

Gestreckt zu Höchstleistungen

Eine Hälfte des Physik-Nobelpreises 2018 teilen sich Donna Strickland und Gérard Mourou für die Methode der Chirped Pulse Amplification.

Georg Korn

Der erste experimentelle Beweis starker optischer Laserstrahlung gelang Theodore H. Maiman 1960 mit einem Rubinlaser. Basierend auf einer Reihe wichtiger experimenteller und theoretischer Arbeiten zu Lasern und Masern erhielten Charles H. Townes, Nikolai G. Basow und Alexander M. Prochorow 1964 den Nobelpreis für Physik. Im laufenden Jahr teilen sich Donna T. Strickland und Gérard A. Mourou eine Hälfte des Preises für die Entwicklung einer Methode, um hochintensive und ultrakurze optische Pulse zu erzeugen.

Noch in den 1960er-Jahren führten Verfahren wie die Gütemodulation (Q-switch) dazu, Laserpulse im Nanosekundenbereich zu erzeugen. In Kombination mit passiver und aktiver Modensynchronisation erhöhte sich bis zu den 1970er-Jahren die verfügbare Spitzenleistung von Laseroszillatoren wesentlich durch den Übergang in den Pikosekundenbereich – zunächst in den Kilowatt- und später in den Megawatt-Bereich. Parallel dazu wuchs das wissenschaftliche Interesse, bei gleicher Energie durch immer kürzere Pulse eine wesentlich höhere Spitzenleistung im Fokus des Lasers zu erreichen (Infokasten). Dazu eignen sich insbesondere Festkörperlaser aus Materialien, wie zum Beispiel Nd-dotierten Gläsern. Deren Fähigkeit, Energie zu speichern, führt durch die große Bandbreite des Laserübergangs zur Verstärkung kurzer energiereicher Pulse. Schon eine einfache Abschätzung beweist die hohe extrahierbare Spitzenleistung eines Nd:Glas-Lasers von etwa 10 TW/cm^2 . Bei diesen Intensitäten führt nichtlineare Selbstfokussierung dazu, dass die Eigenschaften der Laserstrahlung im Material verändert werden, was zu einer



Gérald Mourou (rechts) und Georg Korn (Mitte) bei einer ELI-Konferenz in Prag 2015

Verringerung der Fokussierbarkeit führt. Dabei induziert ein Laserstrahl durch Streuzentren Interferenzen mit sich selbst. Durch eine intensitätsabhängige Modulation des Brechungsindex wandeln sich die Interferenzen in Phasengitter um, die Teile des Laserlichts durch Diffraktion ablenken. Bei steigender Laserintensität dominiert dieser Prozess: Die Strahlung lässt sich nicht mehr fokussieren, und das Material wird zerstört. Um zu höheren Spitzenleistungen und Energien zu gelangen, galt es daher, diese nichtlinearen Effekte unter Kontrolle zu bringen.

Die einzige bekannte Methode bestand darin, den Strahldurchmesser zu vergrößern. Das kann durch Erhöhung der Apertur oder durch Parallelisierung von Strahlen erfolgen, wie zum Beispiel an der National Ignition Facility (NIF) in Livermore, Kalifornien. Die extrem gute zeitliche Synchronisation bei sehr kurzen Pulsen ist allerdings eine große Herausforderung.

Auch wenn höhere Bandbreite durch Selbstphasenmodulation dazu führte, die Pulse nach dem Ver-

stärken wieder zu verkürzen, ließ sich die verfügbare Intensität zu Beginn der 1980er-Jahre nicht mehr steigern. Erst die Idee zur „Chirped Pulse Amplification“ von Gérard Mourou und deren technische Umsetzung und detaillierte Untersuchung durch seine Doktorandin Donna Strickland halfen, diese Limitierung aufzuheben [1].

Bei der Chirped Pulse Amplification wird ein typischerweise fs-langer Laserimpuls durch ein Gitterpaar in einem Teleskop dispersiv gestreckt, sodass die niedrigen Frequenzkomponenten den hohen vorauslaufen. Das entspricht einer positiven Frequenzmodulation. Der so verlängerte Puls lässt sich ohne Limitierung durch nichtlineare Selbstfokussierung verstärken. Anschließend sorgt ein weiteres Gitterpaar mit negativer Dispersion dafür, die ursprüngliche Pulslänge wieder zu erreichen – nun aber mit einer um Größenordnungen erhöhten Spitzenleistung (Abb. 1).

Das Strecken der Pulse verringert die Intensität und erlaubt es, deutlich höhere Energien zu

Dr. Georg Korn, Department of Experimental Programmes and System Engineering, ELI Beamlines, Za Radnicí 835, 252 41 Dolní Břežany, Tschechien

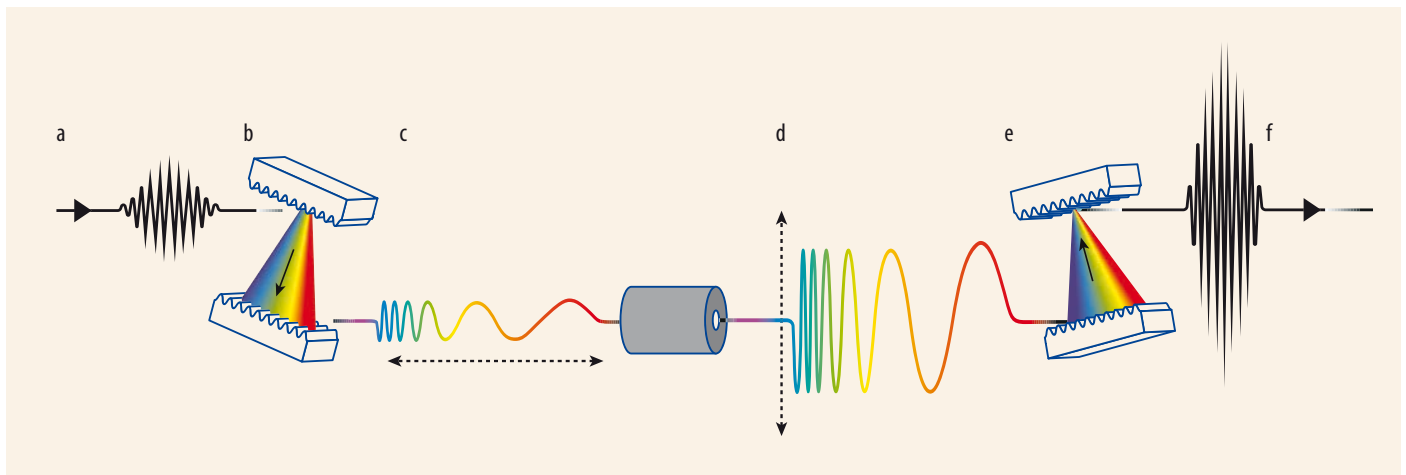


Abb. 1 Bei der Chirped Pulse Amplification treffen die femtosekundenlangen Lichtpulse eines Lasers (a) auf ein Gitterpaar (b) in einem Teleskop (hier nicht gezeigt), das den Puls dispersiv

streckt (c). Die neue Pulslänge von wenigen Nanosekunden reduziert die Spitzenleistung, sodass der Puls verstärkt werden kann (d). Im Anschluss komprimiert ein weiteres Gitterpaar

(e) den Puls, sodass die Spitzenleistung um mehrere Größenordnungen ansteigt (f).

extrahieren. Seit der Einführung der Chirped Pulse Amplification 1985 wächst die erzielbare Intensität wieder viel schneller an (Abb. 2). Der Streckungsfaktor im Vergleich zum ungestreckten Puls bestimmt nun im Wesentlichen die mögliche fokussierbare Spitzenleistung. Typische moderne Stretchersysteme verlängern Pulse von einigen 10 fs bis auf mehrere Nanosekunden und erlauben auch das Komprimieren nach der Verstärkung. Dieser Faktor 10^5 bis nahe 10^6 hat den Weg zu Lasern mit Leistungen von zehn bis hundert Petawatt geebnet. Mit dem bisherigen Rekord von 10^{22} W/cm² liegen heute deutlich höhere als relativistische Intensitäten vor ($>10^{18}$ W/cm², Infokasten).

Seit Einführung der Chirped Pulse Amplification gilt es, alle Komponenten der Technik kontinuierlich weiterzuentwickeln, um immer höhere Intensitäten zu erzielen. Beispielsweise sorgt bei der Optical Parametric Chirped Pulse Amplification ein nichtlinearer Kristall anstelle des aktiven Lasermaterials dafür, dass Verstärkung durch einen nichtlinearen Prozess auftritt. Dabei zerfallen die Pumppulse jeweils in einen Signalpuls und einen langwelligen „idler pulse“. Das Verfahren lässt sich auf sehr kurze Pulse (< 10 fs) anwenden; Konzepte bis hundert Petawatt liegen vor.

Neue Techniken wie Faserlaser oder dünne Scheibenlaser erlau-

ben es, in andere Spektralbereiche vorzudringen und auch mittlere Leistungen bis zu mehreren Kilowatt zu verstärken. Materialien mit großer Bandbreite werden schrittweise verbessert. So ist Ti:Saphir in guter optischer Qualität mit großen Durchmessern heute herstellbar. Zusammen mit großen Gittern – beispielsweise erzeugt durch Holographie kleinerer Komponenten – sind damit größere Strahldurchmesser möglich. Diodengepumpte Systeme arbeiten mit einer höheren Effizienz und erlauben ein besseres Wärmemanagement, wodurch die mittleren Leistungen enorm gesteigert werden konnten.

Ein möglicher auf Diffraktionsgrenze fokussierter Exawattlaser (10^{18} W) könnte den Weg zu Intensitäten von 10^{26} W/cm² ermöglichen.

Unerwartete Anwendungen

Ich hatte mehrere Jahre die Möglichkeit, persönlich mit Gérard Mourou zusammenzuarbeiten, als dieser Direktor des Centre for Ultrafast Optical Sciences an der University of Michigan in Ann Arbor, USA, war. Dabei habe ich ihn als einen äußerst innovativen und großartig visionären Wissenschaftler kennengelernt. Zu dieser Zeit war das Ziel unserer Forschung nicht nur, immer höhere Spitzen- und mittlere Leistungen zu erreichen, sondern auch Anwendungen in Wissenschaft, Technik und Medizin zu finden. Seit den 1990er-Jahren wurden die Lasersysteme deutlich kompakter, stabiler und damit anwenderfreundlicher. Ein Unfall mit einem Titan:Saphir-Femtosekundenlaser führte dazu,

KENNGRÖSSEN VON FESTKÖRPERLASERN

Die **Spitzenleistung** eines Lasers ist definiert als die Energie des Laserlichts E normiert auf die Pulsbreite τ : $P_{\text{peak}} = E/\tau$. Damit ergibt sich die **Intensität im Fokalfleck** der Fläche A zu: $I_{\text{fokus}} = P_{\text{peak}}/A$.

Damit ein Festkörperlaser Energie mit hoher Effizienz emittiert, sollte er bei seiner **Sättigungsflussdichte** betrieben werden: $F_{\text{sat}} = hv/\sigma$. Dabei entspricht σ dem Wirkungsquerschnitt für stimulierte Emission im aktiven Lasermaterial.

Die **extrahierbare Leistung** pro Quadratzentimeter hängt von der Sät-

tigungsflussdichte und der Bandbreite $\delta\nu$ ab: $P_{\text{extr}} = \delta\nu (hv/\sigma)$. Damit ergibt sich die **extrahierbare Intensität** pro Quadratzentimeter in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ des Lasers zu: $I_{\text{extr}} = (\delta\nu/\lambda^2) \cdot (hv/\sigma)$. Dieser Zusammenhang gilt nur dann, wenn der Laser auf die Diffraktionsgrenze fokussiert wurde.

Spitzenwerte bei Leistung und Intensität erreichen Ti:Saphir-Laser mit bis zu 100 TW/cm² und 10^{22} W/cm². Für dotierte Gläser sind zwischen 20 und 50 TW/cm² und damit bis zu $2 \cdot 10^{21}$ W/cm² möglich.

dass wir zusammen mit Ophthalmologen die Möglichkeit untersuchten, mit Lasern die Augen gezielt zu behandeln und in der Augen Chirurgie einzusetzen. Daraus entstanden der Lasikschnitt und die Femtolasik – eine intrastromale Korrektur von Fehlsichtigkeiten, die mittlerweile mehreren Millionen Patienten geholfen hat. Weitere Entwicklungen sorgten dafür, dass Femtosekundenlaser Transplantationen oder Operationen des grauen Stars unterstützen: Sie erhöhen die Qualität der Behandlung und verringern das Risiko bei der Operation. Mehr als 1500 dieser Systeme befinden sich heute weltweit im Einsatz.

In der Materialbearbeitung sind mehrere Zehntausend Femtosekundenlaser im Einsatz. Anwendungen in Medizin und Industrie dürften einen Gesamtumsatz von mehr als zehn Milliarden Euro erzielt haben. Bei all diesen Anwendungen trat und tritt Gérard Mourou als Ideengeber und Förderer auf, denn „die schönsten und interessantesten Anwendung sind diejenigen, die wir noch nicht kennen“. Sein Wissen und seine Energie sowie sein Streben nach Perfektion machen die Arbeit mit ihm interessant und herausfordernd. Seine Studenten und Mitarbeiter hat er immer sehr gefordert, aber auch stets gefördert. Neben seiner großen Liebe zur Arbeit ist er ein begeisterter Sportler und bei Squash und Tennis nur schwer zu schlagen. Auch lässt sich bestens mit ihm über Literatur, Kunst und Philosophie streiten.

Auf zu Extremen

Zurückgekehrt nach Europa, begann Gérard Mourou, die Idee einer Extreme Light Infrastructure (ELI) zu verfolgen. Er wollte mehrere ultra-intensive Laser in einem großen Zentrum zusammenfassen, um deren Anwendungen in Wissenschaft und Industrie zu erkunden und gleichzeitig den ultimativen Laser zu entwickeln. Seit 2006 ist ELI Teil der Europäischen Roadmap für Forschungsinfrastrukturen (ESFRI). Im Jahr darauf

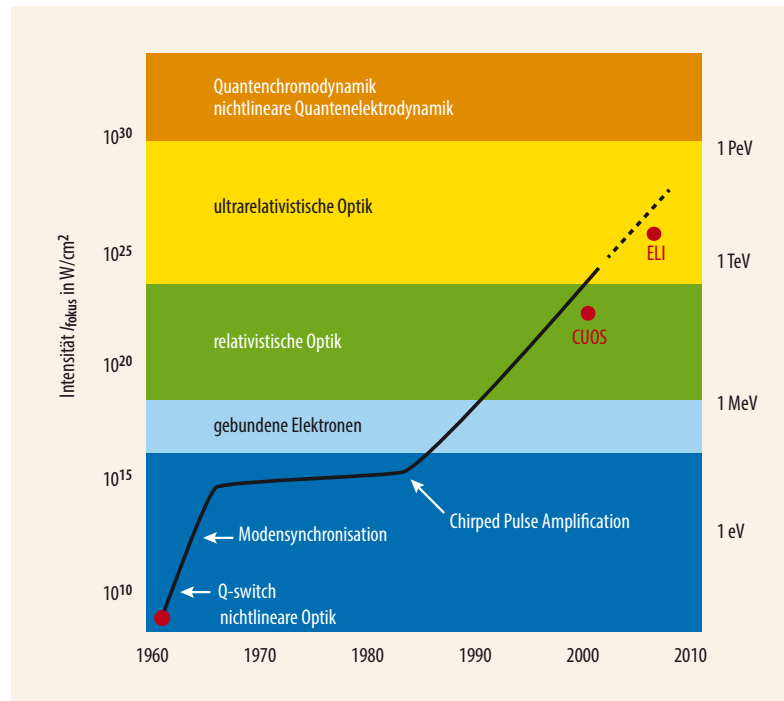


Abb. 2 Die fokussierte Intensität von Lasern stieg nach der ersten Realisierung eines Rubinlasers (1960) steil an. Nach einer Stagnation in den 1970er-Jahren wächst die Intensität seit der Einführung der CPA-Methode (1985) wieder stark an.

begann ich zusammen mit ihm, die Vorbereitungsphase von ELI zu koordinieren: Die Laserzentren mit unterschiedlichen Schwerpunkten entstehen in Tschechien, Ungarn und Rumänien mithilfe nationaler und europäischer Infrastrukturmittel. Heute finden bereits die ersten Experimente im Anwenderbetrieb statt. Die verschiedenen ultrakurzen und hochintensiven Laser erlauben es unter anderem, die lasergetriebene Beschleunigung von Elektronen und Ionen zu untersuchen – eine sehr kompakte Alternative zu herkömmlichen Beschleunigern – oder andere hochintensive Sekundärstrahlen im Röntgenbereich zu erzeugen.

Gérard Mourou hat die Entwicklung von ELI initiiert und bis heute vorangebracht. Aufgrund seiner Erfahrung und seiner permanenten Unterstützung hat Europa heute die Möglichkeit, eine führende Rolle in der Forschung an und mit intensiven Lasern zu spielen.

Auf den Lorbeeren des Physik-Nobelpreises wird er sich – wie ich ihn kennengelernt habe – aber nicht ausruhen. Zumal er seine persönliche ultimative Herausforderung der Laserphysik bisher noch nicht gemeistert hat: Er will das Schwinger-Limit[#] bei 10^{29} W/cm² erreichen. Bei dieser Intensität konvertiert die Laserstrahlung

in Elektronen-Positronen-Paare in Elektronen-Positronen-Paare aus dem Vakuum: Der Laserpuls wandelt virtuelle Teilchen aus dem Dirac-See in reale Teilchen um. Nichtlineare Effekte, die Streuung oder Reflexion an schnellen Elektronen sowie speziell geformte, sich relativistisch bewegende Plasmen werden als Möglichkeiten diskutiert, um das Schwinger-Limit zu erreichen. Wie Gérard Mourou zu sagen pflegt: „This field does not seem to have natural limits, only horizons.“

[1] D. Strickland und G. Mourou, Opt. Commun. 56, 219 (1985)

#) Julian Schwinger erhielt 1965 den Physik-Nobelpreis zusammen mit Richard Feynman und Sin-Itiro Tomonaga für fundamentale Arbeiten zur Quantenelektrodynamik.

DER AUTOR

Georg Korn promovierte an der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Nach einer Stelle als Postdoc am Lebedew-Institut der Russischen Akademie der Wissenschaften in Moskau führten zahlreiche internationale Stationen auch an das Center for Ultrafast Optical Sciences (CUOS) der University of Michigan, USA. Seit 2014 arbeitet er als Science and Technology Manager der ELI Beamlines in Prag. An der Osaka University, Japan, ist er als Gastprofessor tätig.



Wetzlar Network
R. A. Niggemann