



50 JAHRE LASER

Werkzeuge aus Licht

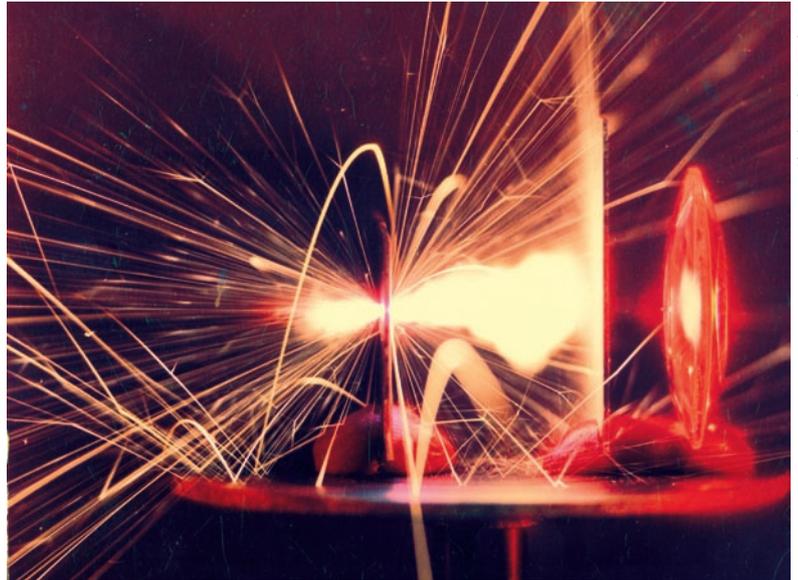
Der Beginn der Laser-Materialbearbeitung in Deutschland

Horst Weber

Die Entwicklung der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung erscheint im Rückblick wie eine Erfolgsgeschichte, in der eine Idee aus der Grundlagenforschung in eine technische Innovation mit Markterfolg überführt wurde. Es ist aber auch ein Lehrstück, das zeigt, welche Schwierigkeiten zu überwinden waren.

Die bahnbrechende Veröffentlichung von Theodore Maiman löste 1960 unter den Physikern eine große Begeisterung aus. Das aus der Maser- und Hochfrequenztechnik längst bekannte Prinzip des selbsterregten Oszillators war nun auch im optischen Bereich umgesetzt. Bei Siemens liefen die ersten Rubinlaser bereits Ende 1960. Und am I. Physikalischen Institut der TU Berlin rief der damalige Leiter Hans Boersch [1] umgehend eine Arbeitsgruppe Laser um Gerd Herziger und mich ins Leben. Ende 1961 gingen bereits ein Rubin- und ein Helium-Neon-Laser in Betrieb [2]. Parallel dazu gab es intensive Aktivitäten in der DDR.¹⁾

Bei diesen ersten Festkörperlasern stammten die Komponenten fast ausschließlich aus Deutschland (Abb. 1). Gegenüber dem mit einer Xenon-Wendellampe gepumpten Maiman-Laser kam hier eine Xenon-Stablampe (Osram, Berlin) zum Einsatz, die den Wirkungsgrad beträchtlich erhöhte. Das abbildende elliptische Gehäuse bestand aus Kaltlichtglas (Schott, Mainz), die dielektrischen Spiegel wurden entweder direkt auf die Endflächen des Rubins aufgebracht oder bestanden aus sehr gut polierten, dielektrisch beschichteten Planspiegeln (Fa. Halle, Berlin). Problematisch war es, geeignete Rubin-Einkristalle zu beschaffen. Zu dieser Zeit war in Europa nur ein Unternehmen, Djehahirdjian im schweizerischen Monthey, in der Lage, Chrom-dotierte Aluminiumoxid-Einkristalle zu ziehen. Diese Rubine wurden für die Lagersteine in mechanischen Uhren benötigt. Ihre optische Qualität war deshalb unwichtig, sodass sie als Laserkristalle nur bedingt geeignet waren. Trotzdem ließen sich damit bereits Laser für die Mikromaterialbearbeitung bauen (Abb. 2). Unser Institut benötigte in größeren Mengen Platinblenden mit Lochdurchmessern von einigen Mikrometern für elektronenoptische Strahlengänge. Diese Blenden mechanisch herzustellen war sehr aufwändig – mit dem Rubinlaser konnten wir jedoch problemlos Blenden mit Durchmessern bis herunter zu 0,8 μm herstellen [5]. Ebenso gelang es, im Mikro-



In der Frühzeit der Materialbearbeitung fokussierte eine einfache Sammellinse den von rechts einfallenden Laserstrahl

auf das Ziel, hier eine Stahlplatte. Ein Diaglas schützt dabei die Linse vor dem intensiven Funkenflug.

bereich zu schweißen. Die damals unzureichende und schwankende Strahlqualität reichte allerdings für reproduzierbare Bohrungen noch nicht aus. In dieser Zeit wurde die Qualität eines der Rubinlaser nach der Zahl der Rasierklingen beurteilt, die er durchbohren konnte. Auf den Tagungen konnte man stets Wissenschaftler erleben, die stolz ihre Rasierklingen-Bilder verglichen.

Ein erster Versuch, den Festkörperlaser industriell einzusetzen, war das Bohren von Uhren-Lagersteinen, zunächst bei Zeiss [6]. Gerd Herziger führte dieses

KOMPAKT

- Die frühen deutschen Laser bestanden aus einem in der Schweiz gefertigten Rubin, den eine Xenon-Stablampe pumpte.
- Zunächst dominierten die Festkörperlaser (Rubin-, Neodym-Glas- und Neodym-YAG-), bis 1975 die CO₂-Laser für die industrielle Nutzung reif waren.
- Seit Ende der 1990er-Jahre ersetzen strombetriebene Diodenlaser die Gasentladungslampen.
- Kurzpuls laser (kürzer als 10⁻¹² s) weisen derzeit noch eine vergleichsweise geringe mittlere Leistung auf, die keine hohen Prozessgeschwindigkeiten zulässt. Für das Präzisionsbohren feiner Löcher setzt die Industrie sie jedoch heute bereits ein.

1) Vgl. die Beiträge von D. Röß und K. Lenz in diesem Heft. Ergänzende wissenschaftshistorische Abhandlungen finden sich z. B. in [3, 4].

Prof. em. Horst Weber, Institut für Optik und Atomare Physik, Technische Universität Berlin, Hardenbergstraße 36, 10623 Berlin

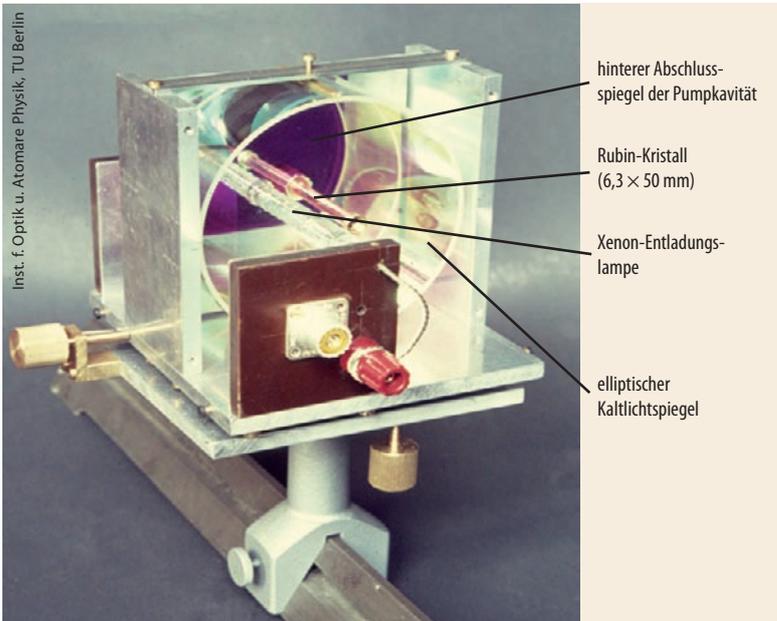


Abb. 1 Die ersten Festkörperlaser, hier ein gepulster Rubinlaser aus dem Jahr 1961, waren sehr einfache Konstruktionen.

Verfahren später für die Schweizer Uhrenindustrie zur industriellen Reife [7]. Mit wenigen Lasermaschinen bei der Watch-Stone in Thun ließ sich der Weltbedarf fast decken. Noch heute werden Lagersteine aus Rubin nach diesem Verfahren gebohrt (Lasag, Thun). Weitere industrielle Anwendungen der Festkörperlaser waren bereits Mitte der Sechzigerjahre das Schweißen von Spiralfedern und von Sieben für die Papierherstellung.

Die Industrie nutzte Licht schon geraume Zeit zum Löten. Wegen ihrer geringen Strahldichte waren thermische Lichtquellen aber sonst nur mit Einschränkungen einsetzbar. Das änderte sich mit dem Laser schlagartig. Zahlreiche Veröffentlichungen diskutierten die sich bietenden Möglichkeiten [8]. Dabei dominierten in den ersten zehn Jahren die Festkörperlaser, zunächst der gepulste Rubin- und der Neodym-Glas-Laser (1961). Beide Systeme lieferten hohe Pulsenergien, wenn auch bei geringer mittlerer Leistung, und eigneten sich beispielsweise gut zum Punktschweißen. Ihr großer Vorteil: Sie erlaubten dank ihrer Wellenlängen von 0,69 bzw. 1 μm im nahen Infrarot die Strahlverarbeitung mit normalen Glasoptiken und – ebenfalls sehr wichtig für den industriellen Einsatz – die Strahlführung durch flexible Glasfasern. Wegen des geringen Wirkungsgrads setzte die Industrie Rubinlaser nicht lange ein, sondern nutzte alternativ zum Nd-Glas-Laser den Nd-YAG-Laser (Yttrium-Aluminium-Granat, 1964), der sich kontinuierlich mit relativ hohen mittleren Leistungen betreiben ließ und damit zum Präzisionsschneiden und Nahtschweißen eignete.

Der CO_2 -Gaslaser (1965 bei Siemens), dessen Wellenlänge von 10 μm im Infraroten liegt, lieferte zunächst nur relativ geringe Ausgangsleistungen und bot sich besonders zum Schneiden von Holz oder Plexiglas und zum Bohren an. Die Strahlung kann jedoch nicht mit normalen Quarzglas-Optiken verarbeitet werden, sondern erfordert Spiegel. Das machte die Strahlführung vom Laser zum Werkstück kompliziert und störanfällig.

Erst als diese Probleme gelöst waren und verbesserte Gasentladungen zu höheren Leistungen führten (ab etwa 1975; Rofin-Sinar, Hamburg; Trumpf, Ditzingen), begann die industrielle Nutzung des CO_2 -Lasers.

Der Durchbruch zum industriellen Einsatz

Siemens brachte Ende der Sechzigerjahre einen ersten Laser für die Materialbearbeitung auf den Markt, den Universalbearbeitungslaser UBL mit dem charakteristischen Röß-Ei als Pumpkavität [9]. Dennoch blieben Laser in der Materialbearbeitung lange exotisch. Nahezu zwei Jahrzehnte vergingen, bevor Industriebetriebe ihn in merklichem Umfang in der Fertigungstechnik einsetzten. Die prinzipiellen Probleme wie Wirkungsgrad, Standzeit, Wartungsaufwand, Kosten und Reproduzierbarkeit waren nicht gelöst, und die Handhabung erforderte speziell geschultes Personal. Der Schritt vom Laborprototyp zum industriell einsetzbaren System war zeit- und kostenintensiv und wurde zunächst unterschätzt. Auch waren die physikalischen Details der Wechselwirkung noch weitgehend unbekannt. Oft ist das Prozessfenster für eine zuverlässige Bearbeitung sehr schmal, also das Zusammenspiel aus Einwirkungszeit und Intensität. Die erheblichen Schwankungen der Strahlparameter damaliger Laser führten deshalb zu nicht reproduzierbaren Bearbeitungsergebnissen. Hinzu kam eine manchmal konservative Einstellung der Ingenieure. Warum einen funktionierenden Fertigungsprozess auf ein nicht erprobtes Verfahren umstellen, wenn nicht gravierende Vorteile in Sicht sind? Die großen Unternehmen in Deutschland gaben zunächst die Laserentwicklung auf, da kein Return of Investment abzusehen war, kleinere Firmen

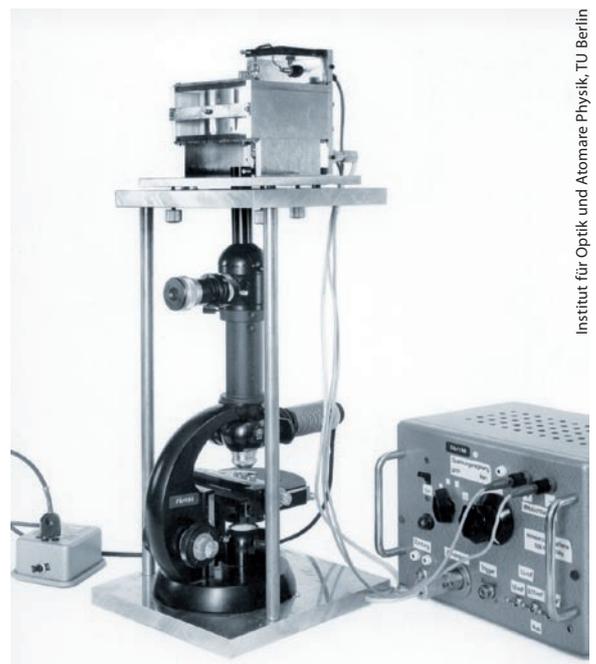


Abb. 2 Mit einem einfachen Aufbau wurde der Rubinlaser, der in Abbildung 1 zu sehen ist, zur mikroskopischen Materialbearbeitung eingesetzt.

hatten für eine langfristige und riskante Entwicklung nicht die finanziellen Mittel. Heute ist der Laser aus der Fertigungstechnik nicht mehr wegzudenken. Viele neue Bearbeitungsverfahren waren und sind nur mit dem Laser möglich!

In den Sechzigerjahren war der Laser zunächst die Domäne der Physiker, die sich intensiv mit den Grundlagen der Strahlerzeugung auseinandersetzten und nach neuen Systemen suchten. Wirkungsgrad und Zuverlässigkeit waren dabei sekundäre Parameter. Das änderte sich, als die Laserentwicklung nicht mehr in den Laboren der Physik Institute stattfand, sondern von den Ingenieuren in der Industrie übernommen wurde. Hier galt es, in mühsamer Kleinarbeit technische Probleme wie effiziente Kühlung, stabile optische Resonatoren oder Festigkeit der Spiegel im Dauerbetrieb zu lösen. Anfang der Siebzigerjahre kamen dann zuverlässige Festkörperlaser auf den Markt für Anwendungen wie Punktschweißen, Bohren kleiner Löcher, Trennen durch aneinander gesetzte Bohrungen (Trepanieren). Zunächst entwickelte die Haas Laser GmbH in Schramberg solche Systeme für den Eigenbedarf und setzte sie zum Schweißen ihrer Spiralfedern ein [10]. Das erwies sich als voller Erfolg und führte wenige Jahre später erstmals zur Produktion größerer Stückzahlen von Lasersystemen für das Punktschweißen an Teilen von Fernseherbildröhren. Die Lichtleitfaser zur flexiblen Kopplung des Lasers an das Werkstück war 1984/85 dann der Höhepunkt dieser Entwicklung.

Sowohl beim Nd-Glas- als auch beim Nd-YAG-Laser waren die thermischen Probleme jedoch nicht wirklich gelöst. Bei beiden Systemen wird ein wesentlicher Teil der Anregungsenergie im aktiven Medium in Wärme umgesetzt. Die notwendige Kühlung führt zu einem Temperaturgradienten und damit zu schlechter Strahlqualität. Deswegen war die Ausgangsleistung pro Modul auf ca. 1 kW begrenzt. Für das Schweißen im Automobilbau konnte der Festkörperlaser deshalb nicht mit dem leistungsstarken CO₂-Laser (20 kW) konkurrieren. Zahlreiche Konzepte wie Multistabler (6 kW), Slab-Laser (1 kW) oder Rohrlaser wurden ebenso erprobt wie strahlverbessernde Komponenten, z. B. phasenkonjugierende Spiegel oder adaptive Optiken. Aber alle diese Systeme sind für einen Industrielaser zu aufwändig, zu kompliziert und zu störanfällig.

Zwei wesentliche technische Verbesserungen brachten den Durchbruch: Ende der Neunzigerjahre ersetzen die direkt mit Strom betriebenen Diodenlaser die Gasentladungslampen. Dadurch erhöhte sich der Gesamtwirkungsgrad merklich, während sich die thermische Belastung verringerte. Zum anderen gelang es, die thermischen Effekte durch eine geänderte geometrische Form des aktiven

Mediums stark zu reduzieren – als langer, dünner Faserlaser (IPG Photonics, Burbach) oder Scheibenlaser²⁾ [11] (Trumpf, Ditzingen). In beiden Fällen ist das Verhältnis von kühlender Oberfläche zu wärme-producingem Volumen sehr viel größer, und die Kühlung dadurch sehr viel effektiver. Das zusätzliche Ersetzen der aktiven Neodymatome durch Ytterbium reduzierte nochmals die thermischen Effekte. Damit stieg der Wirkungsgrad von drei Prozent um 1970 auf heute über 30 Prozent an. Ausgangsleistungen von 20 Kilowatt mit hoher Strahlqualität sind derzeit Stand der Technik [12].

Nicht zu unterschätzen ist auch das zunehmende Verständnis für die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie. Dieser sehr komplexe Prozess umfasst viele Aspekte der Physik: heiße Plasmen, Viskosität und optische Parameter flüssiger Metalle, deren Dynamik, nichtlineare Optik usw. Dem Ziel, den gesamten Materialbearbeitungsprozess zu modellieren, ist man schon recht nahe gekommen. Allerdings sind die Wechselwirkungen der extrem kurzen Laserpulse mit dem Werkstück, die nur Femtosekunden oder noch weniger dauern, sowie die hohen Nichtlinearitäten, die hierbei auftreten, bislang nur ansatzweise verstanden.

Jedem seinen Laser!

Vom gesamten Umsatz des Lasergeschäfts entfielen 2009 mit 2,2 Milliarden US-Dollar rund 30 Prozent auf die Materialbearbeitung. Die medizinischen Anwendungen, die sich teilweise auch der Materialbearbeitung zuordnen lassen, machen weitere sieben Prozent aus. Heute dominieren hier zwei Lasertypen zu etwa gleichen Anteilen, der CO₂- und der Festkörperlaser [13], letzterer als Scheiben- und als Faserlaser. Aber auch der lampengepumpte Neodymlaser der Siebzigerjahre ist noch im Einsatz, und zwar dort, wo hohe Pulsenergien benötigt werden (Abb. 3).

Der Hochleistungsdiodenlaser bekommt wegen seines hohen Wirkungsgrads zunehmend Bedeutung für spezielle Anwendungen, trotz der noch nicht optimalen Strahlqualität. Er kann jedoch bereits mit den lampengepumpten Festkörperlasern konkurrieren.

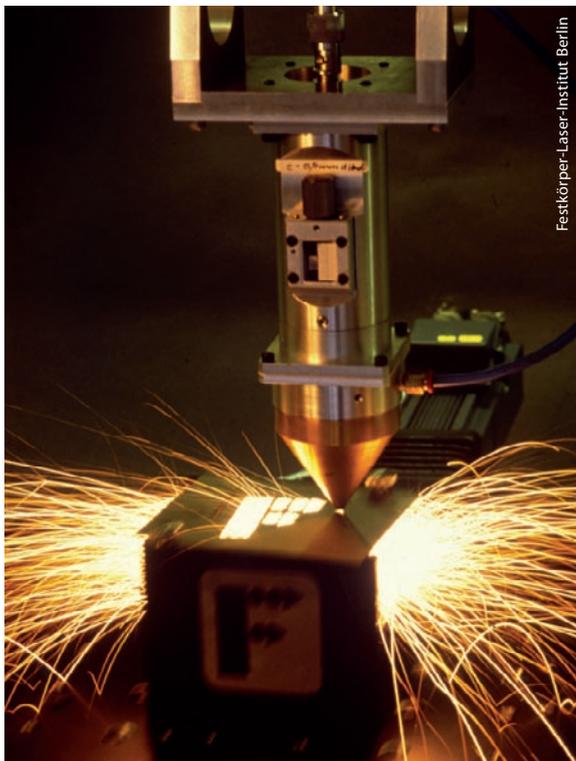
Eine stetige Verbesserung der wesentlichen Kennzahlen wie Strahlqualität, Leistung, Wirkungsgrad durch neue Technologien ist der naheliegende

Schritt. Dabei zeichnen sich momentan zwei Trends ab. Zum einen verbessert sich die Strahlqualität der elektrisch gepumpten Hochleistungsdiodenlaser immer mehr und deren Ausgangsleistung wächst, sodass diese langfristig den anderen Materialbearbeitungslasern Konkurrenz machen werden. Zum anderen wird der Einsatz extrem kurzer Pulse zu einer völlig neuen Art der Material-

²⁾ vgl. den Beitrag von A. Giesen et al. in diesem Heft.



◀ **Abb. 3** Dieser kommerzielle Neodym-Glas-Laser (1970) dient zum gepulsten Schweißen und wird heute noch produziert.



Festkörper-Laser-Institut Berlin

Abb. 4 Ein kontinuierlicher Festkörperlaser mit zwei Kilowatt Leistung kann auch Stahl schneiden.

bearbeitung führen, und zwar deshalb, weil die Laserenergie in einer Zeit deponiert wird, die vergleichbar oder geringer ist als die Elektronenrelaxationszeit ($< 10^{-12}$ s). Diese Art der nichtthermischen Wechselwirkung führt zu einer viel präziseren Bearbeitung. Das Problem ist derzeit noch die geringe mittlere Leistung der Kurzpuls laser, die keine hohen Prozessgeschwindigkeiten zulässt. Für das Präzisionsbohren feiner Löcher werden sie jedoch bereits industriell eingesetzt. Dabei ist es überraschend, dass keine neuen Lasersysteme zu erkennen sind. Die drei seit über 40 Jahren bekannten CO₂-, Neodym/Ytterbium-Kristall- und Diodenlaser sind noch immer die Favoriten.

Welche Bedeutung diese Technologie derzeit in Deutschland hat, zeigt die Gründung von Fraunhofer-Instituten in Aachen und Dresden sowie mehreren von den Ländern unterstützten Einrichtungen, deren Schwerpunkte im Bereich der Lasertechnik liegen. Deutsche Unternehmen führen weltweit, wenn es darum geht, Lasersysteme zu entwickeln und anzuwenden. Entscheidend dafür war letztlich die Initiative weniger Wissenschaftler und Ingenieure in den Sechzigerjahren, die sich mit Weitblick und Ausdauer für den Laser einsetzten, ungeachtet aller negativen Prognosen. Hinzu kam die exzellente wissenschaftliche und technische Infrastruktur Deutschlands. In den Bereichen Optik, Spektroskopie, Gasentladungsphysik und Festkörperphysik waren in den vorangehenden Jahrzehnten die Grundlagen erarbeitet worden. Der Maschinenbau lieferte einerseits die notwendige präzise Fertigungstechnik, zum anderen war er gleichzeitig der Anwender. Der Schlüssel zum Erfolg war die Herstellung von Laserfertigungssystemen, also ein Laser

mit Strahlführung, zugeschnitten auf das spezielle Bearbeitungsproblem.

Die Lasermaterialbearbeitung war in Deutschland eine Erfolgsgeschichte. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Entwicklung fast ausschließlich von damals noch kleinen und mittleren Unternehmen vorangetrieben wurde. Ganz wesentlich für den kommerziellen Durchbruch war die langfristige Förderung durch Bund und Länder, denn bei der Entwicklung neuer Technologien gibt es keine schnellen Erfolge. In diesem Fall dauerte es immerhin rund zwanzig Jahre.

*

Mein Dank gilt den Herren R. Dinger, K. Gürs, G. Herziger, H. Hügel, D. Röß, P. Seiler und P. Wirth für ihre Hilfe bei den Details.

Literatur

- [1] H. Niedrig, *Elektronenmikroskopie* **29**, 15 (2009)
- [2] H. Boersch, G. Herziger und H. Weber, Rubin- und He/Ne-Laser einfacher Konstruktion, Frühjahrstagung der Phys. Gesellschaft zu Berlin 1962
- [3] J. Lemmerich, *Zur Geschichte der Entwicklung des Lasers*, D.A.V.I.D. Verlagsgesellschaft Berlin (1987)
- [4] E. P. Fischer, *Laser – Eine deutsche Erfolgsgeschichte von Einstein bis heute*, Siedler, München (2010)
- [5] H. Boersch, G. Herziger, K. Anger und H. Weber, Herstellung von Blendenbohrungen mit Laserstrahlung, Physikertagung Hamburg 1963, *Phys. Verh.* **14**, 162 (1963); H. Boersch, K. Anger, G. Herziger und H. Weber, Herstellung von elektronenmikroskopischen Blenden und Spalten mit dem Rubin-Laser, Tagung für Elektronenmikroskopie, Zürich (1963)
- [6] S. Panzer, *ZAMP* **16**, 138 (1965)
- [7] H. Weber und G. Herziger, *Laser- Grundlagen und Anwendungen*, Physik-Verlag, Weinheim (1972)
- [8] S. Panzer, *Elektr. Ausrüstungen* **4**, 124, (1964); H. G. Patzke, *VDI-Z.* **64**, 787 (1964)
- [9] D. Röß, *Appl. Opt.* **3**, 259 (1964)
- [10] W. H. Müller und P. Seiler, *Jahrbuch der deutschen Gesellschaft für Chronometrie* **24**, 91 (1973) V9
- [12] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig und H. Opower, *Appl. Phys. B* **58**, 365 (1994)
- [12] D. Petring, F. Schneider, N. Wolf und V. Nazery, *ICALEO 2008, Congress Proc.*, S. 95
- [13] G. Overton und S. G. Anderson, *Laser Focus World* **45**, Nr. 1 (2009); G. Overton, S. G. Anderson, D. A. Belforte und T. Hausken, *Laser Focus World* **46**, Nr. 1 (2010)

DER AUTOR

Horst Weber (FV Quantenoptik/Photonik) hat an der TU Berlin Physik studiert und dort am I. Physikalischen Institut promoviert und habilitiert. 1969 ging er als Privatdozent an das Institut für Angewandte Physik der Universität Bern und befasste sich dort mit der Entwicklung von Festkörper- und Diodenlasern, lasergestützter Satellitendistanzmessung und laserinduzierten Plasmen. 1975 nahm er einen Ruf an den Fachbereich Physik der Universität Kaiserslautern an und arbeitete auf dem Gebiet der Festkörperlaser höher kontinuierlicher Leistungen, Licht-Plasma-Wechselwirkung und dielektrischer Beschichtungen. 1988 übernahm er eine Professur am Fachbereich Physik der TU Berlin und wurde Geschäftsführer des Festkörperlaser-Instituts Berlin (FLI heute LMTB). 2003 wurde er emeritiert.

