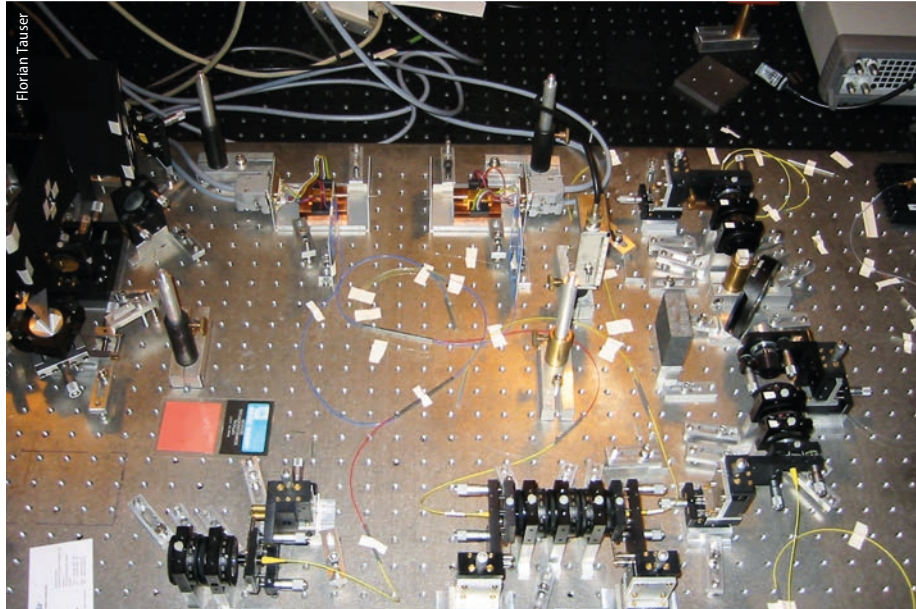


Gewinnbringende Kooperation

Der DPG-Technologietransferpreis 2023 würdigt den Transfer von Femtosekunden-Fasertechnologie von der Universität Konstanz zur TOPTICA Photonics AG.

Wilhelm Kaenders, Alfred Leitenstorfer und Florian Tauser



Dieser Laboraufbau aus dem Jahr 2003 diente zur erstmaligen selbst-referenzierten Detektion der Phasenschlupffrequenz f_{CEO} eines Frequenzkamm aus einem modengekoppelten Faserlaser [1].

Motiviert durch die erste Labor-demonstration eines selbst-referenzierten Femtosekunden-Frequenzkamms mit einem Faserlaser [1] begann im Jahr 2004 eine direkte Kooperation zwischen der TOPTICA Photonics AG und dem Lehrstuhl für Ultrakurzzeitphysik und Photonik von Alfred Leitenstorfer an der Universität Konstanz. Die Technologie ist inzwischen in drei Patentfamilien

rechtlich geschützt. Florian Tauser war der Doktorand am ersten Experiment, das noch an der TU München stattfand. Er wechselte nach seiner Promotion als Mitarbeiter zur TOPTICA Photonics AG und baute dort eine eigene Gruppe zur Femtosekunden-Faserlasertechnologie mit auf.

Diese Kooperation beinhaltet einmal die Grundlagenforschung, darüber hinaus aber auch den anschließenden Technologietransfer, regelmäßig unterstützt durch den Wechsel weiterer Absolventinnen und Absolventen der Universität Konstanz zu TOPTICA. Von den zunächst transferierten Konzepten für Femtosekunden-Lasersysteme stellt die nichtlineare Frequenzkonversion in hochgradig nichtlinearen Glasfasern eine Schlüsselkomponente dar. Sie erlaubt es, kontinuierlich abstimmbare und extrem kurze Lichtimpulse mit Dauern von wenigen Femtosekunden im gesamten nahinfraroten und sichtbaren Spektralbereich zu erzeugen [2]. Dieses Konzept bildet die Grundlage für ein breites Spektrum an Anwendungen, beispielsweise in der Präzisions-

Messtechnik, Spektroskopie und Mikroskopie.

Im Zentrum der Würdigung durch den DPG-Technologietransferpreis steht der Durchbruch zur Entwicklung eines passiv phasenstarrten Frequenzkamms aus der zweiten Phase der Kooperation [3]: Das Emissionsspektrum modengekoppelter Laser besteht aus äquidistanten Linien im Abstand der Impulswiederholrate f_{rep} , die aufgrund des Unterschieds zwischen Phasen- und Gruppenumlaufzeit im Resonator relativ zum Ursprung bei $f = 0$ um die Phasenschlupffrequenz f_{CEO} versetzt sind. Während sich f_{rep} denkbar einfach mittels einer schnellen Photodiode im Impulszug kontrollieren lässt, schuf die erste selbstreferenzierte Messung von f_{CEO} die bis dahin fehlende Grundlage, um die in einem Frequenzkamm auftretenden Lichtfrequenzen vollständig zu bestimmen. Diese Errungenschaft wurde unter anderem mit dem Physik-Nobelpreis 2005 an John L. Hall und Theodor W. Hänsch gewürdigt. Seitdem erlaubte es die präzise Kenntnis von f_{rep} und f_{CEO} , optische

DPG-Technologietransferpreis

Der DPG-Technologietransferpreis 2023 geht gemeinschaftlich an das Centrum für Angewandte Photonik der Universität Konstanz, an den Lehrstuhl Ultrakurzzeitphysik und Photonik der Uni Konstanz sowie die TOPTICA Photonics AG, für die Anwendung von wissenschaftlichen Erkenntnissen auf dem Gebiet der Femtosekunden-Faserlaser, insbesondere eines passiv phasenstarrten Frequenzkamms basierend auf Bildung einer Differenzfrequenz und erneuter Verstärkung, und deren erfolgreichen Transfer in die industrielle Anwendung.“



Frequenzen durch elektronisches Zählen im Radiofrequenzbereich hochgenau zu ermitteln.

Hierauf aufbauend gelang es uns im Jahr 2011 unter Ausnutzung eines Differenzfrequenz-Mischprozesses innerhalb eines sehr breiten Frequenzkamms, die Phasenschlupffrequenz f_{CEO} auf optischem Wege zu eliminieren [3]. Ein derartiger „Differenzkamm“ führt die Messung einer beliebigen optischen Frequenz einzig auf die technisch trivial zugängliche Repetitionsrate des Impulszuges zurück. Damit entfällt die Notwendigkeit, f_{CEO} zu kennen und aktiv zu kontrollieren.

Die Markteinführung des ersten Differenzfrequenzkamms durch TOPTICA erfolgte 2016 nach intensiver Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Ultrakurzzeitphysik und Photonik der Universität Konstanz sowie der Entwicklung einer für die Serienfertigung geeigneten technischen Plattform. Wie oft bei derartigen Innovationen galt es allerdings zunächst, die Skepsis der Anwender zu überwinden, die an zwar erheblich aufwändigere, aber etablierte technische Lösungen gewöhnt waren. Auch bei dieser Problematik halfen die weiterführenden Grundlagenstudien an der Universität. So gelang es beispielsweise, eine

vollständig stabilisierte Version des Differenzkamms [4] zu realisieren sowie dessen Rauscheigenschaften zu analysieren und quantitativ zu verstehen [5]. Die relativen Abweichungen der Phasenschlupffrequenz von 0 Hz im Differenzkamm lagen unterhalb von 10^{-21} – und zwar in normaler Laborumgebung ohne aufwändige Stabilisierung [6]. Diese Erkenntnis half nicht nur, das kommerzielle Produkt von TOPTICA weiter zu verbessern, sondern sie förderte auch das Vertrauen sowie die Nachfrage potenzieller Anwenderinnen und Anwender.

In jüngster Zeit verbesserte sich das gemeinsame Verständnis des Phasenrauschens dieser Systeme. Daraus resultierte ein faserbasierter Frequenzkamm, dessen freilaufende Linienbreite unterhalb von 5 kHz liegt – beginnend bei der Radiofrequenz f_{CEO} bis hin zum oberen Ende der optischen Emission bei etwa 300 THz [7]. Die entsprechende Oszillatortechnologie wird derzeit in den Differenzkamm integriert.

Insgesamt erwirtschaften heute, 25 Jahre nach Gründung von TOPTICA, rund 480 Mitarbeitende weltweit einen Jahresumsatz von über 100 Millionen Euro. Ein stark wachsender Anteil entfällt auf Produkte, die mit der Konstanzer Femtosekun-

den-Fasertechnologie verknüpft sind. Der Differenzkamm gilt in Bezug auf Qualität und technische Präzision als ein Standardprodukt. Der mit dieser Premiumkomponente erzielte Umsatz hat sich in den letzten vier Jahren versiebenfacht. Angesichts der zunehmenden Etablierung unserer Technologie in der Anwendung gehen wir von einem weiteren, kontinuierlichen Wachstum in den nächsten Jahren aus.

- [1] F. Tauser, A. Leitenstorfer und W. Zinth, *Opt. Express* **11**, 594 (2003)
- [2] D. Brida et al., *Laser Photonics Rev.* **8**, 409 (2014)
- [3] G. Krauss et al., *Opt. Lett.* **36**, 540 (2011)
- [4] D. Fehrenbacher et al., *Optica* **2**, 917 (2015)
- [5] A. Lielh et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 203902 (2019)
- [6] A. Lielh et al., *Phys. Rev. A* **101**, 023801 (2020)
- [7] S. R. Hutter et al., *Laser Photonics Rev.* **17**, 2200907 (2023)

Die Autoren

Dr. Wilhelm Kaenders und **Dr. Florian Tauser**, TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, Gräfelfing bei München

Prof. Dr. Alfred Leitenstorfer, Fachbereich Physik und Centrum für Angewandte Photonik, Universität Konstanz, Universitätsstraße 10, 78464 Konstanz



Das kommerziell erhältliche Frequenzkamm-System lässt sich optional erweitern, um den Frequenzkamm mit einem cw-Diodenlaser zu überlagern. Weitere Komponenten sind die Beat-Detektion und Lock-Elektronik.