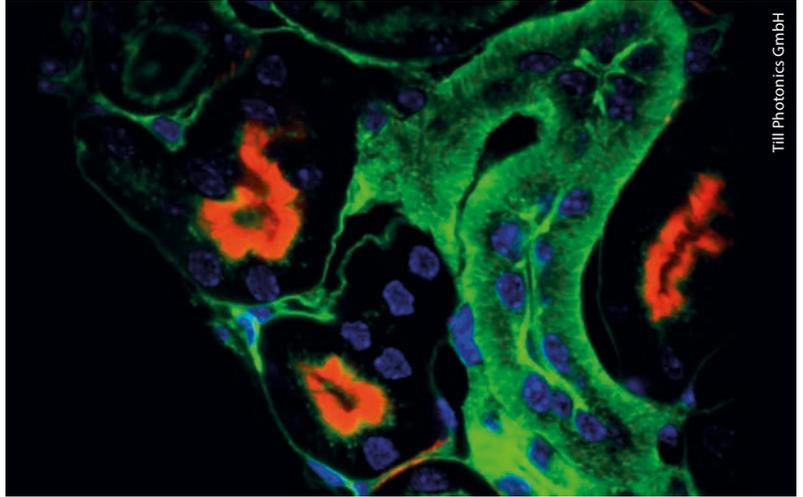


Bedarfoptimierte Lasersysteme

Integrierte Multi-Farben-Laserlösungen für Quantenoptik und Biophotonik

Konstantin Birngruber und Stephan Falke

Die Weiterentwicklung von Lasersystemen dient nicht nur dazu, Parameter des Laserlichts wie die Polarisations- und Leistungsstabilität oder die Linienbreite zu verbessern. Ein wichtiges Ziel besteht darin, weichere Parameter zu optimieren, beispielsweise die Robustheit zu erhöhen, die Lebensdauer zu verlängern oder die Bedienung zu vereinfachen. Gerade dieser Fortschritt ist es, der neue Einsatzgebiete für Laser bzw. Geräte mit integrierten Lasern erschließt. Der Schritt von einem Experiment im Labor hin zum regulären Einsatz eines neuen Konzepts im Alltag benötigt zuverlässige, langlebige und integrierbare Lasersysteme.



Die Spinning Disk-Aufnahme einer Mäuse-Nierensektion ist ein Anwendungsbeispiel aus der Mikroskopie. Zu sehen sind das Cytoskelett (Alexa 568 Fluorophor, angeregt bei 561 nm), DNA/Zellkern (DAPI-Fluorophor angeregt bei 405 nm) und die Endosomen (Alexa 488 Fluorophor, angeregt bei 488 nm).

phor, angeregt bei 561 nm), DNA/Zellkern (DAPI-Fluorophor angeregt bei 405 nm) und die Endosomen (Alexa 488 Fluorophor, angeregt bei 488 nm).

+) Förderprojekt
www.opticlock.de

Viele wissenschaftliche Experimente erfordern heutzutage mehrere Wellenlängen. Beispielsweise werden in Experimenten mit lasergekühlten Atomen oder Ionen neben den Kühllasern resonante Laserfelder zum Ionisieren, für optische Fallen, zum Rückpumpen, zum kontrollierten Treiben und Einstellen von Quantenzuständen und vielem mehr verwendet. Aus der Resonanzbedingung ergibt sich ein Bedarf an unterschiedlichen, hochpräzisen Laserwellenlängen. So lassen sich zwei Übergänge in Ytterbium-Ionen, die als Referenzen für optische Uhren dienen, von Lasern getrieben untersuchen. Ein Quadrupol-Übergang (E2, 436 nm) ist mit Linienbreiten von wenigen Hertz zu beobachten.^{+) Die aufgelöste Linienbreite des schwächeren Oktupol-Übergangs (E3, 467 nm) ist selbst mit den besten Lasern durch deren technisches Rauschen limitiert. Für diese Experimente ist eine Laserkühlung mit Licht einer Wellenlänge von 369 nm ebenso essenziell wie das Herausheben der Ionen aus den}

oberen Uhrenübergängen durch Rückpump-Laser mit Wellenlängen von 935 nm und 760 nm.

Auch biologische und chemische Experimente und Messverfahren basieren auf der Verwendung mehrerer Laserwellenlängen. In der Medizin und der zellbiologischen Grundlagenforschung gehören laserbasierte Flusszytometer zu einem der Standardwerkzeuge, um zum Beispiel Blutproben untersuchen und quantitativ bewerten zu können. Hier finden diverse Laserwellenlängen Einsatz, um verschiedene Marker-Fluorophore zu aktivieren. Die Fluoreszenz-

Mikroskopie, ein weiteres typisches Anwendungsfeld in der biologischen Forschung, profitiert von der Vielzahl an Fluorophoren und fluoreszierenden Proteinen, welche durch die verfügbaren Laserwellenlängen zugänglich sind.

TOPTICA verfügt über 20-jährige Erfahrung bei der Entwicklung, Fertigung und Installation von Lasersystemen. Diese Expertise hat die Entwicklung von hoch integrierten Multi-Farben-Laserlösungen erfolgreich vorangetrieben. Diese innovativen Produkte verringern beim Kunden den hohen zeitlichen Aufwand des Aufbaus und der Wartung eigener Strahlenführungssysteme.

Im vorliegenden Artikel werden zwei Systeme vorgestellt, die Laserlicht aus Modulen per Glasfaser zur Verfügung stellen. Die unterschiedlichen Anforderungen der Anwender an das Laserlicht führten zur Entwicklung zweier Produkte: zum 19 Zoll-Sub-Rack mit durchstimmbaren Diodenlasern (DLC MDL pro, MDL = Multi Diode La-



Abb. 1 Das DLC MDL pro (mit vier Lasermodulen) benötigt für den Betrieb keinen optischen Tisch.

Dipl.-Ing. (FH) Konstantin Birngruber und Dr. Stephan Falke, TOPTICA Photonics AG

ser System), welche in vielen Quantenoptikexperimenten eingesetzt und integriert werden, und zu einer hochintegrierten Laserlichtquelle für die Biophotonik und Mikroskopie (iChrome CLE, CLE = Compact Laser Engine).

DLC MDL pro

Die Verfügbarkeit von Laserdioden bei relevanten Wellenlängen hat die Quantenoptik in den vergangenen gut zwanzig Jahren stark geprägt. Diodenlaser, die diese Laserdioden mittels eines optischen Gitters zu spektroskopischen Werkzeugen aufwerten, sind z. B. allgegenwärtig in der Laserkühlung von Atomen und Ionen. Oftmals sind mehrere Diodenlaser im Einsatz, und so manch ein optischer Tisch verliert allein durch den Aufbau der Laser bereits signifikant an Fläche. Der fortschreitende Ausbau von optischen Laboraufbauten sorgte für ein Interesse daran, diese Laser auf günstigere Areale, abseits der optischen Tische zu verlagern. Zudem ist es immer mehr das Ziel, transportable Messinstrumente zu bauen. Technologisch sind Diodenlaser durch patentierte mechanische Aufbauten der Laserresonatoren und durch verbesserte Steuer- und Überwachungselektronik so weit vorangeschritten, dass ein optischer Tisch für ihren Betrieb nicht mehr essenziell ist.

Aus dieser Lage heraus wurde der DLC MDL pro entwickelt (Abb. 1), in dem bis zu vier Diodenlaser in einem 19 Zoll Sub-Rack aufgebaut sind: Innerhalb von nur zwei Höheneinheiten sind beliebige Kombinationen von bis zu vier External-Cavity Diode Laser (ECDL, bekannt als DL pro) oder DFB bzw. DBR Laserdioden in Betrieb. Eine Standardkonfiguration für Experimente mit Ytterbiumionen beinhaltet Laser bei 369 nm (Laserkühlung), 399 nm (Ionisierung), 935 nm und 760 nm (beides Rückpumpen). Für jeden einzelnen Laser gibt es eine Single Mode-Glasfaser, die das Licht entweder auf einen – nun zwischenzeitlich vermeintlich leereren – optischen

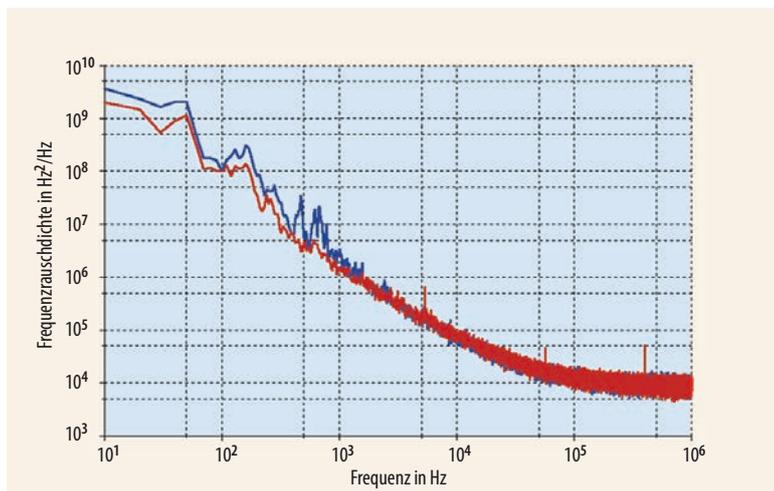


Abb. 2 Die Frequenzrauschdichte eines DLC MDL pro eingebaut in ein Rack mit einem luftgekühlten PC (blau) unterscheidet sich nur bei niedrigen Frequenzen von der eines DL pro auf einem

optischen Tisch (rot). Das erhöhte Rauschen bei niedrigen Frequenzen lässt sich mit geringem Aufwand herausregeln.

Tisch bringt oder das Licht direkt in ein transportabel aufgebautes Experiment einspeist. Somit bleibt die Flexibilität bezüglich der Wellenlängen bestehen, um die Vielfalt der Experimente der Quantenoptik abzudecken. Gleichzeitig sind die Anforderungen bezüglich der Laserlinienbreiten (MHz oder niedriger) und Durchstimbarkeit (benötigt, z. B. um Laser in der Frequenz zu stabilisieren) erfüllt.

Die Leistungsfähigkeit dieser ECDL zeigt sich am Frequenzrauschspektrum (Abb. 2) und bei Klimakammertests (Abb. 3). Das Frequenzrauschspektrum eines Lasers auf einem optischen Tisch im Vergleich zu einem Laser in

einem DLC MDL ist nur bei niedrigen Frequenzen besser. Dagegen zeigen Klimakammertests der neuen, Rack-montierten Laser, dass diese auch bei Temperaturvariationen von 10 Grad immer noch ein quantenoptisches Werkzeug allererster Güte sind. Selbst diese Extrembedingungen verursachen keine Modensprünge, welche eine plötzliche, starke Veränderung der Laserwellenlänge mit sich bringen. Auch hier zeigen sich die Vorteile der vor fünf Jahren eingeführten digitalen Lasersteuerelektronik DLC pro, die zudem eine Remote-Steuerung via Netzwerk ermöglicht, etwa unter Nutzung des TOPTICA Python-Laser SDK.⁸⁾

⁸⁾ www.toptica.com/laser-sdk

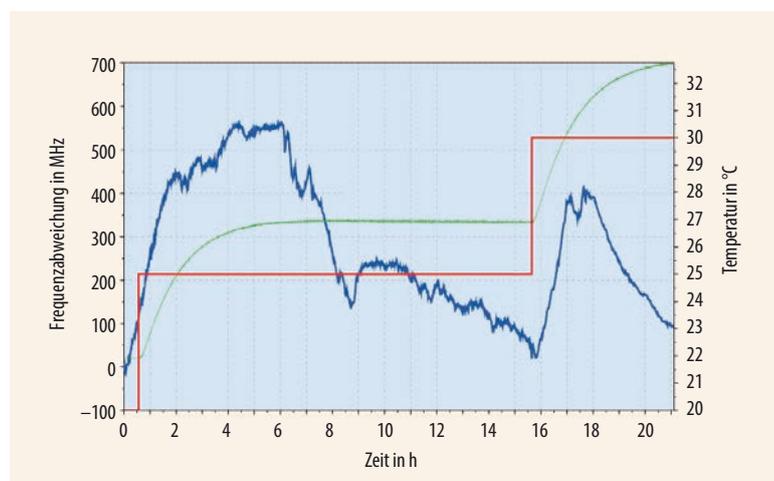


Abb. 3 Die Frequenz eines DLC MDL pro Lasers (blau), der zwei Temperaturschritten von 5 °C ausgesetzt wurde (rot), zeigt lediglich Änderungen der Laserfrequenz

von 550 MHz. Die Temperatur der Basisplatte (grüne Kurve) folgt den Temperatursprüngen.



Abb. 4 Die iChrome CLE ist besonders für Anwendungen in der Biophotonik konzipiert.

Unterschiedliche Anforderungen iChrome CLE

Während im DLC MLD pro die flexible Auswahl der Wellenlängen sowie deren Einstellbarkeit im Produktdesign berücksichtigt wurden, haben sich in der Mikroskopie schon einige Standard-Wellenlängen durchgesetzt. Mit der iChrome CLE gelang es, unter diesen Rahmenbedingungen ein Standardmodul zu entwickeln und zu etablieren, welches die Grundbedürfnisse in weiten Teilen der Biophotonik abdeckt (Abb. 4). Diese Standardisierung ermöglicht es, das Produktdesign noch weiter auf Kompaktheit und Robustheit auszulegen. Ein zweiter Effekt der Standardisierung ist, dass sich Produktionsabläufe optimieren und verschlanken lassen, um höchste Qualität zu attraktiven Konditionen anbieten zu können.

Mit der Multi-Farb-Laserquelle iChrome CLE steht ein dediziertes Gerät für die Mikroskopie und Biophotonik zur Verfügung (Abb. 4). Die Einsatzbereiche sind wie beim DLC MDL pro zwar ebenfalls im wissenschaftlichen Umfeld zu suchen, zusätzlich jedoch ist bei der iChrome CLE die „Industrialisierung“ deutlich weiter fortgeschritten. So bedienen einige große Firmen bereits den Großteil des wissenschaftlichen Einzelkundenmarktes, wodurch sich ein Konkurrenz- und Preiskampf entwickelt hat. Eine adäquate Laser-Lichtquelle für diesen Markt muss daher sowohl die preislichen Vorgaben als auch die entscheidenden technischen Spezifikationen erfüllen.

Um die teilweise gegenläufigen Anforderungen aus Preis, Stabilität,

Langlebigkeit und herausragender Modulierbarkeit zu erreichen, wurden für die iChrome CLE neue Technologien entwickelt.

Die konstant steigenden Scan- und Bildgebungsgeschwindigkeiten in der laserbasierten Mikroskopie benötigen Laserquellen, die sich sehr gut modulieren lassen. Im Gegenzug sind die zur Modulation bisher verwendeten Akusto-Optischen Modulatoren (AOM oder AOTF) ein großer Kostentreiber. Können diese Komponenten entfallen, reduziert sich der Systempreis. Für die typischerweise benötigten „Standard“ Wellenlängen von 405, 488, 561 und 640 nm ergibt sich jedoch das Problem, dass 561 nm nicht durch eine Laserdiode abzudecken ist. Laserdioden sind inhärent gut modulierbar. Die bei 561 nm verwendeten DPSS (Diode Pumped Solid State) oder OPS (Optically Pumped Semiconductor) Laser sind jedoch nur in sehr begrenztem Maße modulierbar. Bisher war in diesem Fall also weiterhin ein externer Modulator nötig. TOPTICA hat als Lösung den so genannten FDDL (Frequency Doubled Diode Laser) entwickelt, welcher speziell auf die für die Mikroskopie wichtigen Scanparameter (geringe Über- bzw. Unterschwingen bei gleichzeitig niedrigem Intensitätsrauschen) optimiert wurde.

Durch diesen Ansatz, basierend auf der Frequenzverdopplung von Laserlicht einer Wellenlänge von 1122 nm, ergibt sich ein weiterer Vorteil für die Lebensdauer der 561 nm-Laserlinie, da ein FDDL nur dann Licht emittiert, wenn es die Anwendung erfordert. Standard-Laserquellen mit kombiniertem AOM/AOTF müssen hingegen permanent Licht emittieren, welches anschließend durch den Modulator „an und aus“ geschaltet wird. Dadurch ergeben sich für diese Laserlinien sehr hohe Betriebsdauern, welche zu einem vorzeitigen „Ausbrennen“ bzw. einem Ausfall der Laserlinie führen.

In der Mikroskopie hat sich die Faserkopplung von Beleuchtungslasern als Standard durchgesetzt. Die Vorteile für die Anwendung liegen auf der Hand: Einerseits steht

Produktlinien im Vergleich		
	DLC MDL pro	iChrome CLE
Typische Anwendungen	Quantenoptik: Laserkühlen von Ionen oder Atomen	Biophotonik und Mikroskopie
Wellenlängen	Konfigurierbar, bis zu vier Wellenlängen im Bereich 369 nm bis 1625 nm	405, 488, 561 und 640 nm
Linienbreite / Kohärenzlänge	Typ. 100 kHz / ca. 1 km	~0,5 nm / < 1 mm
Durchstimmbarkeit	Grob-Tuning 2 – 100 nm, Fine-Tuning typ. 30 GHz	Vordefinierte Laserwellenlängen
Lichtanlieferung	Jedes Lasermodul eine SM/PM Faser mit FC/APC	Eine breitbandige SM/PM Faser für alle Wellenlängen
Steuerelektronik	Digital Diode Laser Controller DLC pro	Dedizierte, voll integrierte Elektronik
Bedienung	Touch Screen oder Ethernetverbindung: PC-GUI, TOPTICA Python Laser-SDK, Steuerbefehle	RS-232, Ethernet oder Analog-Digitales Interface, PC-GUI
Bauform	19 Zoll Subracks, 2 HE mit 1 oder 2 DLC pro á 3 HE	248 × 201 × 110 mm ³ (L × W × H)
Superhelden-Fähigkeit	Frequenzlocks	COOL ^{AC}

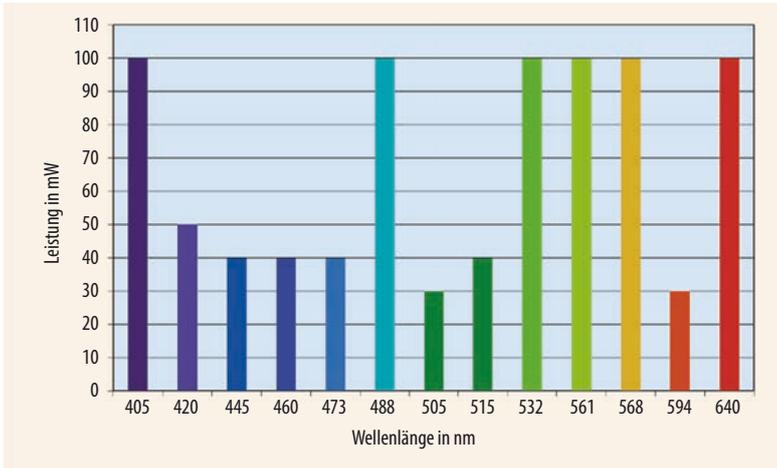


Abb. 5 Dies ist die Wellenlängen- und Leistungsauswahl für die gesamte iChrome xLE-Familie, die neben der

mit dem Faserstecker (typischerweise FC/APC oder FC/AFC) ein standardisiertes Interface zur Verfügung, andererseits bieten die verwendeten Single-Mode-Fasern die für viele Anwendungen benötigte nahezu perfekte Strahlqualität ($M^2 < 1,1$). Für den Laserhersteller bedeutet die Faserkopplung in Single-Mode-Fasern mit ihren Kerndurchmessern von ca. 4 μm (im sichtbaren Wellenlängenbereich) eine weitere Herausforderung.

Die Vorgabe ist somit, eine fasergekoppelte Laser-Lichtquelle für einen „industrieeähnlichen“ Einsatz zu schaffen. Um die adäquate Stabilität zu erreichen, wurde die komplette Laserkopf-Einheit sehr kompakt ausgeführt. Zusätzlich zur Stabilität durch den kompakten Aufbau ist sie als Ganzes temperaturstabilisiert, um auch bei Änderungen der Umgebungsbedingungen eine größtmögliche Stabilität zu gewährleisten. Nur durch diesen Ansatz, der den Effekt thermischer Ausdehnungen verhindert beziehungsweise minimiert, ist ein tatsächlich langzeitstabiles, fasergekoppeltes System herstellbar.

Da über die reine Stabilität im Betrieb hinaus auch die Justagefreiheit nach Transport und bei Installation des Gerätes gewünscht wird, ist in der iChrome CLE eine automatische Fasereinkopplung verbaut. Dieses COOL^{AC}-System (Constant Optical Output Level – Auto Calibration) kann über ein einfaches Kommando jede ein-

zelne Laserlinie vollautomatisch nachjustieren. Das bisher in der Biophotonik einzigartige Feature ermöglicht eine Integration, Installation und den Betrieb des Multi-Color-Lasers ohne jeglichen Benutzereingriff und gestaltet die gesamte Geräteserie zu einem wahren „Hands Off“-System.

Fazit

Die Entwicklung der beiden Produktlinien DLC MDL pro und iChrome CLE veranschaulicht, wie spezifische Anforderungen von Anwendergruppen die Produktauslegung beeinflussen. Während beim DLC MDL pro Flexibilität der Wellenlängenkonfiguration im Vordergrund stand, wurde für die iChrome CLE eine Standardkonfiguration gewählt, welche durch einen attraktiven Eintrittspreis einen breiteren wissenschaftlichen Einsatz ermöglicht. Die konstante Marktbeobachtung und Ermittlung der Bedürfnisse unserer Kunden werden auch weiterhin stets in die Entwicklung unserer Produkte einfließen.

FIBER OPTIC COMPONENTS AND FIBER COUPLED LASER SOURCES

polarization maintaining for wavelengths 360 – 1800 nm



POLARIZATION ANALYZER

Series SK010PA with Multiple Wavelength Ranges 375 – 1660 nm



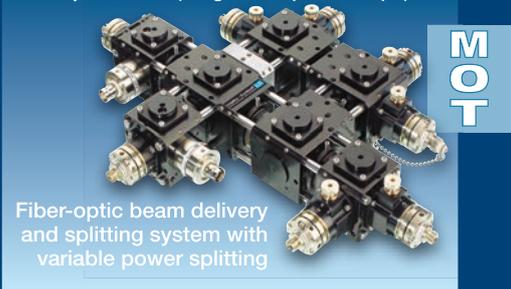
FIBER-COUPLED LOW COHERENCE LASER SOURCES 51NANO

with singlemode and polarization-maintaining fiber cables



FIBER PORT CLUSTERS

Used in quantum optics, e.g. for cooling and trapping experiments (Magneto-Optical Traps)



Visit us in Hall 1.0, Booth 1.A.02
06 – 08. November 2018
MESSE STUTTGART, GERMANY

BE VISIONARY

Schäfter + Kirchhoff

info@SukHamburg.de

www.SuKHamburg.com

Schäfter+Kirchhoff develop and manufacture laser sources, line scan camera systems and fiber optic products for worldwide distribution and use.