



50 JAHRE LASER

# Eine faszinierende Lichtquelle

Von der Frühzeit des Lasers bis zum Universalwerkzeug

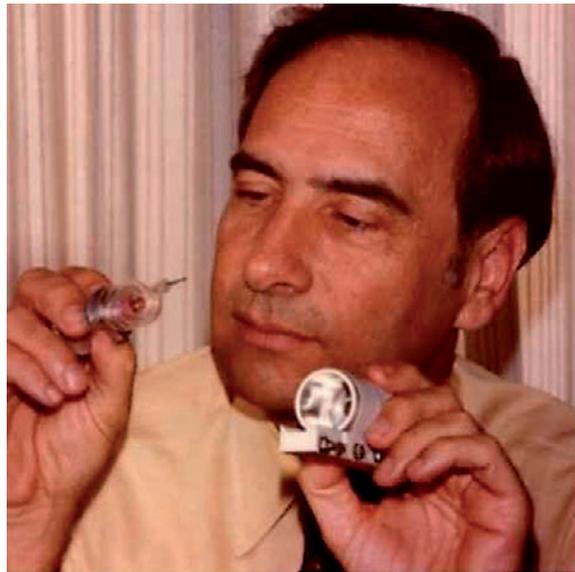
Herbert Welling

Der Laser fiel nicht vom Himmel. Albert Einstein hatte schon 1917 mit der Theorie zur stimulierten Emission den prinzipiellen Weg für die Verstärkung einer elektromagnetischen Welle gewiesen, und Rudolf Ladenburg und Hans Kopfermann war es 1933 gelungen, eine Besetzungsinversion zu beobachten – die Voraussetzung für eine Verstärkung durch stimulierte Emission. Doch sie alle hatten nicht an die reale Verstärkung einer optischen Welle gedacht. Ende der 1950er-Jahre lag der Laser dann in der Luft. Vor fünfzig Jahren machte mit Theodore Maiman ein Außenseiter das Rennen.

Wissenschaftler „grasen gern auf frischen Weiden“. Daher überrascht es nicht, dass sehr schnell viele Forscher in das neue Arbeitsgebiet der Laser einstiegen. Entsprechend groß ist heute die Zahl derer, die das Entstehen, Werden und Wachsen des Lasers miterlebt und geschildert haben – je nach Blickwinkel immer auch mit einer persönlichen Färbung. So erzählte der große Wissenschaftler Charles Townes in dem Buch „How the laser happened“ seine eigene Geschichte [1], während der italienische Physiker Mario Bertolotti die Entstehung des Lasers aus der Sicht eines Theoretikers beschreibt [2]. Ebenso berichteten die Wissenschaftler von Bell Telephone, die wohl am engsten am Entstehen des Lasers beteiligt waren, aus ihrer persönlichen Perspektive. Und so ist auch meine Darstellung natürlich nicht frei von einer subjektiven Färbung.

Entdeckungen bauen auf technischen und geistigen Vorstufen auf. Beim Laser ist zunächst der Maser zu nennen, für dessen Entwicklung Charles Townes, Aleksandr Prokhorov und Nicolay Basov 1964 den Nobelpreis erhielten. In dem Bestreben, elektrische Oszillatoren bei Frequenzen von einigen Gigahertz zu entwickeln, nutzten sie zur Verstärkung zum ersten Mal die stimulierte Emission bei Molekülen aus. Dies erfordert eine Besetzungsumkehr, d. h. es müssen sich mehr Moleküle bzw. Atome im angeregten Zustand als im Grundzustand befinden.

Forscher in mehreren Laboratorien versuchten dann, die Frequenz der Maser erheblich zu steigern. Wahrhaft kühn war die Idee, das Maserprinzip bis ins Infrarote oder gar Sichtbare zu übertragen. Der Gedanke war deswegen verwegen, weil für einen optischen Oszillator nach dem Maserprinzip damals



T. Maiman

Theodore Maiman (1927 – 2007) hält in seiner rechten Hand Blitzlampe und Rubinstab, in der linken Hand die Halterung seines ersten Lasers.

niemand einen geeigneten Resonator noch ein atomares oder molekulares Ensemble mit möglicher Besetzungsinversion kannte.

Die bei Masern eingesetzten Hohlraumresonatoren, die z. B. auch aus der Akustik bekannt waren, hatten Abmessungen in der Größenordnung der Wellenlänge. Für Wellenlängen im Sichtbaren wären derartige Strukturen aber unhandlich klein geworden und hätten zudem eine viel zu geringe Resonatorgüte aufgewiesen. 1958 diskutierten Art Schawlow und Charles Townes stattdessen offene Resonatoren vom Fabry-Perot-Typ und weckten damit viele neugierige Geister, die um Lösungen rangen. Bei hohen Güten zeigen diese Resonatoren deutlich weniger Eigenschwingungen als Hohlraumresonatoren. Fabry-Perot-Interferometer waren

## KOMPAKT

- Der Rubinlaser war der große Erfolg eines Einzelgängers, der in Konkurrenz mit Forschern vieler Prestigelaboratorien das Rennen machte.
- Bereits kurz nach Maimans Erfolg wurden mit dem Nd:YAG-, dem CO<sub>2</sub>- sowie dem Halbleiterlaser diejenigen Lasertypen entwickelt, die bis heute die größte Bedeutung für Forschung und Industrie haben.
- Die hohe zeitliche und räumliche Kohärenz von Laserlicht sowie die erzielbare hohe Leistung machen den Laser zu einer der wichtigsten Erfindungen des 20. Jahrhunderts.

Prof. em. Dr. Herbert Welling, Institut für Quantenoptik, Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover



Abb. 1 Diese Rubinstäbe und die Entladungslampe sind Originale, die Theodore Maiman dem Autor schenkte.

für die meisten Physiker damals frequenzselektierende Elemente, aber kaum einer betrachtete sie als optische Resonatoren. Neue Konzepte waren auch nötig, um eine Besetzungsinversion im aktiven Material zu erzeugen. Die kurze spontane Lebensdauer der Atome und Moleküle im angeregten Zustand verhinderte nämlich, dass sich wie beim Maser die Zustände mit magnetischen oder elektrischen Feldern selektieren ließen.

Und dann kam der Paukenschlag am 16. Mai 1960! Der Außenseiter Theodore Maiman von den Hughes Research Laboratories überrumpelte gewissermaßen als Mann des schlichten physikalischen Bürgertums den Hochadel der Prestigelaboratorien. Sein Laser basierte auf schwach mit Chrom dotiertem Saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), auch „pink ruby“ genannt. Die klugen Köpfe bei Bell Telephone waren zunächst skeptisch und teilweise ungläubig, zumal die Angaben in der Presseerklärung und die von Maiman selbst nicht ganz übereinstimmten. Das Erreichen einer Lasertätigkeit war zwar eine große Überraschung, aber es war mitnichten ein Zufall. Hier hatte ein Experimentalphysiker erstaunlich gut beobachtet und konsequent weiter gedacht und gehandelt. Bei dem schlichten Rubinstab und der einfachen Blitzlampe denkt man zunächst an „Jugend forscht“ (Abb. 1). Der Fabry-Perot-Resonator mit zwei auf dem Rubinstab aufgedampften Silberschichten war geradezu minimalistisch – und dennoch steckte hohe Handwerkskunst dahinter. Eine gute Aufdampftechnik, um eine Silberschicht mit dem richtigen Verhältnis von Transmission und Reflexion sowie der erforderlichen Qualität zu erzielen, war keinesfalls trivial.

Bereits im September 1959 hatte Maiman auf einer Konferenz offen seine Absicht geäußert, „pink ruby“ als Lasermaterial zu verwenden. Schawlow hatte starke Bedenken und mit dem ungünstigen Dreiniveauschema, der schlechten Quanteneffizienz (dies stellte sich später als falsch heraus) sowie der zu geringen Dichte der aktiven Ionen argumentiert. Maiman war hingegen optimistisch wegen der sehr starken Fluoreszenz, die er bei optischer Anregung beobachtete. Im Endergebnis war der Rubinlaser ein großer Erfolg eines Einzelgängers, der das Wettrennen gegen zahlreiche Top-Wissenschaftler gewonnen hatte. Zweimal wurde Maiman für den Nobelpreis vorgeschlagen – leider vergeblich!

„Ich gehöre nicht zur High-Society der Physiker“, sagte er etwas enttäuscht. Viele meinen auch heute noch, er hätte den Preis verdient gehabt.

## Wo ist das Problem?

Der Laser galt zunächst als „eine Lösung, die nach einem Problem suchte“. Doch der in dieser spaßigen Charakterisierung enthaltene kritische Ton ist nicht angemessen: Oft setzen bei Neuentdeckungen erst hinterher Fantasie und Kreativität ein, welche die Bedeutung der Entdeckung ganz erfassen und zur Lösung anderer Probleme nutzen. Künstliches Licht hatte nach dem Lagerfeuer und der Glühlampe nun die dritte Stufe erreicht. Das Licht im Laser entsteht nicht aufgrund der hohen Temperatur und offenbart neuartige Eigenschaften: Es ist räumlich und zeitlich sehr kohärent, und es hat das Potenzial für hohe Leistungen bzw. Leistungsdichten. Diese beiden Eigenschaften sollten den Laser zu einer der wichtigsten Erfindungen des 20. Jahrhunderts machen.

Doch zunächst bestand über viele Jahre ein Schwerpunkt der Laserforschung darin, neue Systeme mit verschiedenen Anregungen und Wellenlängen zu entwickeln. Aus heutiger Sicht gehören dabei zu den Highlights der He-Ne-Laser von Ali Javan Ende 1960, der  $\text{Nd}^{3+}$ -Glaslaser von Elias Snitzer im Jahre 1961 und der  $\text{CO}_2$ -Laser von Kumar Patel 1963 (Abb. 2).

Bei den Festkörperlasern hatte der Rubinlaser den Weg gewiesen, auf die seltenen Erden innerhalb der Übergangselemente zu setzen. Bei diesen lässt sich ein Laserübergang wählen, bei dem der obere Zustand metastabil ist und sich durch optische Anregung eine Besetzungsinversion erreichen lässt. Königstein bei Bell Telephone berechnete viele Niveauschemata für unterschiedlich dotierte Kristalle und schlug vor, das System  $\text{Nd}^{3+}\text{YAG}$  (Yttrium-Aluminium-Granat) zu wählen. Sein Kollege Joseph E. Geusic, der heute als Erfinder des  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -Lasers gilt, verwarf dieses Material aber

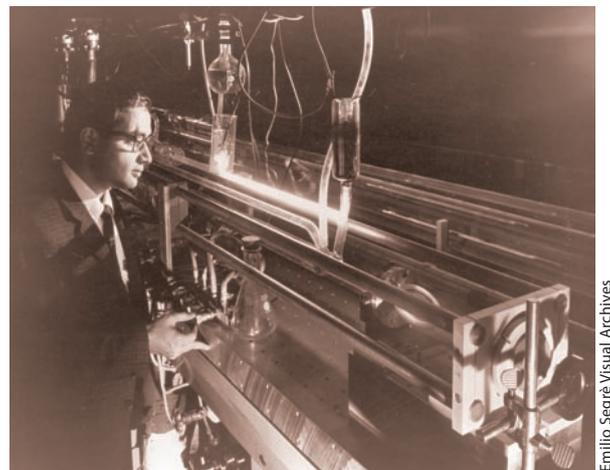


Abb. 2 Kumar Patel entwickelte 1963 bei den Bell Labs den  $\text{CO}_2$ -Laser. Dieses Foto von 1967 zeigt die glimmende Entladung, durch die Stickstoffgas Energie zugeführt wird. Durch Stöße im Resonator übertragen die  $\text{N}_2$ -Moleküle Energie an das eigentliche Lasermedium  $\text{CO}_2$ .

Emilio Segrè Visual Archives

zunächst, als erste Messungen der Quanteneffizienz (das Verhältnis von Fluoreszenz- zu Pump-Photonen) nur 0,2 ergaben. Tatsächlich erkannte man erst nach einiger Zeit, dass der Quantenwirkungsgrad gar nicht entscheidend ist, da der obere metastabile Zustand in vielfältiger Weise strahlungslos relaxieren kann. Dies reduziert zwar die Quanteneffizienz, hat aber für den Laserprozess keine Bedeutung. Heute gehört der Nd:YAG-Laser mit seinen Verwandten zu den bedeutendsten Lasertypen. Der große Vorteil der Kristalle gegenüber Glas als Wirtsmaterial ist die wesentlich größere Wärmeleitfähigkeit, die einen kontinuierlichen Betrieb des Festkörperlasers erst ermöglicht.

Kurz nach der Erfindung des Rubinlasers wurde Laseroszillation in Halbleitersystemen vorhergesagt und 1962 in drei Laboratorien (Lincoln Lab., IBM, General Electric) realisiert. Obwohl dieser Laser sehr einfach ist – im Prinzip fließt nur ein Strom durch einen pn-Übergang –, dauerte es beinahe drei Jahrzehnte, bis man Strukturierungs- und Materialprobleme sicher beherrschte. Der Halbleiterlaser ist mit seiner Anwendungsvielfalt und gemessen am Marktvolumen heute der wichtigste Laser.

### Ein persönlicher Rückblick

1961, kurz nach meiner Promotion, ging ich an ein Forschungslabor der US Navy nach Fort Monmouth südlich von New York, um an Masern zu arbeiten. Aufgrund ihrer sehr guten Kurzzeitstabilität eigneten sich diese als Atomuhr und waren daher für die Steuerung von Raketen wichtig. Zunächst baute ich gemeinsam mit meinem Schwager Harro Andresen nach dem Vorbild von Norman Ramsey und Daniel Kleppner zwei Wasserstoffmaser als Frequenzstandard auf. Dann entwickelte ich Resonatoren für einen HCN-Maser bei 87 MHz. Im Jahre 1963 übernahm ich die Leitung einer Laser-Abteilung. Da Forschung auf dem Gebiet der Hochleistungslaser (tausend Joule und mehr) finanziell zu aufwändig war, wandte ich mich den besonderen Eigenschaften des Lasers zu: seiner hohen räumlichen und zeitlichen Kohärenz.

Zunächst galt es, mit einer grundlegenden Beschränkung aller Festkörperlaser zurechtzukommen: Sie zeigen eine unerwünschte Strahldivergenz durch optische Störungen im Lasermaterial, die beim Pumpen entsteht. Dabei erwärmt sich der Laserkristall durch strahlungslose Übergänge in den aktiven Ionen; durch die Temperaturerhöhung ändert sich der Brechungsindex. Da der Pumpprozess nie vollkommen homogen über den Stabquerschnitt stattfindet, variiert die optische Weglänge, sodass sich die Wellenfronten verbiegen: Der Laser verliert seine Richtungsqualität.

Wir führten hierzu systematische Untersuchungen durch, bevor wir uns der zeitlichen Kohärenz zuwandten (Abb. 3). Dazu beobachteten wir zunächst die zeitliche Emission eines Lasers mit einem fünf Zentimeter langen Rubinstab von sechs Millimeter Durchmesser und fanden, dass während des Pumpprozesses



Abb. 3 Herbert Welling nimmt 1964 in Fort Monmouth das Emissionsspektrum eines Rubinlasers auf.

mehr als hundert verschiedene Moden, verteilt über den Querschnitt des Laserstabes, teils nacheinander, teils aber auch gleichzeitig anschwingen. Insofern war es kein Wunder, dass 1963 die mit einem Michelson-Interferometer gemessene Kohärenzlänge eines Rubinlasers mit nur wenigen Metern angegeben wurde.

Wir versuchten eine Radikalkur und verkürzten den Laserstab auf einen Zentimeter, um die Anzahl der axialen Moden innerhalb des Verstärkungsprofils zu reduzieren. Gleichzeitig brachten wir auf den Endflächen des Laserstabes dielektrische Spiegel auf, die einen Durchmesser von nur 0,8 mm hatten, um die nichtaxialen Moden zu unterdrücken. Auf diese Weise gelang es, einen Rubinlaser beim Pumpen knapp über der Laserschwelle in nur einer Mode zu betreiben und sogar sehr gut das Einschwingen zu beobachten. Leider führten intensive Bemühungen, den Rubinlaser auch kontinuierlich zu betreiben, nicht zum Erfolg – es blieb beim Pulsbetrieb.

Die Schmalbandigkeit des Lasers legte nahe, ihn für eine hochauflösende Spektroskopie einzusetzen. 1966 haben Peter Toschek in Heidelberg und sein damaliger Diplomand und spätere Nobelpreisträger Theodor (Ted) Hänsch<sup>1)</sup> einen He-Ne-Laser mithilfe des Zeeman-Effekts durchgestimmt, um damit die Spektrallinie des Neon-Laserübergangs während der Laseroszillation zu studieren. Sie waren wohl mit die Ersten, die Laserspektroskopie betrieben, wenn auch zunächst nur über den sehr kleinen Spektralbereich von 500 MHz.

Der wirkliche Durchbruch für eine hochauflösende Spektroskopie – der in den Anfangsjahren des Lasers bedeutendsten Anwendung – kam mit dem Farbstofflaser, den Fritz Peter Schäfer in Marburg und Peter Sorokin bei den IBM-Forschungslaboratorien in den

1) vgl. das Interview mit Theodor Hänsch in diesem Heft.

2) Die Stokes-Verschiebung ist die Frequenzdifferenz zwischen dem Maximum der Absorption und der Emission, beim Laser ist es die Differenz aus Pump- und Emissionsfrequenz.

USA im Sommer 1966 zeitgleich, aber vollkommen unabhängig erfanden.

Schäfer hatte sich überlegt, dass sich Farbstoffe in einer flüssigen Lösung mit ihren elektronischen und ihren Vibrations- und Rotationszuständen gut als Lasermaterial eignen könnten, denn sie boten praktische Vierniveau-Schemata mit breiten Absorptionsbanden. Der Einfachheit halber benutzte er einen Rubinlaser als Pumpquelle; als Behälter für die Farbstofflösung wählte er eine einfache Küvette. Wegen der Stokes-Verschiebung<sup>2)</sup> des eingesetzten Farbstoffes erwartete er Fluoreszenz und eventuelle Laseroszillation im infraroten Spektralbereich. Um das beobachten zu können, musste er zunächst einen Infrarotdetektor aus einem Nachtsichtgerät bauen. Schäfer war vollkommen überrascht, dass er nicht nur die Fluoreszenzstrahlung, sondern bei stärkerem Pumpen gleich auch Laseroszillation beobachtete. Offensichtlich reichte die Fresnel-Reflexion von vier Prozent seiner Küvettenfenster aus, um einen optischen Resonator zu bilden und damit die Laseroszillation zu ermöglichen.

Da Laserübergänge vom oberen elektronischen Zustand in viele Rotations- und Vibrationszustände des Grundzustands möglich waren, ergab sich hier die Basis für einen über einen größeren Spektralbereich durchstimmbaren Laser. Neben der hohen Intensität und der hohen Kohärenz war die Durchstimbarkeit die dritte wesentliche Eigenschaft des Lasers. Schäfer stimmte seinen Laser zunächst noch über Konzentrationsänderungen der Farbstofflösung ab; später dienten dazu frequenzselektierende Elemente innerhalb des Resonators.

Der durchstimmbare Farbstofflaser leitete eine kaum vorstellbare Renaissance der Atom- und Molekülspektroskopie mit einer um viele Größenordnungen verbesserten spektralen Auflösung ein. Nachdem ich 1966 nach Deutschland zurückgekehrt und einen Ruf auf eine Professur in Hannover angenommen hatte, nutzte ich mit meiner neuen Arbeitsgruppe ebenfalls die Möglichkeiten des Farbstofflasers. Zunächst reduzierte Bernd Wellegehausen die Linienbreite des Farbstofflasers auf 2 MHz mithilfe eines Freistrahlsystems für die Farbstofflösung. Wulfhard Lange und Joachim

Luther haben 1969 als erste mit diesem Farbstofflaser die Hyperfeinstrukturlinie der Natrium-D<sub>2</sub>-Linie mit einer spektralen Auflösung von 10<sup>-9</sup> vermessen.

Der Farbstofflaser hat noch eine weitere wesentliche Eigenschaft, deren Bedeutung man nicht sofort erkannte. Aufgrund des breiten Verstärkungsprofils können viele Eigenschwingungen (Moden) gleichzeitig anschwingen. Wenn man sie richtig überlagert (Modenkopplung), entstehen extrem kurze Lichtpulse. Mit diesem Rezept lassen sich heute Lichtpulse erzeugen, die nur etwa zwei Schwingungen des Feldes andauern. Dies eröffnet ungeahnte Möglichkeiten, um sehr schnelle Vorgänge zu untersuchen, und hat alle Bereiche der Wissenschaft und Technik befruchtet.

Doch zunächst stellte sich die Frage nach der wirklichen spektralen Breite einer Einmoden-Emission. Townes und Schawlow hatten den Laser als klassischen Oszillator betrachtet und daraus die natürliche Linienbreite hergeleitet. Inzwischen entwickelten in den Jahren 1965 bis 1970 Theoretikergruppen um Hermann Haken und Hans Risken in Stuttgart, William H. Louisell und Melvin Lax in den USA, später auch Siegfried Großmann und Peter Richter in Marburg, eine vollquantisierte Theorie des Lasers [3]. Großmann und Richter betrachteten den Zustandswechsel des Lasers an der Laserschwelle als Phasenübergang 2. Ordnung. Im Endeffekt fügten alle Autoren in die Schawlow-Townes-Formel für die Linienbreite einen Faktor ein, der an der Schwelle von 2 auf 1 wechselt.

In mehreren renommierten Instituten bemühte man sich über längere Zeit vergeblich, die natürliche Linienbreite des Lasers zu messen. Die Schwierigkeit bestand darin, dass sie so außerordentlich klein ist und dass sich in Messungen das störende „technische Rauschen“ überlagert. Am bekanntesten wurden die Experimente von Tony Siegmann und Ali Javan, die versuchten, die Linienbreite über die Schwebungsfrequenz zweier Helium-Neon-Laser zu messen. Im interessanten Gebiet nahe der Schwelle verschwand die zu messende Mischfrequenz jedoch weit unter dem Rauschen.

In Hannover verfolgten wir einen anderen Ansatz: Wir wollten die natürliche Linienbreite an der Schwelle über Sichtbarkeitskurven in einem Michelson-Interferometer bestimmen. Das erforderte aber ein Interferometer mit einer Wegdifferenz von mehr als 1000 m. Da das Experiment aus Stabilitätsgründen im Vakuum aufgebaut werden musste und eine so große Vakuumkammer offensichtlich unmöglich war, mussten wir den Strahlengang falten. Dazu entwickelten wir optische Verzögerungsleitungen mit mehr als 1000 Reflexionen. Dielektrische Spiegel mit erträglichen Verlusten waren damals nicht zu kaufen, sodass wir zunächst anderthalb Jahre lang Aufdampftechniken optimierten, bis wir die Verluste pro Reflexion auf 0,02 % reduziert hatten. Im Keller des Hannoverschen Welfenschlosses – hinter einem dreiviertel Meter dicken Außenmauern und in den ruhigsten Nachtstunden – gelang es uns schließlich, das technische Rauschen zu eliminieren und die Linienbreite zu bestimmen. Unsere Messungen bestätigten die Haken-Risken-Theorie.



Abb. 4 Mithilfe eines Lasers lassen sich Natriumatome in der oberen Atmosphäre anregen, deren Licht einen hellen Stern

imitiert. Dessen Bild im Teleskop – hier das VLT – erlaubt es, die Verzerrungen aufgrund der Atmosphäre zu korrigieren.

## Vom Skalpell zum Gravitationswellendetektor

Neben seiner Bedeutung für die Grundlagenforschung zeigte sich rasch das Anwendungspotenzial des Lasers, insbesondere in der Medizin [4]. Schon 1966 wandten Christian Zweng und gleichzeitig Francis L'Esperance den Laser mit unverkennbarem Vorteil bei Netzhautablösungen an. Mittlerweile ist er aus der Ophthalmologie nicht mehr wegzudenken. Kurz danach gelang es Wolfgang Eisert an der Medizinischen Hochschule Hannover mithilfe eines Rubinlasers, auf durchsichtigen Kapillaradern einer lebenden Ratte Mikroläsionen zu setzen und im Detail die Thrombusbildung zu untersuchen. Ein solcher Blutpfropf ist meist die tiefere Ursache für einen Herzinfarkt oder Schlaganfall, die häufigsten Todesursachen.

Ein weiteres Beispiel zeigt, dass der Weg von der Grundlagenforschung zu Anwendungen nicht unbedingt eine Einbahnstraße ist: Da sich eine Leber mit einem Skalpell leicht schneiden lässt, die auftretenden Blutungen aber kaum zu stillen sind, wünschten sich die Mediziner ein Laserskalpell für blutrockene Schnitte. Wir entwickelten daher einen Sechskopf-Nd:YAG-Laser mit einer Ausgangsleistung von 600 Watt. Damit ließ sich die Leber gut schneiden, wobei die auftretende Wärme das Gewebe im Schnittbereich koagulierte und somit die Blutgefäße verschloss. Dieser Laser fand aber auch eine weitere, unerwartete Anwendung. In den frühen Achtzigerjahren bauten Physiker vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching unter der Leitung von Gerd Leuchs einen Gravitationswellendetektor auf. Sein System war ein Michelson-Interferometer mit einem Argon-Ionen-Laser als Lichtquelle. Abschätzungen ergaben, dass mindestens 100 Watt Laserleistung notwendig wären, um eine gute Chance für die Messung von Gravitationswellen zu haben. Da ein Argon-Ionen-Laser einen Wirkungsgrad von nur  $10^{-4}$  hat, hätte die elektrische Anschlussleistung ein Megawatt betragen müssen, was völlig abwegig war. Das war die Stunde für den 600-W-Medizinlaser mit seiner viel besseren Effizienz. Seit über zwanzig Jahren wird dieser im Laser-Zentrum Hannover verbessert, und er dient als Lichtquelle in allen Gravitationswellendetektoren der Welt.

Schon diese Beispiele zeigen, dass das anfangs „gefühlte Potenzial“ des Lasers und die dadurch verursachte Euphorie aus heutiger Sicht seine Berechtigung hat. In der Wissenschaft hat das Laserlicht dazu beigetragen, die Quantennatur des Lichts und seine Wechselwirkung mit Materie besser zu verstehen, und es hat die Atom- und Molekülspektroskopie zu einer ungeahnten Renaissance geführt. Laser spielen auch eine entscheidende Rolle bei der Weiterentwicklung von Atomuhren, die für die höchstauflösende Spektroskopie essenziell sind. Das ermöglicht nicht nur Navigationsgeräte für jedermann, sondern erlaubt uns auch, grundlegenden Fragen zur Gültigkeit der Quantenmechanik nachzugehen.

Mit dem Laser gelingt es uns, neuartige Zustände der Materie zu entdecken und zu erforschen. Atome

lassen sich damit bis hin zur Bose-Einstein-Kondensation abkühlen oder zu extrem heißen Plasmen aufheizen, wie es sie sonst nur im Inneren von Sternen gibt. Die hohe Intensität des Lasers führte zu einem eigenständigen Teilgebiet der Optik, der Nichtlinearen Optik. Hier treten elektrische Feldstärken auf, die zu denen vergleichbar sind, die Elektronen auf ihrer Bahn im Atom halten. Dadurch lässt Licht sich heute ebenso virtuos in seiner Frequenz vervielfachen, umsetzen, usw., wie Nachrichtentechniker es mit elektrischen Signalen vormachen.

Die Anwendungen in der Technik sind unüberschaubar, sodass ich mich auf zwei Errungenschaften beschränken muss. Durch den Laser hat die Fertigungstechnik außergewöhnliche Impulse bekommen. Metalle wie Aluminium, Magnesium und Titan lassen sich mit dem Laser sehr fein und genau schweißen. Oberflächen können mit Nanostrukturen versehen werden. 17 Prozent der Fertigung in unserer Industrie basiert heute direkt oder indirekt auf dem Laser.<sup>3)</sup>

Und es ist keineswegs übertrieben zu sagen, dass Laserlicht unsere Welt wie unsere Weltsicht prägt. In der Nachrichtentechnik, die in unserer zusammenwachsenden Welt eine so große Rolle spielt, geht es nicht mehr ohne Laser. Sein Licht überträgt die gewaltigen Datenmengen des World Wide Web. Und auch bei den großen Fragen der Kosmologie bringt der Laser im wahrsten Sinne des Wortes Licht ins Dunkel: Dank künstlicher „Lasersterne“ können erdgebundene Teleskope nun weiter und genauer in den Kosmos schauen als je zuvor (Abb. 4). Und als Herzstück aktueller und künftiger Gravitationswellendetektoren lässt er völlig neue Informationen über die Geschichte des Universums erhoffen.

### Literatur

- [1] C. Townes, *How the Laser Happened*, Oxford University Press, Oxford und New York (2002)
- [2] M. Bertolotti, *The History of the Laser*, Institute of Physics Publishing, Bristol (2005)
- [3] H. Haken, *Laser Theory*, Springer 1984
- [4] H. Weber, *Laser: Eine revolutionäre Erfindung und ihre Anwendungen*, C. H. Beck, München (1998); D. Bäuerle, *Laser: Grundlagen und Anwendungen in Photonik, Technik, Medizin und Kunst*, Wiley-VCH, Weinheim (2008)

### DER AUTOR

**Herbert Welling** (FV Quantenoptik/ Photonik) promovierte 1960 in Hannover und arbeitete anschließend sechs Jahre lang an einem Forschungslabor für Kommunikation und Elektronik der US Navy in Fort Monmouth, USA. Zurück in Hannover habilitierte er sich 1967 und übernahm dort 1974 eine Professur, die er bis zu seiner Emeritierung 1998 innehatte. Der Mitgründer des Laserzentrums Hannover gilt als einer der deutschen Pioniere der Laserphysik und Quantenoptik und erhielt 1999 den Robert-Wichard-Pohl-Preis der DPG.



3) vgl. hierzu die Artikel von H. Weber sowie A. Giesen et al. in diesem Heft.