

Faserlaser am Quantenlimit

Faserintegrierte Komponenten bieten Verstärkung und Rauschunterdrückung zugleich.

Marvin Edelman

Ultrakurze, hochintensive Laserpulse ermöglichen wissenschaftliche Anwendungen und industrielle Technologien. Neben Frequenzkämmen für die Kosmologie und hochpräziser Laserspektroskopie gehören dazu auch nichtlineare Multiphotonen-Mikroskope für die hochauflösende biologische und medizinische Bildgebung, die Erzeugung photonischer Mikrowellen für Kommunikations- und Radarsysteme sowie die sub-Femtosekunden-Synchronisation von Messgeräten an Teilchenbeschleunigern und Freie-Elektronen-Lasern.

Mit modengekoppelten Lasern lassen sich Laserpulse rauscharm und stabil erzeugen. In der einfachsten Form besteht ein Laser aus einem optischen Resonator, der sich aus zwei Spiegeln mit den Reflektivitäten $R = 1$ und $R < 1$ zusammensetzt, einem aktiven Verstärkungsmedium, einer Pumpquelle und einem sättigbaren Absorber (**Abb. 1a**). Das energetisch angeregte Verstärkungsmedium emittiert Photonen bestimmter Wellenlängen. Die optische Rückkopplung des Resonators sorgt für eine kohärente Verstärkung des so entstehenden Laserfeldes.

Im optischen Resonator bilden nur elektromagnetische Wellen mit wohldefinierten Wellenlängen eine stehende Welle zwischen den Endspiegeln. Die Wellenlängen λ dieser longitudinalen Resonatormoden ergeben sich als ganzzahlige Vielfache der doppelten optischen Resonatorlänge L_{opt} : $2 L_{\text{opt}} = N \cdot \lambda$ mit $N = 1, 2, 3, \dots$. In typischen aktiven Materialien mit Verstärkungsbreiten von 10 bis 200 nm, wie Titan:Saphir-Kristallen oder Erbium/Ytterbium-dotierten Gläsern, schwingen Millionen von Moden gleichzeitig im Resonator.

Ohne weiteres Eingreifen etablieren sich diese Moden unabhängig voneinander mit einer ungeordneten Phasenbeziehung; spektrales Lochbrennen im Verstärkermedium, Umwelteinflüsse und mechanische Störquellen verändern die Phasenlage ständig. Für einen modengekoppelten Laser gilt es daher, einen Zustand konstruktiver Interferenz zwischen diesen Moden mithilfe eines sättigbaren Absorbers zu stabilisieren. Diese optischen Elemente reduzieren optische Verluste bei zunehmender optischer Intensität durch ihre intrinsische Dynamik. Oft basieren sie auf Halbleiterkomponenten mit sättigbarer Reflexion oder auf nichtlinearen Interferometern mit verstärkter Transmission.

Interferieren einige longitudinale Moden zufällig konstruktiv, bilden sie kurzzeitig einen Puls mit einer Intensität über dem Mittelwert des Innenfeldes im Resonator. Durch

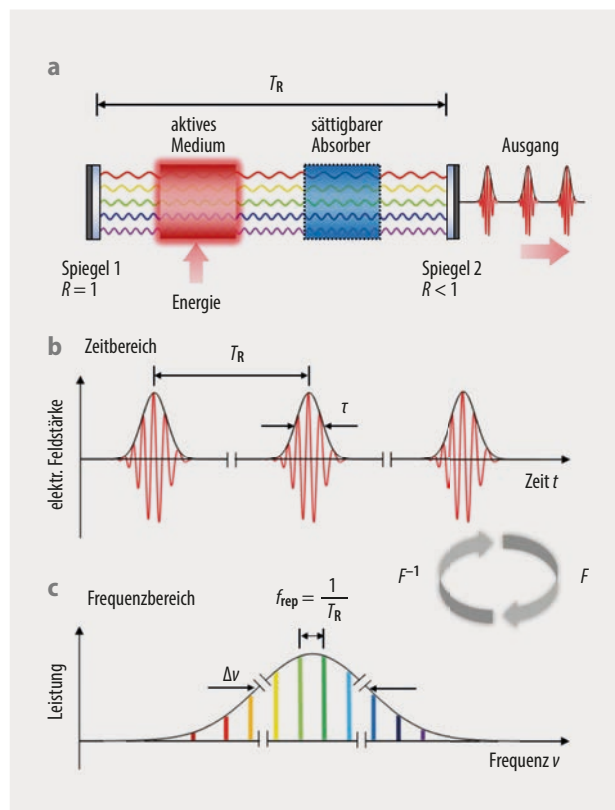


Abb. 1 Ein modengekoppelter Laser mit linearem Resonator (a) emittiert gepulste Signale (b) mit ausgesuchten Frequenzen (c).

die höhere Intensität kommt es pro Umlauf zu weniger Verlusten, sodass sich der Puls in hunderten Umläufen im Resonator immer weiter verstärkt. Dabei tragen immer mehr Moden zu dem entstehenden Zustand konstruktiver Interferenz bei, während gleichzeitig das „chaotische“ Hintergrundfeld aufgrund der Energieerhaltung im Resonator abnimmt. Im Gleichgewicht der Pulsformung entsteht jedes Mal, wenn der Endspiegel des Resonators mit $R < 1$ den Puls reflektiert, eine identische Kopie, die der teilreflektierende Spiegel des Resonators emittiert. Das Ergebnis ist eine Folge optischer Pulse, getrennt durch die Resonator-Umlaufzeit T_R (**Abb. 1b**). Gleichzeitig entspricht der Pulszug einem Kamm optischer Frequenzen: Die Wiederholrate $f_{\text{rep}} = 1/T_R$ trennt diese longitudinalen Moden voneinander (**Abb. 1c**).

Idealerweise besitzen die so erzeugten Pulszüge perfekt stabile Ausgangseigenschaften hinsichtlich mittlerer Intensität, optischer Phase, Zentralfrequenz und zeitlichem Abstand aufeinanderfolgender Pulse. In der Realität füh-

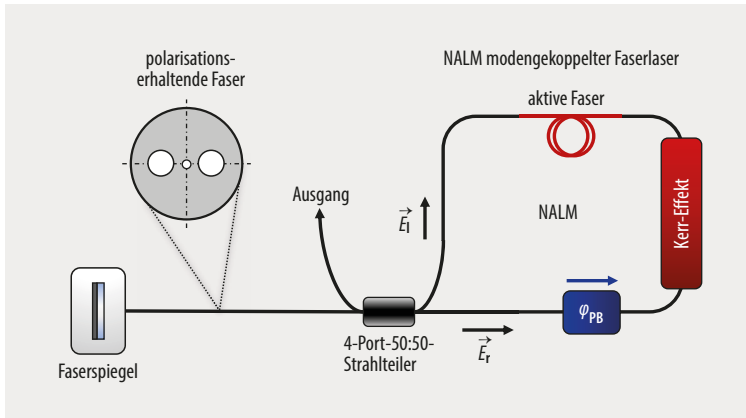


Abb. 2 Ein modengekoppelter Faserlaser auf Basis eines nichtlinearen, faser-optischen Interferometers (NALM) erzeugt rauscharme Pulszüge.

ren technische oder umweltbedingte Einflüsse sowie Beschränkungen durch die quantenmechanische Natur des Lichts unvermeidlich zu gewissen Fluktuationen. Das „Rauschen“ elektromagnetischer Felder bzw. hier optischer Pulse schränkt viele Anwendungen grundlegend ein. Beispielsweise verstärkt die nichtlineare Signalgenerierung im Probenmaterial selbst kleinste Intensitätsschwankungen bei der Multiphotonen-Mikroskopie für die hochauflösende Bildgebung in Biologie und Lebenswissenschaften [1]. Das beeinträchtigt die Auflösung des Geräts und das Signal-Rausch-Verhältnis des Bildes stark.

Das erklärt die Anstrengungen, hochstabile Kurzpuls-laser mit geringem intrinsischen Rauschen zu entwickeln. Als besonders vorteilhaft haben sich vollständig faserintegrierte optische Komponenten erwiesen. Im Vergleich zu Festkörperlasern, bei denen das Laserlicht überwiegend als Freiraumstrahl propagiert, bleiben solche Lasersysteme komplett intrinsisch gegenüber Umwelteinflüssen und mechanischen Störungen abgeschirmt. Moderne Faserlaser lassen sich vollständig aus Komponenten der Telekommunikation konstruieren. Ihre Fluktuationseigenschaften entsprechen dem neusten Stand der Technik, kombiniert mit bemerkenswerter Robustheit, hoher Strahlqualität und effektiver Wärmeableitung. Zusätzlich ermöglicht die hohe Energiedichte in der Faser viele nichtlineare Licht-Materie-Wechselwirkungen, zum Beispiel Selbstphasenmodulation basierend auf dem optischen Kerr-Effekt [2]. Dabei moduliert der intensive Laserpuls seine eigene optische Phase, weil der Brechungsindex der Faser von der Intensität abhängt. Diese intrinsische Nichtlinearität bietet vielen Anwendungen einen exotischen „Werkzeugkasten“ und ermöglicht zum Beispiel die Konstruktion nichtlinearer Faserinterferometer als leistungsfähige sättigbare Absorber. Insbesondere Faserlaser, die mit interferometrischen Verstärkerschleifen (Nonlinear Amplifying Loop Mirror, NALM) modengekoppelt sind [3], erreichen ein sehr niedriges Rauschen und sind außergewöhnlich stabil gegen externe Störfaktoren, wie mechanische Vibrationen oder Temperaturschwankungen. NALM-Laser eignen sich daher ideal für hochmoderne Laseranwendungen, wie die kürzlich demonstrierte, hochpräzise Frequenzkamm-Mess-technik im Weltraum [4].

Ein solcher Laser besteht im einfachsten Fall aus einer interferometrischen Verstärkerschleife als einer der Endspiegel im Resonator, einem 4-Port-50:50-Strahlteiler und einem zweiten, fasergekoppelten Spiegel, um den Resonator zu schließen (**Abb. 2**). Das Verstärkungsmedium ist eine aktive, seltenerd-dotierte Faser, die optisch von einer Laserdiode gepumpt wird. Bei jedem Umlauf im Resonator erzeugt der Strahlteiler zwei gegenläufige Pulse, die in der NALM-Faserschleife propagieren. Durch eine asymmetrische Platzierung der aktiven Faser wird der im Uhrzeigersinn propagierende Puls $\vec{E}_l$ früher verstärkt und legt eine größere Strecke im NALM mit höherer Spitzenleistung zurück als der entgegengesetzt propagierende Puls $\vec{E}_r$. Der optische Kerr-Effekt und die Selbstphasenmodulation in der Faser führen zu einer intensitätsabhängigen nichtlinearen Phasendifferenz zwischen beiden Pulsen. Nach dem Umlauf im NALM interferieren beide Pulse am Strahlteiler. Dann bestimmt die akkumulierte Phasendifferenz durch intensitätsabhängige Interferenz die Energieverteilung des rekombinierten Feldes zu den Strahlteilerausgängen. Dabei dient einer der Ausgänge als Laserausgang, während der andere den optischen Resonator schließt. Die resultierende intensitätsabhängige Transmission am Strahlteiler charakterisiert den NALM-Laser. Diese Transmission lässt sich durch einen richtungsabhängigen Phasenversatz φ_{PB} sehr flexibel einstellen – um etwa modengekoppelte Zustände optimal zu initialisieren und zu stabilisieren. Die intrinsische Kopplung der intensitätsabhängigen Phasendifferenz mit der Transmission des Faserinterferometers ermöglicht nicht nur eine Verwendung als sättigbarer Absorber, sondern auch die starke Unterdrückung des Intensitätsrauschens. Mit einem definierten Mittelwert der Pulsintensität im Resonator eines NALM-Lasers und dem proportionalen Mittelwert $\overline{\Delta\varphi_{nl}}$ lassen sich kleine Fluktuationen um diese Werte für geeignete Arbeitspunkte stark unterdrücken.

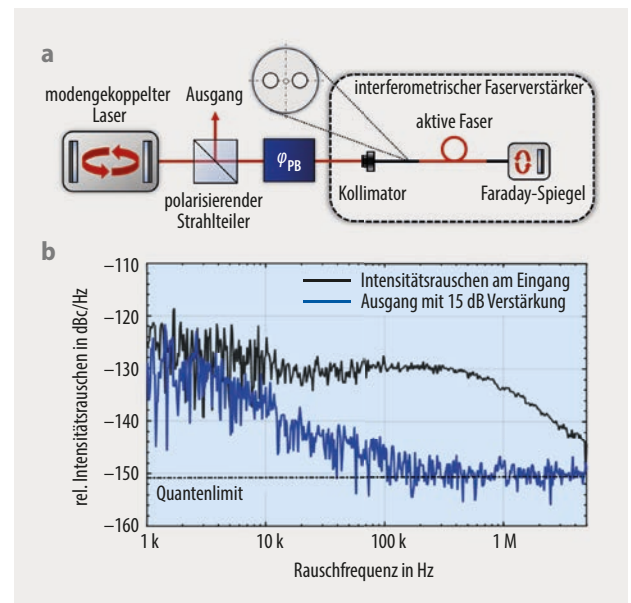


Abb. 3 Ein interferometrischer Faserverstärker (a) verstärkt das Signal und unterdrückt das Intensitätsrauschen. Das relative Intensitäts-Rauschspektrum am Ein- (b, schwarz) und Ausgang (blau) zeigt, dass so das Quantenlimit (Strich-Punkt-Linie) erreichbar ist.

Das ermöglicht es, Faserlaser im hochstabilen Zustand mit gleichzeitig guter intrinsischer Rauschunterdrückung modenzukoppeln – ein signifikanter Vorteil gegenüber anderen Lasersystemen.

Die Transmission des nichtlinearen Interferometers ist somit abstimmbare; in Kombination mit der effizienten Intensitätsrauschunterdrückung eröffnet sich die Möglichkeit, neuartige Geräte für die hocheffiziente Rauschunterdrückung von Lasern zu konstruieren. Ein Beispiel sind interferometrische nichtlineare Faserverstärker: Sie können Signale deutlich verstärken und gleichzeitig das Intensitätsrauschen am Eingang bis zum Quantenlimit unterdrücken [5]. Dabei unterdrückt die Nichtlinearität die Rauschverstärkung durch verstärkte spontane Emission, eine quantenmechanische Eigenschaft linearer Verstärker. Das fundamentale Schrotrauschen ist eine Folge der grundlegenden Varianz elektromagnetischer Felder mit Poissonscher Photonstatistik. Das Faserinterferometer besitzt eine lineare Struktur (**Abb. 3a**), wobei die nichtlineare Phasendifferenz zwischen orthogonalen Polarisationsmoden im Faserverstärker akkumuliert wird. Selbst bei mehr als 15 dB kohärenter Signalverstärkung am Ausgang lassen sich mehr als 20 dB quantenlimitierte Rauschunterdrückung erreichen mithilfe einer angepassten Transmissionskurve, die beim Einstellen des Phasenversatzes φ_{PB} durch den nichtlinearen Mechanismus entsteht (**Abb. 3b**). Diese Eigenschaft zahlt sich für viele Laseranwendungen aus, zum Beispiel als letztes Glied in mehrstufigen Hochleistungsverstärkern oder um Auflösung und Signal-Rausch-Verhältnis in nichtlinearen Mikroskopen zu optimieren.

Nichtlineare, faserintegrierte Lasersysteme kombinieren eine intrinsische Robustheit gegenüber Umwelt- und technischen Störungen mit vielen nichtlinearen Dynamiken

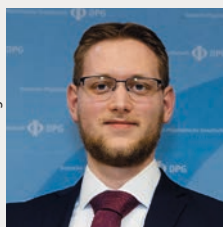
und Mechanismen. Diese erlauben es, hochleistungsfähige modengekoppelte Laser und Verstärkersysteme für die nächste Generation hochmoderner Anwendungen zu konstruieren. Insbesondere die Anwendung nichtlinearer Faserinterferometer zur starken Intensitätsrauschunterdrückung liefert ultrastabile Laserarbeitspunkte.

Literatur

- [1] C. A. Casacio et al., *Nature* **594**, 201 (2021)
- [2] R. H. Stolen und C. Lin, *Phys. Rev. A* **17**, 1448 (1978)
- [3] M. E. Fermann et al., *Opt. Lett.* **15**, 752 (1990)
- [4] M. Lezius et al., *Optica* **3**, 1381 (2016)
- [5] M. Edelmann et al., *Opt. Lett.* **46**, 3344 (2021)

Der Autor

DPG / Jürgen Loesel 2023



Marvin Edelmann absolvierte nach dem Bachelor in Physical Engineering an der HAWK Göttingen das Masterstudium „Engineering Physics“ an der U Oldenburg und der Hochschule Emden/Leer. Derzeit promoviert er am DESY und der U Hamburg über Ultrakurzpuls-faserlaser für die biologische Bildgebung.

Marvin Edelmann, M.Sc., Center for Free-Electron Laser Science CFEL, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Notkestr. 85, 22607 Hamburg und Department of Physics, Universität Hamburg, Jungiusstr. 9, 20355 Hamburg

Wiley – die Grundlage für berufliche Weiterentwicklung

Das Buch von Eva-Maria Kraus zeigt auf, wie Führungskräfte ein strategisches Netzwerk aufbauen. Krisen wie die Corona-Pandemie haben gezeigt, dass wir nur gemeinsam im Miteinander zu langfristig erfolgreichen Lösungen kommen können und Unternehmen gerüstet für die Zukunft sind.

www.wiley-business.de



Die Zukunft des
globalen Business
hat begonnen



Kraus, E.-M.

Zusammen führen

Wie vernetztes Arbeiten Unternehmen langfristig zum Erfolg führt

2021. 272 Seiten. Gebunden.
€ 24,99 • 978-3-527-51054-2

WILEY