

---

## Vorwort

Die Entwicklung der Laser liefert ein beeindruckendes Beispiel für Technologie-Transfer mit konsequenter und rascher Umsetzung von Forschungsarbeiten in kommerziell nutzbare Produkte. Aufbauend auf der Theorie elektromagnetischer Wellen, insbesondere jedoch auf den grundlegenden Arbeiten der Quantentheorie, gelang es 1960, die ersten Festkörperlaser und Gaslaser experimentell zu realisieren. Dies führte weltweit zu einer stürmischen Entwicklung sowohl bezüglich Theorie als auch Experiment. Gegenüber der Emission thermischer Strahlungsquellen zeichnet sich Laserstrahlung durch hohe Kohärenz aus. In klassischer Beschreibung bedeutet dies, dass damit erstmals auch im optischen Bereich ( $10^{14}$  bis  $10^{15}$  Hz) definierte räumliche und zeitliche Phasenbeziehungen zwischen emittierten Wellenfeldern erzielt wurden. Die mit Lasern erreichbaren spektralen Strahldichten (d. h. Leistungen pro Flächeneinheit, pro Raumwinkeleinheit und pro spektrale Bandbreite der Emission) liegen mehr als 14 bis 16 Zehnerpotenzen über denen thermischer Strahlungsquellen. Laser eignen sich somit als vielseitige, neuartige Werkzeuge, wobei sich Photonen sowohl als Energieträger als auch als Informationsträger für wissenschaftliche und technische Anwendungen einsetzen lassen.

Die Einsatzmöglichkeiten für die Strahl-Stoff Wechselwirkung betreffen die Nutzung der Photonen für die Energieübertragung. Dies gilt für die Grundlagenforschung (z.B. Fusion, Beschleuniger) ebenso wie für technisch, industrielle Verfahren (z.B. Materialbearbeitung) oder für laserinduzierte reaktionskinetische Prozesse in der Chemie, Biologie und Medizin.

Zur zweiten Gruppe gehören demgegenüber Anwendungen, bei denen Photonen im Hinblick auf Informationsübertragung und optische Kommunikation genutzt werden. Dies beinhaltet somit auch die Lasermesstechnik mit kohärent optischen Verfahren im Bereich der linearen Optik ebenso wie – bei hohen Leistungsdichten – der nichtlinearen Optik.

Das vorliegende Buch, das sich mit diesem zweiten Aspekt der Photonik befasst, entstand aus der Vorlesung „Ausgewählte Kapitel der Lasermesstechniken“ der Universität Karlsruhe, die ich neben meiner hauptberuflichen

Tätigkeit als Leiter der Division „Optronik, Laser, Sensorik“ des Deutsch-Französischen Forschungsinstituts Saint-Louis, ISL, auf Anregung von Prof. Dr. G. Grau, dem damaligen Leiter des Instituts für „Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik“ zunächst als Lehrauftrag übernommen hatte. Gerade im Hinblick auf die Anwendungen der Photonik für die Informationsübertragung stellte diese experimentell- und praxisorientierte Vorlesung eine sinnvolle Ergänzung zu dem Schwerpunkt „optische Nachrichtentechnik“ dieses Hochschulinstituts in Karlsruhe dar. Seit der Ernennung zum Honorarprofessor der Fakultät „Elektrotechnik und Informationstechnik“ ist die Vorlesung Bestandteil im Rahmen der aktuellen Studienmodelle der Fakultät, insbesondere der „Optoelektronik“. Motivierend für die Vorlesung war stets, dass interessierten Hörern die Möglichkeit zur Durchführung von Studienarbeiten, Diplomarbeiten und Dissertationen im ISL gegeben wurde. Dies ermöglichte den Studierenden, ihre Kenntnisse zu vertiefen, das wissenschaftliche Arbeiten in einer – in diesem Fall bi-nationalen – Forschungseinrichtung kennen zu lernen und dadurch auch konkretere Vorstellungen über die eigenen beruflichen Orientierungen nach Studienabschluss zu gewinnen.

Zum Inhalt des vorliegenden Buches ist anzumerken, dass in den ersten Kapiteln – nach einer detaillierten Behandlung der theoretischen Grundlagen der Laserdiagnostik, der Strahlungs- und Kohärenzeigenschaften sowie nach einer zusammenfassenden Bewertung der für messtechnische Aufgaben eingesetzten Lasersysteme – zunächst die Möglichkeiten messtechnisch nutzbarer Information ebenso wie die gängigen Verfahren zur Strahldiagnostik und Registrierung aufgezeigt werden. Die anschließend beschriebenen Verfahren der Laserentfernungsmesstechnik gehören mit zu den ersten, bereits 1961 eingesetzten Anwendungen. Aufgrund verbesserter, kompakterer Laserquellen besteht jedoch nach wie vor auch auf diesem Gebiet ein zunehmender Entwicklungsbedarf. Dies gilt analog auch für Lasergeschwindigkeitsmessungen, die sich durch zusätzliche Nutzung des Dopplereffekts realisieren lassen.

Einen wichtigen Raum nehmen daneben Lasermessverfahren ein, die eine direkte Visualisierung von Prozessabläufen ermöglichen. Dies gilt insbesondere für die Messung schnell ablaufender, transienter Vorgänge, für die sich aufgrund der inzwischen erreichbaren Belichtungszeiten bzw. Bildfolgefrequenzen revolutionierende Möglichkeiten der Kurzzeitfotografie und Kinematografie eröffnen. Für die Bildaufzeichnung werden übrigens inzwischen fotografische Registriermidien, von speziellen Ausnahmen abgesehen, weitgehend von hochauflösenden CCD- oder CMOS-Kameras großer Dynamik verdrängt. Zur bildmäßigen Erfassung und Bestimmung von Strahlablenkungswinkeln bei Transmission durch inhomogene oder anisotrope Medien bzw. zur Erfassung von Phaseninformationen der als immaterielle Sonden verwendeten Laserstrahlung lassen sich mit Laserquellen modifizierte Schlierenanordnungen, Schattenverfahren, Moiré-Techniken bzw. interferometrische Verfahren einsetzen. Diese werden detailliert beschrieben, ebenso wie daran anschließend die neuen, spezifisch kohärent optischen abbildenden Lasermessverfahren. Hierzu gehören die Trägerfrequenz-fotografischen Techniken. Diese nutzen die den

Laseraufnahmen statistisch überlagerten, granulierten Helligkeitsverteilungen („speckles“), mit denen wertvolle zweidimensionale, messtechnisch nutzbare Informationen erhalten werden können. Hierzu gehören ebenso die holographischen Messverfahren, die von besonderem Interesse sind, da sie gegenüber allen anderen abbildenden optischen Methoden eine vollständige Erfassung auch dreidimensionaler komplexer Wellenfelder nach Betrag und Phase ermöglichen.

Besondere Bedeutung haben Laser und Lasermessverfahren inzwischen auch in der Umweltmesstechnik erlangt. Bei LIDAR-Verfahren (Light Detection And Ranging) z. B. können dabei unterschiedliche Prozesse genutzt werden. Dazu gehören Messungen der Absorption bzw. der differentiellen Resonanzabsorption, ebenso der Rayleigh-, Mie- sowie Raman- Streuung. Derartige Verfahren ermöglichen unter anderem die quantitative Erfassung von Spurenstoffen, auch von Schadstoffen, selbst bei sehr geringen Konzentrationen im „ppb“-Bereich (parts per billion). Aufgrund der mit Lasern erreichbaren hohen Spitzenleistungsdichten werden neben spontaner Streuung zunehmend auch stimulierte Streuprozesse genutzt. Zu deren Verständnis werden die Grundlagen der „Nichtlinearen Optik“ – soweit erforderlich – detailliert behandelt, auch mit Hinweisen auf weiterführende Literatur.

Zu den „high-lights“ der Lasermessverfahren gehören zweifellos auch die Ultrakurzpuls-Techniken. Gegenüber gütegeschalteten Nanosekunden-Riesenimpulsen typischer Festkörperlaser lagen bereits 1964 die ersten, mit passiver Modenkoppelung erreichten Halbwertsbreiten bei wenigen zehn Picosekunden ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ), entsprechend einer Pulsverkürzung um nahezu drei Zehnerpotenzen. Die anschließenden Etappen der danach einsetzenden Entwicklung zum Erreichen noch – bis drei Größenordnungen – kürzerer Impulse, z. B. mit Hilfe der „colliding pulse“-Technik, mit der Entwicklung von Ti:Saphir Lasern unter Ausnutzung der internen Kerr-Linsen-Modenkoppelung sowie mit den sättigbaren Halbleiterabsorberspiegeln (SESAMs, SEMiconductor Saturable Absorbing Mirrors), werden aufgezeigt und diskutiert. Inzwischen werden Halbwertsbreiten von wenigen Femtosekunden ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) reproduzierbar erreicht. Demzufolge lassen sich mit den beschriebenen fotografischen, interferometrischen oder spektroskopischen Verfahren, beispielsweise auch mit der „pump and probe“ Technik, fs-Zeitaufösungen erreichen. Für die Holographie gilt dies allerdings nur in Ausnahmefällen, da Ultrakurzpulslaser infolge ihres breiten Spektrums nur geringe Kohärenzlängen aufweisen. In den abschließenden Anmerkungen wird ein Ausblick über die neuen, faszinierenden Möglichkeiten gegeben, die sich mit diesen nur einige fs langen, aus wenigen Feld-Oszillationsperioden bestehenden Laserpulsen, erreichen lassen. Durch deren Wechselwirkung, z. B. mit Edelgasen, lassen sich oberhalb definierter Leistungsdichteschwellen höhere harmonische, d. h. kürzerwellige, elektromagnetische Impulse im XUV erzeugen, die sich durch um weitere 2 bis 3 Zehnerpotenzen kürzere Pulshalbwertsbreiten bis in den Attosekunden-Bereich auszeichnen ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ). Es ist offensichtlich, dass sich hierdurch neue Forschungsgebiete

mit interessanten Perspektiven eröffnen, insbesondere auch für zukünftige höchstauflösende messtechnische Aufgaben.

Das Buch wendet sich als Lehrbuch an Studierende der Physik und Ingenieurwissenschaften von Universitäten und Hochschulen, insbesondere auch an Absolventen von Bachelor- und Master-Abschlüssen bzw. an Diplomanden, Doktoranden und Post-Doktoranden. Bei den Ingenieurwissenschaften betrifft dies die Fachrichtungen Elektrotechnik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik oder auch Luft und Raumfahrt, um nur einige zu nennen. Es betrifft insbesondere aber auch die für zukünftige „Exzellenz Initiativen“ zunehmend wichtiger werdenden interdisziplinären Fachbereiche, bei denen ebenfalls höchstpräzise Lasermessverfahren zum Einsatz kommen. Gleichermaßen wendet sich das Buch auch an Studierende von Fachhochschulen sowie auch – als umfassendes Nachschlagewerk – an bereits im bereits Beruf stehende Physiker und Entwicklungs-Ingenieure in Forschungseinrichtungen ebenso wie in Labors oder Entwicklungsabteilungen der Industrie.

Es sollte nochmals hervorgehoben werden, dass sich für das Buch vorteilhaft erwiesen hat, dass – aus den Arbeitsbereichen, entsprechend den Forschungsprogrammen des Deutsch-Französischen Forschungsinstituts Saint-Louis – eine Vielzahl von aktuellen Beispielen eingebunden werden konnte. Das betrifft Lasermessverfahren aus eigenen Arbeiten, ebenso wie aus Veröffentlichungen von Mitarbeitern aus den zur Division gehörigen Arbeitsgruppen, was praxisnahe und deshalb auch anschauliche Ergänzungen ermöglichte. Für die langjährige Unterstützung möchte ich an dieser Stelle deshalb auch nochmals den Direktoren des Deutsch-Französischen Forschungsinstituts Saint-Louis, ebenso aber auch den Mitarbeitern der Division „Optronik, Laser, Sensorik“, sowie auch der anderen Divisionen des ISL, meinen besten Dank aussprechen.

Lörrach, Oktober 2006

Manfred Hugenschmidt

Lasermesstechnik

Diagnostik der Kurzzeitphysik

Hugenschmidt, M.

2007, XV, 411 S., Softcover

ISBN: 978-3-540-29920-2