

Laserblitze im Rekordtakt

In Konstanz wurde der weltweit schnellste Ultrakurzpulslaser gebaut. Er eröffnet der Präzision von Frequenzmessungen neue Dimensionen. Dadurch erhöht er auch die Chancen zum Aufspüren ferner erdähnlicher Planeten.

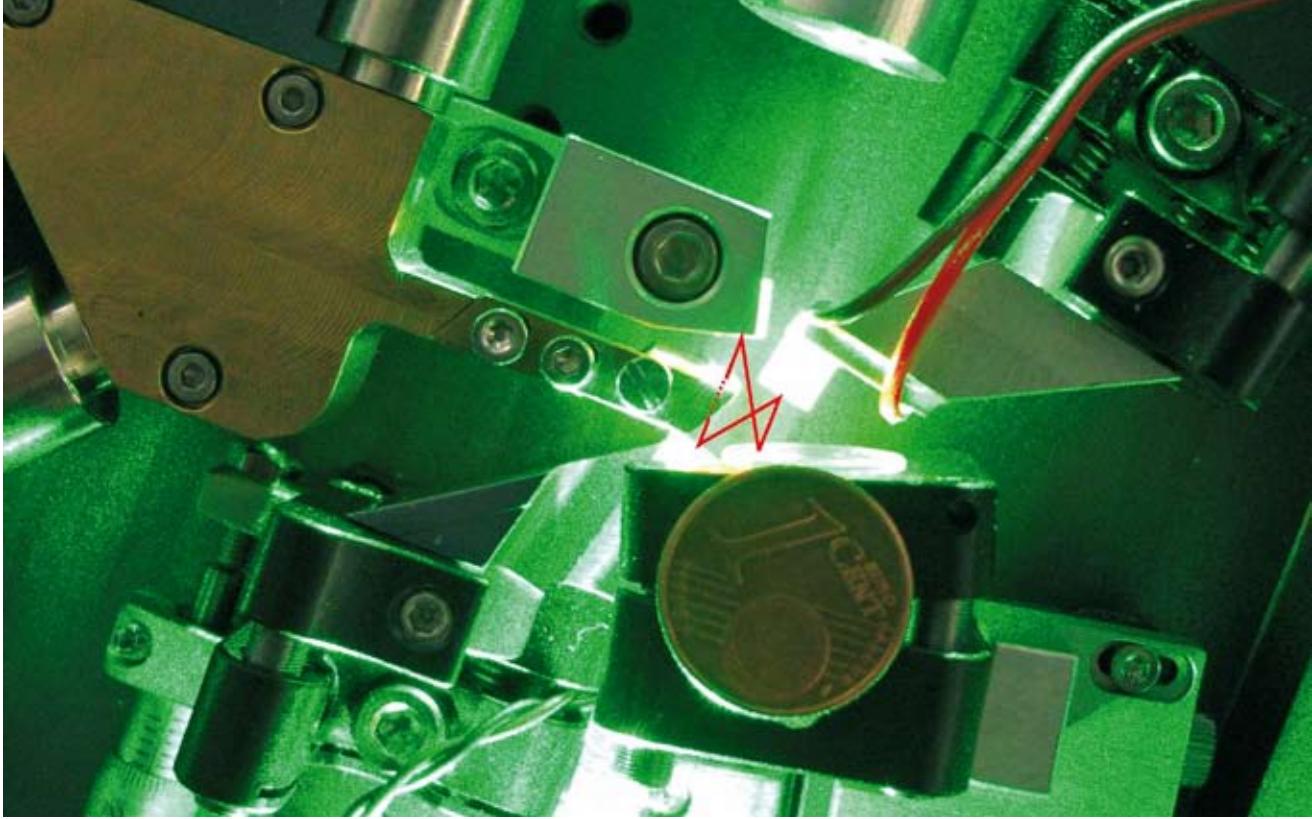
Von Albrecht Bartels und Dirk Heinecke

Zehn Milliarden Lichtblitze pro Sekunde sendet ein Laser aus, den wir am Centrum für Angewandte Photonik der Universität Konstanz und bei der ebenfalls am Bodensee ansässigen Firma Gigaoptics gemeinsam konstruiert haben. Diese Pulsrate von zehn Gigahertz ist Weltrekord: Sie übertrifft die bisherigen Höchstwerte um ein bis zwei Größenordnungen. Jeder einzelne Licht-

puls blitzt dabei nur für die unvorstellbar kurze Zeit von 42 Femtosekunden (0,000 000 000 000 042 Sekunden) auf, weshalb man auch von einem Femtosekundenlaser spricht. In dieser Zeit legt Licht gerade einmal eine Strecke zurück, die dem Durchmesser eines menschlichen Haares entspricht.

Damit sich solch kurze Strahlungspulse bilden, müssen zwischen den Spiegeln des Lasers – im so genannten Resonator – Tausende von stehenden

elektromagnetischen Wellen synchron schwingen. Für sie gilt die Bedingung, dass die Strecke für ihren Hin- und Rückweg exakt einem Vielfachen ihrer Wellenlänge entspricht. Tatsächlich verhält sich unser Femtosekundenlaser dadurch wie ein Ensemble aus Tausenden von Einzellasern, auch Moden genannt, mit exakt definierten und eng benachbarten Frequenzen konstanten Abstands. Die von ihm ausgesandte Strahlung wird daher als Frequenzkamm bezeichnet.



ALLE ABBILDUNGEN DIESES BETRAGS: ALBRECHT BARTELS UND DIRK HEINECKE

net. Für die Nutzung solcher Frequenzkämme zur hochpräzisen Vermessung von Lichtwellen erhielten der deutsche Physiker Theodor Hänsch und sein US-Kollege John Hall 2005 den Physik-Nobelpreis (Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 20).

Die Rekordpulsrate erreichten wir im Wesentlichen durch Verkürzung des Spiegelabstands. Das macht unseren Laser auch zum kleinsten jemals gebauten seiner Art. Sein Resonator ist nicht größer als ein Cent-Stück.

Unser Rezept zur Erhöhung der Pulsrate – Verkürzung des Spiegelabstands – klingt naheliegend und im Grund recht einfach. Seine praktische Umsetzung aber wirft erhebliche Probleme auf. Die Hauptschwierigkeit ist, dass sich durch die große Zahl der Lichtblitze pro Zeiteinheit die auf jeden einzelnen entfallende Leistung, das heißt seine Intensi-

tät, dramatisch verringert: Die Pulse werden zu schwach. Die Kunst lag also darin, diese Leistungseinbußen auszugleichen. Das gelang uns, indem wir das Lasermedium (einen üblichen titandotierten Saphir) und die Brennweite der Spiegel sowie ihre Beschichtung (von der ihr Reflexionsvermögen abhängt) optimal aufeinander abstimmten.

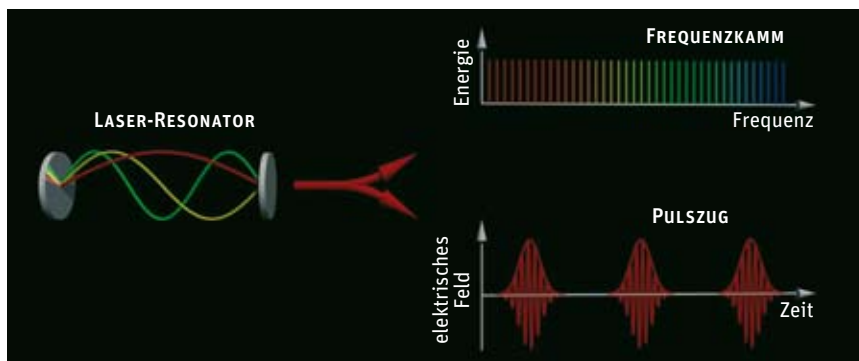
Unser neuer ultraschneller Laser hat vielfältige Einsatzmöglichkeiten überall da, wo es auf die extrem genaue Messung von Frequenzen ankommt – so bei der Spektroskopie von atomaren Übergängen, beim Testen der Invarianz von Naturkonstanten oder bei der Entwicklung neuer, »optischer« Atomuhren.

Eine der interessantesten denkbaren Anwendungen ist sicherlich die Kalibrierung von astronomischen Spektrografen, die zur Suche nach extrasolaren Planeten dienen. Da solche Himmelskörper – im

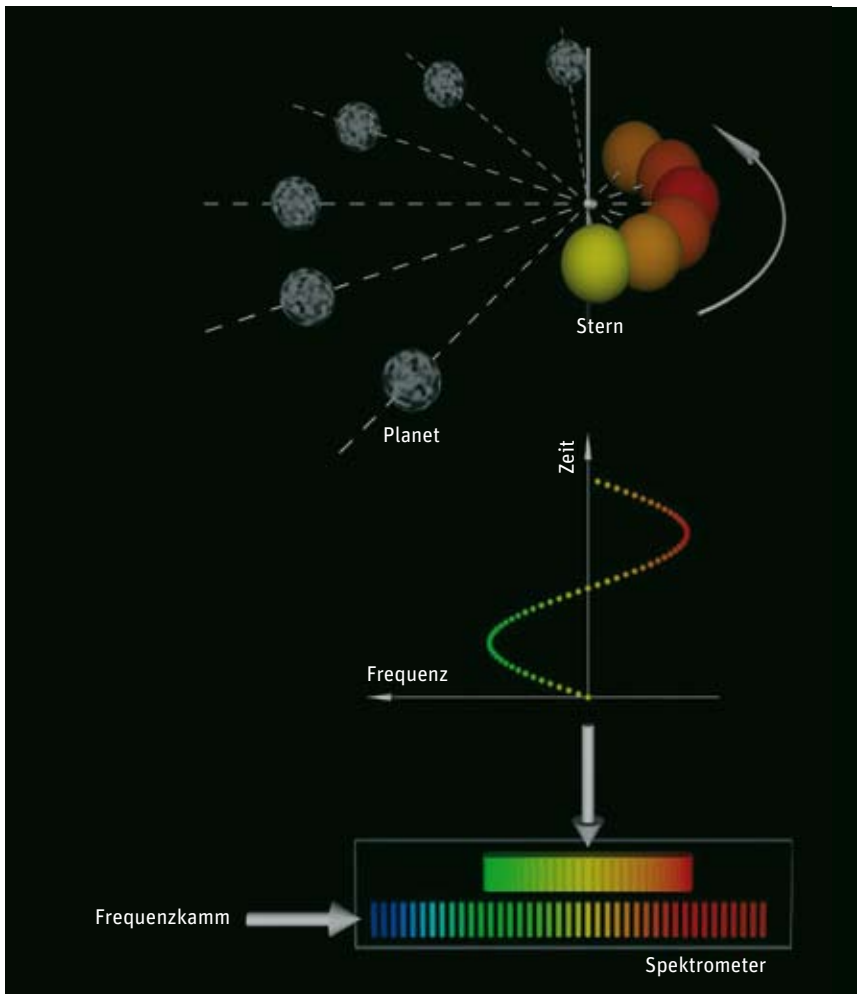
Im Innern des neuen Ultrakurzpulslasers befindet sich ein Ringresonator mit vier Spiegeln. Der Lichtweg ist rot angedeutet.

Gegensatz zu Sternen – selbst kein Licht aussenden, sind sie nicht direkt beobachtbar. Deshalb greifen Astronomen auf verschiedene indirekte Suchmethoden zurück.

Eine davon bedient sich der Wirkung eines Planeten auf das Spektrum des Lichts, das uns von seinem Zentralgestirn erreicht. Beide Objekte rotieren nämlich gemäß Newtons Gravitationsgesetz um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Der befindet sich wegen des extremen Massenunterschieds zwar meist innerhalb des Sterns, fällt aber nicht mit dessen Mittelpunkt zusammen. Dadurch vollführt auch das Zentralgestirn eine schwache Rotationsbewegung, bei der es



Im Resonator eines Femtosekundenlasers oszillieren Tausende von stehenden Wellen synchron. Die ersten drei Grundschwingungen sind hier schematisch dargestellt (links). Die vielen Einzelwellen erzeugen durch Überlagerung einen Zug gepulster Strahlung (rechts unten), während ihre Frequenzen eine regelmäßige Kammstruktur bilden (rechts oben).



Ein Planet (dunkel) und der zugehörige Stern (hell) rotieren um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Auch der Stern bewegt sich daher periodisch von einem Beobachter weg oder auf ihn zu, was zu einer Rot- beziehungsweise Blauverschiebung des von ihm emittierten Lichts führt. Um sie zu entdecken, überlagert man die vom Teleskop aufgefangene Strahlung im Spektrometer mit einem Frequenzkamm-Lineal und vergleicht beide miteinander.

Standards and Technology der USA (NIST) in Boulder (Colorado) die verwendeten Frequenzkämme mit aufwändigen und unökonomischen Filtermethoden so ausgedünnt werden, dass nur noch jeder zehnte bis zwanzigste »Zinken« übrig war. Der Rest blieb ungenutzt.

Unser neuer Laser bringt hier einen echten Durchbruch; denn sein Frequenzkamm ist wegen der hohen Pulsrate viel weniger dicht. Damit entfällt der Filterschritt: Alle Zinken lassen sich nutzen und haben zugleich eine zehn- bis hundertmal höhere Intensität, was sich positiv auf die Messgeschwindigkeit und -präzision auswirkt.

Im Rahmen einer Kooperation mit dem NIST wollen wir nun untersuchen, ob und wie sich das neue Gerät tatsächlich zum Aufspüren kleiner extrasolarer Planeten eignet. Scott Diddams, Forschungsgruppenleiter am NIST, ist zuversichtlich und nennt auch den Grund: »Der Konstanzer Laser besticht insbesondere durch seine einfache Konstruktion und Kompaktheit. Dabei ist er in der Lage, einen präzisen Frequenzkamm mit einem Leistungsniveau zu erzeugen, das durch keine andere Technologie erreicht wird.«

Selbst wenn die Kalibrierung wie gewünscht funktioniert, bedarf es allerdings weiterer technischer Fortschritte, bis die Methode wirklich funktioniert. Insbesondere muss die Auflösung der Spektrografen noch verbessert werden. Dennoch stehen die Chancen nicht schlecht, dass die Entdeckung der ersten fernen Schwester der Erde anhand von Dopplermessungen nicht mehr lange auf sich warten lässt. Sie wäre jedenfalls eine echte Sensation.

Albrecht Bartels und **Dirk Heinecke** forschen am Centrum für Angewandte Photonik der Universität Konstanz. Bartels ist zugleich Geschäftsführer der Gigaoptics GmbH.

periodisch hin und her sowie auf einen Beobachter zu- und von ihm wegläuft. Synchron dazu wechselt auf Grund des Dopplereffekts das emittierte Licht seine Farbe. An dieser Frequenzänderung lässt sich nicht nur die Gegenwart eines Planeten erkennen; sie ermöglicht auch Rückschlüsse auf seine Masse, Bahn und Umlaufdauer.

Suche nach einer zweiten Erde

Um derartige Änderungen zu ermitteln, fangen Astronomen das Sternenlicht mit einem Teleskop ein und vergleichen es mit dem Spektrum einer Gaslampe mit Emissionslinien genau bekannter Frequenz. Solche Lampen sind allerdings in ihrer Variationsbreite und Präzision begrenzt. Bislang ließen sich mit dieser Methode deshalb nur Planeten mit einem Vielfachen der Erdmasse entdecken.

Frequenzkämme auf der Basis von Femtosekundenlasern ermöglichen eine sehr viel präzisere Kalibrierung der Spektrografen und könnten so helfen, künftig auch Planeten von der Größenordnung

der Erde aufzuspüren. Diese vergleichsweise kleinen Körper verursachen an ihrem Stern nämlich nur Geschwindigkeitsänderungen von wenigen Zentimetern pro Sekunde, was einer relativen Verschiebung der Lichtwellenlänge um zehn Billionstel (10^{-11}) entspricht und die bisher mögliche Messgenauigkeit bei Weitem übersteigt.

Ein Frequenzkamm lässt sich mit einem Lineal vergleichen, bei dem jeder Teilstrich einer der genannten Moden entspricht. Diese Teilstriche haben die enorme Genauigkeit einer Atomuhr. Allerdings war es bislang nicht möglich, ein solches Frequenzkamm-Lineal direkt abzulesen. Die Teilstriche lagen, da ihr Abstand durch die Pulsrate des Femtosekundenlasers gegeben ist, zu dicht beisammen, um sich getrennt voneinander wahrnehmen zu lassen. Daher mussten in jüngsten Experimenten zur Kalibrierung astronomischer Spektrografen an der Harvard University und dem Massachusetts Institute of Technology, beide in Cambridge, sowie dem National Institute of