von Siemens**



insbesondere die vorhandene Schwingungsenergie der Reaktandenmoleküle für den Reaktionsverlauf entscheidend ist. Sie kann selektiv (eventuell über den Umweg von Energie-Transmittermolekülen) dem Reaktionssystem durch abstimmbare Laser zugeführt werden.

Ein Teilgebiet dieser neuen Disziplin ist die Entwicklung chemischer Laser, um die sich in der Bundesrepublik vor allem Kompa verdient gemacht hat. Den Amerikanern Kasper und Pimentel gelang es erstmals 1965, chemische Systeme zum »Lasern« zu bringen (= Populationsinversion bei chemischen Reaktionen) – es handelte sich um einen Chlorwasserstofflaser. Bisher am besten untersucht wurde der auf Schwingungs- und Rotations-IR-Emission beruhende Fluorwasserstofflaser, den Kompa 1966 zusammen mit Pimentel entwickelte<sup>7</sup>.

Die chemischen Laser haben sich in ihrer kurzen Geschichte bereits als spektroskopische Lichtquellen einen Namen gemacht.

Immer mehr zeichnet sich ab, daß ihnen auch als Energiequelle für chemische Reaktionen unter kontrollierter Schwingungsanregung Interesse zukommt. Damit eröffnen sich neue Wege für die präparative Chemie.

*Laser in der Medizin.* Aus der Fülle der medizinischen Laseranwendungen seien hier nur einige stellvertretend genannt. Die Chirurgie verwendet Kohlendioxidlaser als »Skalpelle«. Der Wunsch, auch stark durchblutete Gewebe wie Leber, Nieren oder Gehirn unblutig operieren zu können, ist so alt wie die Chirurgie selbst. Versuche zur Laserchirurgie gehen von der Überlegung aus, daß die Temperaturverteilung im Laserbrennfleck unter optimalen Bedingungen so gestaltet werden kann, daß neben der berührunglosen Schneidwirkung ein Gefäßverschluß erreicht wird.

Laserlicht läßt sich wegen seiner extremen Bündelung besonders einfach durch flexible Glasfasern leiten. Dies findet nicht nur Anwendung in der Informationsübertragung, wo etwa viele tausend Telefongespräche gleichzeitig auf einen Laserstrahl moduliert werden können, sondern auch in der Notfall-Endoskopie bei starken

Magenblutungen. Hier kann der Laser zu einem wertvollen blutstillenden Instrument des Arztes werden. Bei Operationen an Stimmbändern macht man sich die Eigenschaft zunutze, daß das Laserlicht genau abgegrenzte kleine Bezirke zerstören kann, ohne die Umgebung in Mitleidenschaft zu ziehen. Die Augenmedizin »schweißt« durch Photokoagulation die sich ablösende Retina wieder an. Bei großflächigen Verbrennungen kann das zerstörte Gewebe sehr vorteilhaft mit Lasern abgetragen werden. Bei schwerheilenden Geschwüren und Wunden hat man mit Dauerlaserbestrahlung geringer Leistung gute Heilerfolge erzielt. Auch in der Akupunktur werden bereits die Nadeln teilweise durch Laserbestrahlung ersetzt.

*Holographie.* Eine weitere Anwendung des Lasers ist die von D. Gabor entdeckte Holographie, die dreidimensionale Photographie. Hier kommt die Kohärenz des Lasers zur Wirkung: Der Strahl wird bei der Aufnahme in Objekt- und Referenzstrahl aufgespalten. Der Objektstrahl trifft auf den aufzunehmenden Gegenstand und wirkt reflektiert. Er trägt dabei als Phaseninformation die dreidimensionale Oberflächenstruktur des Objektes auf. Auf der Photoplatte vereinigt man durch geschickte Strahlführung Objekt- und Referenzstrahl. Das entwickelte Positiv ist ein Bild »grau in grau«; wird es jedoch von starkem monochromatischen Licht durchstrahlt, erhält man ein dreidimensionales virtuelles Bild des Gegenstandes, um das man herumgehen kann; je nach Blickwinkel stellt sich die Gegenstandsperspektive wieder ein.

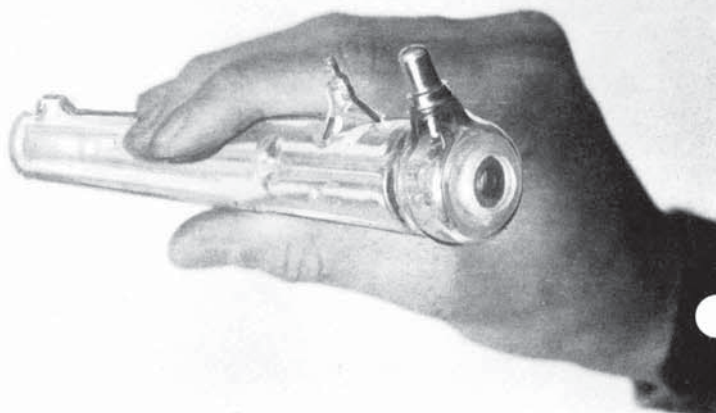
Durch holographische Interferometrie (physikalischer Vergleich zweier kurz nacheinander vom selben Gegenstand aufgenommenen Hologramme) kann man Werkstoffe prüfen. Nimmt man etwa das Hologramm einer Tabakspfeife zweimal mit wenigen Sekunden Abstand auf, erkennt man deutlich eine Schrumpfung durch Abkühlung. Auf ähnlichen Messungen beruhen die Untersuchungen von Flugzeugreifen. Hier läßt sich mit Hilfe der holographischen Interferometrie (wenn zwischen zwei Hologrammen etwas

Luft abgelassen wird) ungleiche Ausdehnung des Reifenmaterials und damit Schadhafte feststellen.

Durch holographische Interferometrie kann man im wahrsten Sinne des Wortes das Gras wachsen sehen. Größenzunahmen von Pflanzen zwischen zwei holographischen Aufnahmen lassen sich eindeutig verfolgen. Laserinterferenzmethoden ermöglichen automatisches Vorsortieren von Abstrichpräparaten der Krebsvorsorge – bis auf einen kleinen vom Arzt nachzuprüfenden Anteil (Projektgruppe für Laserforschung der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung Neuberger, Abteilung für kohärente Optik). Auch das Sichten umfang-

reichen Materials etwa in Fingerabdruckkarteien kann durch Vergleich des Objekts mit der gespeicherten Referenz vollautomatisch erfolgen.

*Laser und Kunst.* Im Münchener Nationaltheater hatte während der Opernfestspiele 1970 in Mozarts Zauberflöte der Bühnenlaser seine große Premiere. Der Laserstrahl tritt durch geriffeltes Glas und wird durch die Summe der Phänomene Streuung, Reflexion, Brechung und Beugung unterschiedlich abgelenkt und aufgefächert. Dabei entstehen lichtintensive, ästhetische, sich ständig verändernde Gebilde und Strukturen. Der Laser wird von immer mehr Künstlern als Medium für Bühne, Design und Architektur benützt.



Helium-Neon-Laserröhre

Eindrucksvoll zeigte sich dies auf der Dokumenta 1978, wo zum Beispiel mittels Kohlendioxidlaser Kunstwerke in Plexiglas »geschrieben« wurden. Das Plexiglas verdampft dabei lokal, und es ergeben sich bizarre Strukturen.

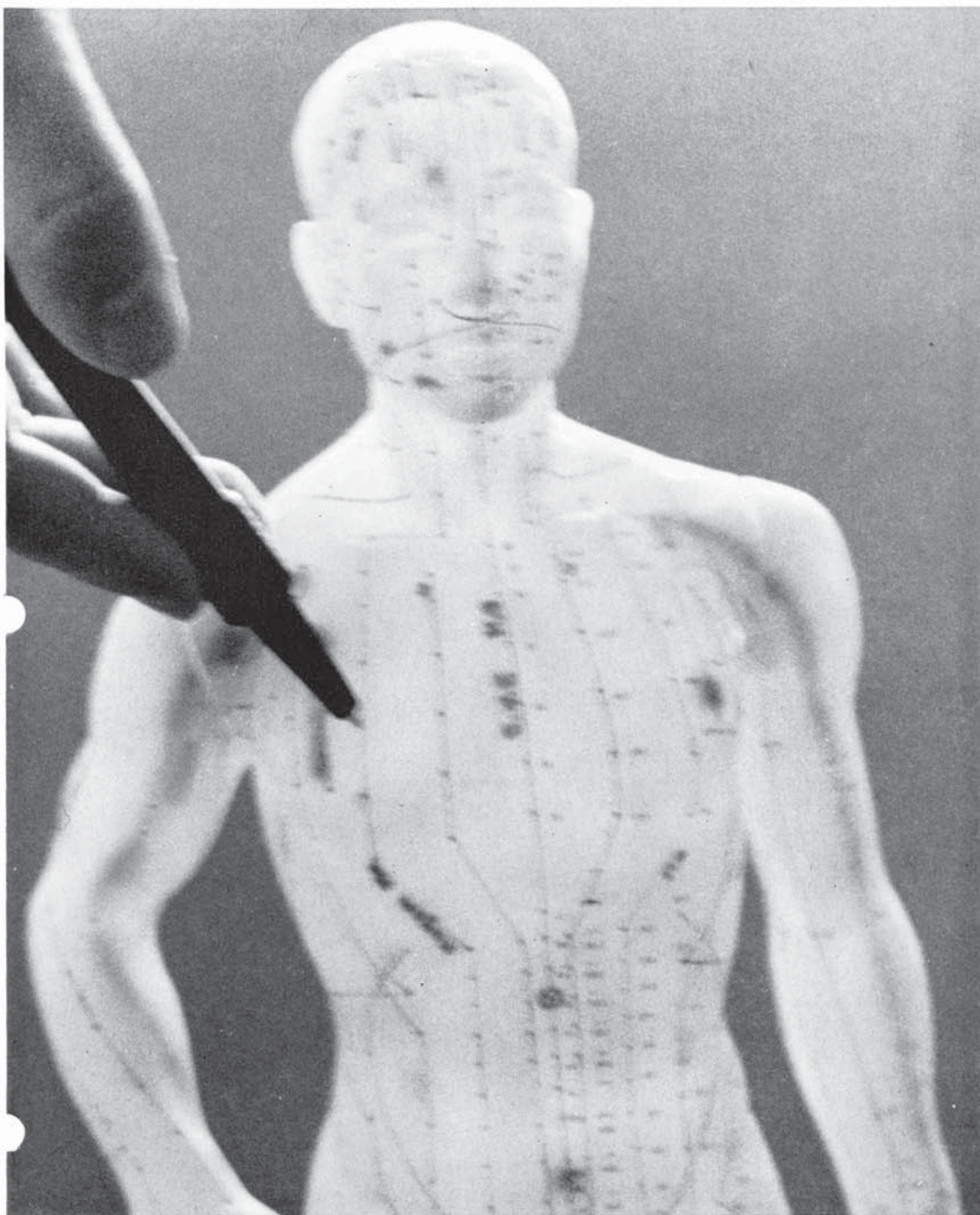
### Laser und Museum

Leider sind Laser bisher noch kaum in das Deutsche Museum eingezogen. In der Abteilung Wissenschaftliche Chemie baut zur Zeit der Verfasser einige der von ihm entworfenen Experimente in die Versuchsstände ein<sup>8</sup>.

Es handelt sich dabei vornehmlich um meßtechnische Laseranwendungen in der Chemie: Ein Experiment befaßt sich mit der Drehung der Polarisationssebene von

Der Laser





**Die Laser-Akupunktur und die noch weitergefaßte Laser-Reiztherapie haben sich in eingehenden Erprobungen bei Schmerz- und Heilbehandlungen als wirksam erwiesen. An die Stelle der Nadeln tritt ein Laserstrahl (von einer von Siemens entwickelten Laserröhre leitet ihn eine Glasfaser zum Endstück in der Hand des Therapeuten), der schmerzfrei und antiseptisch drei bis zehn Millimeter tief in die Haut eindringt**

Kohlenhydraten; ein weiteres zeigt, wie Laser träge Informationsspeicherung ermöglicht. Ferner soll eine Zinksulfidplatte mit UV-Licht »gepumpt« werden. Die Valenzelektronen

befinden sich darauf im höherenergetischen Leitungsband des Kristalls. Dort können sie unter Lichtaussendung in den Grundzustand zurückfallen (Fluoreszenz) oder in Haftstellen (Potentialtöpfen = Gitterdefektstellen) eingefangen werden. Durch niederenergetisches rotes Helium-Neon-Laserlicht kann man die Elektronen räumlich selektiv aus ihren Haftstellen befreien, was sich in einem kurzen Aufleuchten der bestrahlten Stellen äußert. Im Gegensatz zur nicht bestrahlten Umgebung zeichnen sich die bestrahlten Stellen bald als Dunkelinformation ab, weil hier alle Elektronen abgerufen wurden. In der Umgebung geht dieses Abrufen allein durch die thermische Umge-

bungsenergie langsam Schritt für Schritt vor sich. Dies hat die Kontrastbildung zwischen heller Peripherie und Dunkelinformation zur Folge. Bewahrt man eine derartige Platte zum Beispiel in flüssiger Luft auf, so kann das thermische Ausleuchten nicht mehr stattfinden und die Information beliebig lange abgespeichert werden (Modellexperiment im Deutschen Museum, Abteilung Wissenschaftliche Chemie, Bereich Atom und Molekül; Inv.-Nr. 71 174). Weitere Demonstrationsexperimente werden die »verschmierte Ladung« eines Modellelektrons darstellen. Nach der Heisenbergschen Unschärferelation kann man einem Elektron ja nur noch einen Raum der Aufenthaltswahr-

scheinlichkeit, ein sogenanntes Orbital, zuweisen, da die gleichzeitige Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung in der Mikrophysik unmöglich ist. »Schießt« man mit einem Laserstrahl gegen eine Mattglasscheibe, so erkennt man dahinter ein Pünktchen, das in der Demonstration ein lokalisiertes Elektron ist. Die Heisenbergsche Unschärfebeziehung verbietet es jedoch, Elektronen derartig exakt zu lokalisieren. Läßt man jetzt den Laserstrahl durch eine sich drehende geriffelte Glasscheibe – ähnlich dem Bühnenlaser – fallen, so erhält man sich ständig wandelnde bizarre Strukturen mit einigermaßen definierten räumlichen Grenzen – ein primitives Modell-Modell der verschmierten Ladung eines Orbitals. Geplant ist weiterhin, einen Laserstrahl durch ein Konzentrationsgefälle in einer Küvette mehrfach zu krümmen, wodurch das holographische Bild eines dreidimensionalen Kristallgitters entsteht, das der Besucher in der je nach Standort richtigen Perspektive sieht; außerdem soll versucht werden eine Luftüberwachungsstrecke aufzubauen, etwa quer über den Museumshof, die aktuelle Daten über den Verstaubungsgrad der Luft liefert.

In Zusammenarbeit des Instituts für medizinische Optik der Universität München und des Instituts für kohärente Optik in Neuherberg mit dem Verfasser werden diese Experimente voraussichtlich bis Mitte 1979 den Besuchern zugänglich sein. Zu hoffen bleibt, daß der Laser in seiner ganzen genannten Vielfalt in die Sammlungsabteilungen des Deutschen Museums Einzug hält. 

#### Hinweise

- 1 Physikalische Zeitschrift 18 (1917)
- 2 Nature 187 (1960)
- 3 G. Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie, Bd. 25 neue Folge (1885)
- 4 Hendrik Sander, Laser allgemeinverständlich. Aulis Verlag, Köln 1975
- 5 Robert Schwankner, Laseranwendung in der Experimentalchemie – ein Praktikum. Carl Hanser Verlag, München 1978
- 6 H.-R. Bachmann, R. Rinck, H. Nöth und K. L. Kompa, Infrared Laser-specific Reactions Involving Boron Compounds. Chemical Physics Letters 45 (1977)
- 7 K. L. Kompa, Chemical Lasers, Angewandte Chemie. Int. Edition, Vol. 9, 1970
- 8 Robert Schwankner, Ein Beitrag zur Festkörperphosphoreszenz von ZnS-thermisch- und laserbeeinflusstem H-L-Übergang. Praxis der Naturwissenschaften Physik 27 (1978)