



Schlussbericht zum Vorhaben
**„Gleichgerichtetes Polarisationsmultiplexen von
Hochleistungsdiodenlasern“**

im Rahmen des Eurostars Projekts
E! 01QE1650B HIP-Laser
„Hochleistungs-Lasersysteme aus kantenemittierenden Diodenlasern“

Volker Raab, Corinna Raab

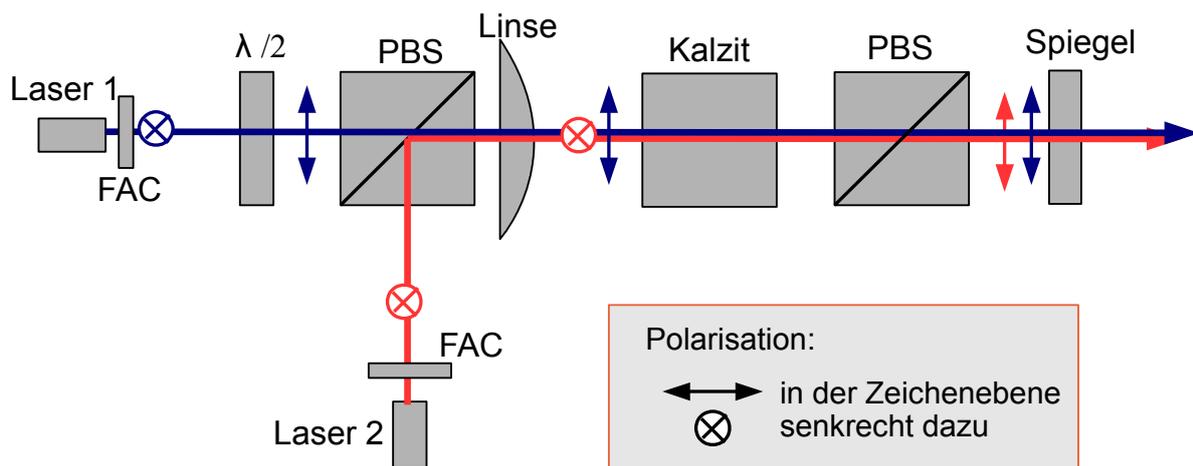
Raab-Photonik GmbH
Amundsenstr. 10
D-14469 Potsdam

I. Kurze Darstellung zu

Aufgabenstellung

Ziel des Projekts war die deutliche Erhöhung der Leistungsdichte von Laserstrahlen aus Diodenlasern, damit diese für Materialbearbeitung eingesetzt werden können. Technisch ist die Leistung aus einem einzelnen Halbleiterlaser auf etwa 10W begrenzt, da sonst seine Zerstörung durch Überhitzung droht. Um zu höheren Leistungen (typisch: 1 kW) zu kommen, sind deshalb viele solche Laser notwendig. Wenn diese aber nebeneinander angeordnet werden, steigt der Strahlquerschnitt proportional zur Leistung, so dass die Leistungsdichte konstant bleibt. Eine Steigerung der Leistungsdichte (dies ist die wichtige Kenngröße für Materialbearbeitung) ist nur möglich, wenn die Einzelstrahlen räumlich überlagert werden. Das ist physikalisch aber nur möglich, wenn sich die Einzelstrahlen aufgrund ihrer Polarisation und/oder Wellenlänge separieren lassen.

In diesem Projekt wurde ein neuartiger Ansatz verfolgt, bei dem unterschiedliche Wellenlängen durch geschickte Polarisationsfilterung erzeugt werden (sog. Lyot-Filter), da sich solche Strahlen besonders gut und effizient mittels Polarisationsfiltern räumlich überlagern lassen.



Die Herausforderung bestand darin, dieses Verfahren technisch so umzusetzen, dass es mehrstufig für ausreichend leistungsfähige Diodenlaser mit einer wirtschaftlich sinnvollen Effizienz funktioniert. Es mussten also physikalische Grenzen ermittelt und optimiert werden unter gleichzeitiger Berücksichtigung thermisch und mechanisch stabiler und kompakter Aufbauten, deren Produktionsaufwand und -kosten wirtschaftlichen Randbedingungen unterliegen.

Hauptziel des Projekts war ein System, das 1kW Leistung mit einem Strahlparameter $BPP \leq 10 \text{ mm mrad}$ (und in Kombination mit photonischen Kristallen 2..3 mrad) emittieren kann.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die vier Antragssteller ergänzten sich in ihren Kompetenzen ideal hinsichtlich ihrer technischen Kompetenz (v.a. monocrom), ihrer Simulationskompetenz (v.a. WIAS), ihrer mikrooptischen Kompetenz (v.a. femtica) und ihrer Erfahrung mit spektralem Multiplexen von Diodenlasern (v.a. Raab-Photonik). Jeder der Partner besaß auch die für sein Feld notwendige technische Ausstattung und Fertigkeiten für ihren Einsatz.

Dennoch war intensive Kommunikation über Möglichkeiten, Grenzen, Ziele und Herangehensweisen notwendig. Diese wurde in regelmäßigen Projekttreffen und unregelmäßigen bilateralen Treffen erzielt.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Antragstellung vorangegangen waren intensive koordinierende Treffen und Korrespondenz zur Ermittlung anspruchsvoller aber realistischer Projektziele. Voraussetzungen hinsichtlich der (zu diesem Zeitpunkt lediglich abgeschätzten) notwendigen technologischen und physikalischen Machbarkeit wurde von allen Partnern beigesteuert.

Diese detaillierte Planung erwies sich im Projektverlauf als im Wesentlichen realistisch und praktikabel. Insbesondere wurden vorgesehene Alternativlösungen evaluiert und die jeweils überlegene Variante ausgewählt. Einzig die auftretenden Lieferschwierigkeiten und durch Hersteller nicht eingehaltene Spezifikationen erwiesen sich als Hindernis für die Zeitplanung und resultierten letztlich in einer Verlängerung der Laufzeit um 3 Monate (Raab-Photonik) bis 6 Monate (monocrom).

Im Verlauf fanden die geplanten Treffen zum inhaltlichen Austausch statt, auf denen technologisch kritisch aber immer kooperativ der gemeinsame Fortgang des Projekts diskutiert wurde.

Letztlich wurde das wesentliche Ziel eines 1kW-Lasers erreicht. Darüber hinaus gab es mehrere wissenschaftliche Publikationen und mindestens ein Patent befindet sich in Vorbereitung. Alle Partner haben über die unmittelbaren Projektziele hinaus weitere technologische Fortschritte auf ihren eigenen Kompetenzfeldern erzielt.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Partner monocrom und femtica hatten jeweils ortsansässige Universitäten im Unterauftrag beteiligt, über die weitere detailreichere Untersuchungen beigesteuert wurden. Davon profitierte auch die Raab-Photonik.

Monocrom und Raab-Photonik standen zudem in engem Austausch mit dem Lieferanten der für das Konzept notwendigen Kristalle, die sich als projektkritisch erwiesen.

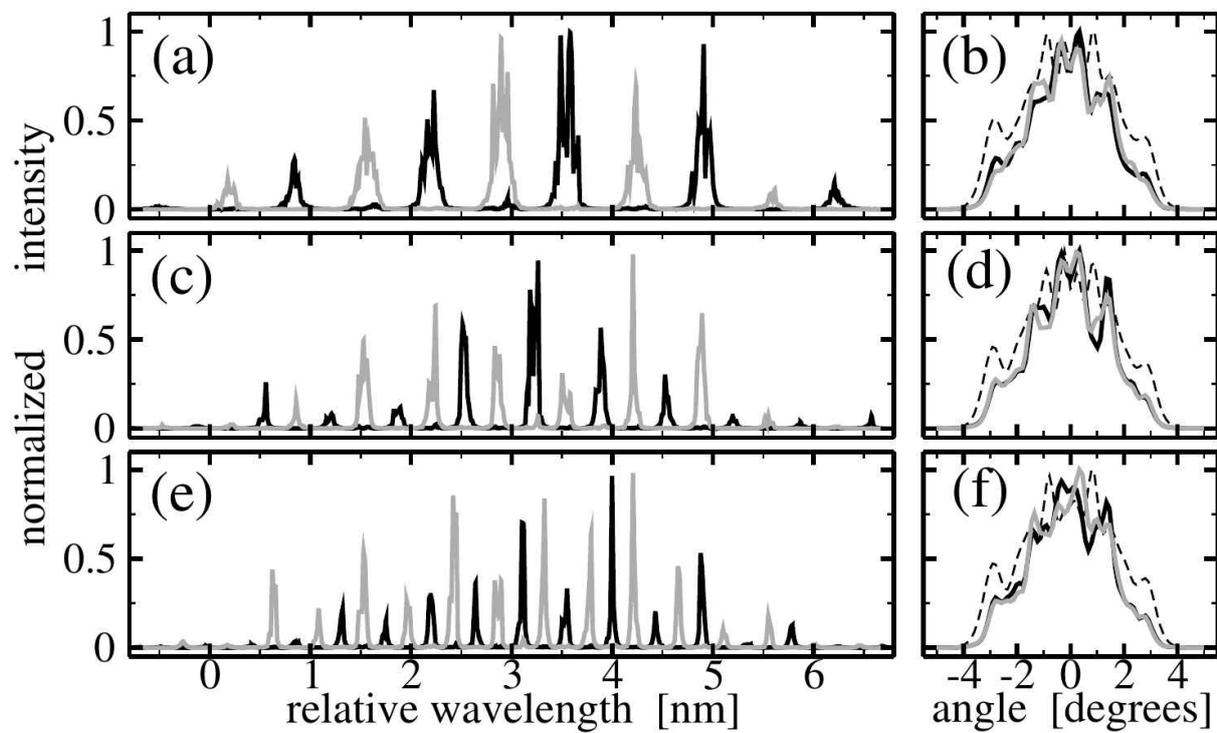
II. Eingehende Darstellung

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Rahmen des Projektkonsortiums war die Raab-Photonik für die spektrale Kopplung mehrerer Laser-Basiseinheiten zuständig. In der folgenden Tabelle sind die AP mit Beteiligung der Raab-Photonik mit Kurzangabe des Ergebnisses aufgelistet.

Duration (month)	
WP1: Designs & Simulations of Individual Lasers	
1.6 Modeling and optimization simulations of the laser arrays	Erfolgreich.
WP2: First Mountings & Tests	
2.1 Optimizing Choice of Components	langwieriger Prozess. Letzlich erfolgreich
2.2 Testing supplied components	höherer Zeitbedarf als geplant. Kontinuierlich. Erfolgreich.
2.5 Mounting beam twister and post-collimation	Erfolgreich gemeinsam mit monocrom
WP3: Modules Combination	
3.1 Simulation of crystal characteristics	ZEMAX-Simulationen, die zur Spezifikation der Kristalle führte
3.2 Test spectral locking for single module in multiple stages	plangemäß schrittweiser Aufbau. Erfolgreich.
3.3 Build first few collimated and filtered laser modules	plangemäß schrittweiser Aufbau. Erfolgreich.
3.4 Test performance under environmental change	nicht vollständig wegen Problemen mit gelieferten Komponenten
3.5 Combine two modules into a single beam	plangemäß schrittweiser Aufbau. Jeweils zunächst bei Raab-Photonik, dann auf Workshops bei monocrom. Erfolgreich.
3.6 Combine four modules into a single beam	
3.7 Combine eight modules into a single beam	Zunächst nicht abgeschlossen. monocrom erfolgreich in Verlängerung.
3.8 Fiber coupling	nicht abgeschlossen
WP4: Polarization Combining POC	
4.1 Redesign platform to host 16 modules	Design: Raab-Photonik. Umsetzung: monocrom. Erfolgreich.
4.2 Build first platform and stepwise insert modules	Design: Raab-Photonik. Umsetzung: monocrom. Erfolgreich.
4.3 Thoroughly test first platform	Gemeinsam mit monocrom. Erfolgreich.
4.4 Redesign and rebuild first platform	mehrfach gemeinsam mit monocrom iteriert. Erfolgreich.
WP5: System Prototyping	
WP6: Pre- Sales & Marketing Activities	
WP7: Project Management and Exploitation activities	
7.2 Project Management	regelmäßige gemeinsame Treffen. Bilaterale Kommunikation, wo nötig. Bilaterale Workshops. Gemeinsame Publikationen
7.3 Financial Management and Periodical Reporting	
7.4 Exploitation and dissemination activities	

Zunächst mussten die geplanten Systeme simuliert werden (AP1.6). Basierend auf diesen Simulationen wurden Komponenten ausgesucht, bestellt und getestet, dann montiert (AP2.1+AP2.2+AP2.5). (Bild: WIAS)

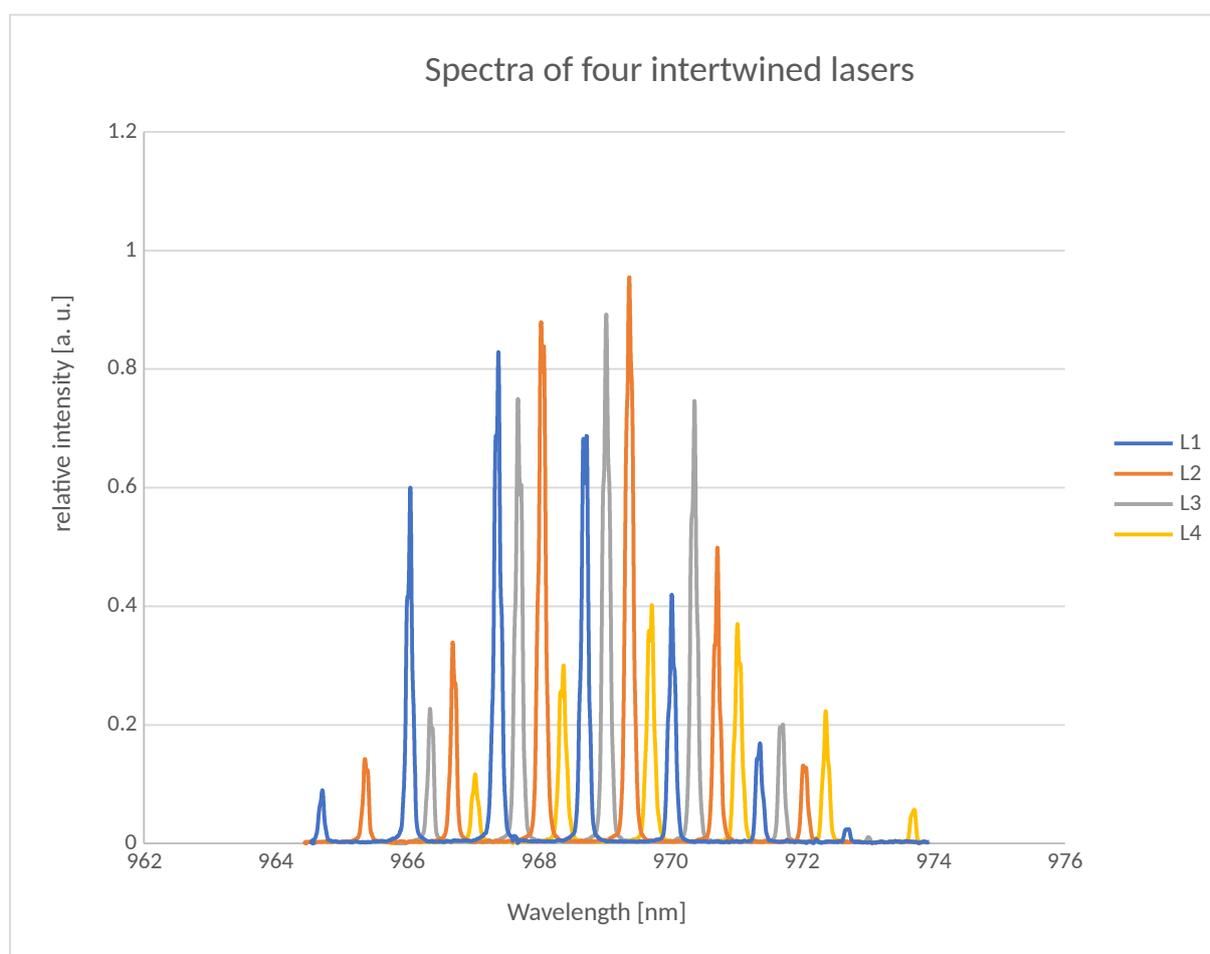


Danach mussten zunächst zwei, später vier und acht Lasermodule ("Kanäle") mittels Polarisationsstrahlteiler überlagert werden. Anschließend wurde die gemischte Polarisation mittels intra-cavity Lyot-Filter wieder gleichgerichtet.

Diese Arbeiten wurden laut Projektplan schrittweise aufgebaut: zunächst wurden Simulationen durchgeführt (AP3.1), die dann an einem einzelnen Kanal (AP3.2), zunächst auch nur mit einem einzelnen Laserchip (AP2.2), getestet wurden. Dann wurden schrittweise kompliziertere Aufbauten gewählt (AP3.3 --> AP3.8).

Diese AP verliefen alle im Wesentlichen im Rahmen der Planungen. Über die ursprünglichen Ziele hinaus wurde in der zweiten Projekthälfte die Zusammenarbeit mit dem WIAS vertieft und dort umfangreiche Simulationen erstellt, die in mehreren Posterbeiträgen und einer umfangreichen gemeinsamen Peer-Review-Publikation resultierten.

Im Laufe des Projekts zunehmend kompliziertere Aufbauten (AP4.1 --> AP4.4) konnten zeigen, dass das Konzept erwartungsgemäß zu Kopplung und gesteigerter Leistung führt. (Bild: spektrale Messungen gemeinsam mit monocrom.) Allerdings lag lange Zeit die Effizienz

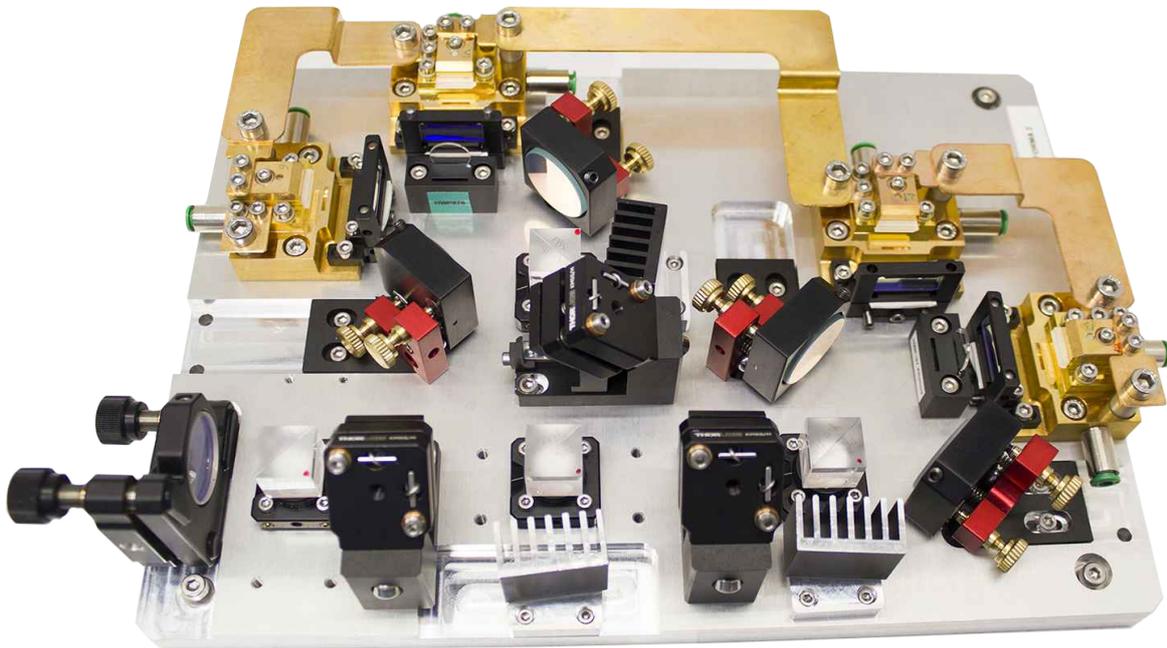


der spektralen Kopplung unter den Erwartungen. Es mussten deshalb mittels umfangreicher aber ungeplanter Arbeiten die verwendeten Kristalle als Hauptverursacher ausgemacht werden. Diese Verzögerungen, nicht zuletzt wegen langer Lieferzeiten der Ersatz-Kristalle, führten ursächlich zu einer begründeten Projektverlängerung von (bei uns) drei Monaten.

Nachdem die Ersatz-Kristalle geliefert waren, wurde in einem gemeinsamen zweiwöchentlichen Workshop von Raab-Photonik und monocrom in den Labors von

monocrom ein Aufbau realisiert, der die Erwartungen praktisch voll erfüllte: Eine Kopplung von vier Laserbarren kann bis 520W CW-Ausgangsleistung liefern und ein Aufbau mit acht Laserbarren annähernd 1kW (hier: 970W). Das entspricht einem opto-optischen Wirkungsgrad von etwa 63%. Je nach Konfiguration ließen sich experimentell bis zu über 79% erzielen.

In der folgenden Abbildung ist der Aufbau dargestellt, der aus der Kombination von vier Laserbarren (gemäß AP 3.6) einen einzelnen Laserstrahl mit bis zu 520W erzeugt.



Über die Vertiefung in der Mitte des unteren Bildrandes (im Bild durch einen Beam-Dump geblockt) lassen sich zwei solche Plattformen zu einem System mit acht Barren koppeln (AP 3.7), um insgesamt 970W Ausgangsleistung zu erzielen. Dieses System befindet sich derzeit bei monocrom noch in einem Prozess weiterer Feinoptimierung, so dass die Erreichung einer Leistung oberhalb von 1kW höchst wahrscheinlich ist. Die aktuelle Strahlqualität beträgt etwa $BPP=30$ und ist somit schlechter als ursprünglich erhofft, was auf nicht erwartungsgemäß arbeitende photonische Kristalle zurückzuführen ist (die aber außerhalb der Arbeiten der Raab-Photonik lagen).

Bedenkt man aber, dass im Antrag noch die Notwendigkeit eines zusätzlichen spektralen Multiplexens (mittels dichroitischer Spiegel) als Weg zu einem "system up to 1kW" für wahrscheinlich angesehen war, sind die aktuellen Ergebnisse nicht nur im Rahmen der Erwartungen, sondern übertreffen sie deutlich, da sie den Weg zu multi-kW-Systemen öffnen.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der größte Teil der Projektkosten waren die Personalkosten mit 302.336,14 EUR, die Materialkosten betragen 14.924,94 EUR und die Reisekosten 5.503,23 EUR.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Antrag waren an mehreren Stellen alternative Vorgehensweisen vorgesehen und die Leistung und Leistungsdichte des angestrebten Gesamtsystems basierte auf zwei unabhängigen Teilverbesserungen. Im Projektverlauf zeigte sich, dass ohne diesen Ansatz die Erfolgswahrscheinlichkeit sehr gering gewesen wäre:

Einerseits zeigten die photonischen Kristalle nicht das erwünschte Verhalten, was sich letztlich im nicht vollständig erzielten BPP äußert. Andererseits ließ sich die angestrebte Leistungsdichte dennoch erreichen (sogar streng genommen übertreffen), weil die Gleichgerichtete Polarisationskopplung gut funktionierte.

Von den unterschiedlichen Varianten der Strahlformung nahe des Laserbarrens ließ sich die eine Variante, der sogenannte Beam-Twister, besser optimieren als seine „Konkurrenz“, die Kombination aus FAC+SAC. In der Vergangenheit war der Beam-Twister noch meist unterlegen, so dass ein alternativloses Vorgehen entweder schlechtere Endresultate oder ein unverhältnismäßig hohes Risiko bedeutet hätte.

Insgesamt wurden alle wesentlichen Ziele erreicht, indem (bei einem innovativen Projekt schier unvermeidliche) Verzögerungen durch geringfügige Umschichtungen im Zeit- und Finanzbudget erfolgten. Das zeigt, dass insgesamt sowohl Kosten als auch Arbeitszeiten im wesentlichen den korrekten Umfang besaßen.

voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Wie erwähnt, existiert bereits eine Plattform (im Gegensatz zu einem Aufbau aller Komponenten auf dem Labortisch), die vier bzw. acht Laserbarren und alle dazu gehörigen Optiken aufnehmen kann. Diese Plattform ist noch kein Prototyp und zeigt auch noch einige Schwachstellen, die aber verbessert werden können. Insofern erscheint es realistisch, im Laufe der auf das Projekt folgenden zwölf Monate ein marktfähiges System zu erstellen.

Vorteilhaft für potenzielle Kunden wird die Kompaktheit sein. Außerdem bietet der aktuell erzielte opto-optische Wirkungsgrad von annähernd 70% eine gute Ausgangsbasis für eine hohe Systemeffizienz (engl: "wall-plug-efficiency"). Letztere wird vom Haupt-Mitbewerber TeraDiode (inzwischen ein Teil von Panasonic) mit 40% angegeben.

Weiterhin vorteilhaft kann die Flexibilität der Wellenlänge und die Skalierbarkeit der Leistung sein. TeraDiode bietet 3kW mit einer spektralen Breite von etwa 950..1000nm. Hier ist die Breite von etwa 963..973nm lediglich 1/5 so breit.

Das ist günstig für Anwendungen, die spektrale Abhängigkeiten zeigen. Außerdem besteht das Potenzial, die Leistung weiter zu skalieren, indem mehrere solche Plattformen dichroitisch gekoppelt werden. Systeme bis 10kW erscheinen nicht unrealistisch.

Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im wirtschaftlichen Umfeld haben sich zwei bedeutende Veränderungen ergeben: alle beide im Antrag genannten Haupt-Mitbewerber DirectPhotonic GmbH und TeraDiode Inc existieren nicht mehr als eigenständige Gesellschaften. DirectPhotonic meldete zwischenzeitlich Insolvenz und wurde durch die Firma II-VI aufgekauft, die die Produkte in ihr Portfolio aufgenommen hat. Die Firma TeraDiode wurde durch Panasonic aufgekauft. Eine Interpretation dieser Ereignisse steht noch aus, da nicht klar ist, ob diese Entwicklung positiv oder negativ ist. Einerseits scheinen die Produkte nicht eigenständig markttauglich (preislich oder qualitativ?) gewesen zu sein, von TeraDiode gab es m.W. nie eine direkte Vermarktung. Andererseits haben beide Firmen jeweils einen Großen gefunden, unter dessen Dach sie nun Markterschließung treiben können.

erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

peer-reviewed:

[1] Journal of the Optical Society of America B / Vol. 36, No. 7 / July 2019

CARSTEN BRÉE, VOLKER RAAB, JOAN MONTIEL-PONSODA, GUILLERMO GARRE-WERNER, KESTUTIS STALIUNAS, UWE BANDELOW , AND MINDAUGAS RADZIUNAS

Beam-combining scheme of high-power broad-area semiconductor lasers with Lyot-filtered reinjection: modeling, simulations, and experiments

<http://doi.org/10.1364/josab.36.001721>

Conference proceedings:

[2] M. Radziunas, U. Bandelow, C. Bree, V. Raab, H. Wenzel, and A. Zeghuzi, "Modeling and simulation of high-power

broad-area semiconductor lasers with optical feedback from different external cavities," Proc. of 26th IEEE

International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2018), pp. 7-8, 2018. Santa Fe, New Mexico, USA,

September 16-19, 2018 (invited talk).

[3] Genetically optimized photonic crystal for spatially filtered reinjection

into broad-area diode lasers

Carsten Brée, Volker Raab, Darius Gailevičius, Vytautas Purlys, Joan Montiel, Guillermo Garre Werner, Kestutis Staliunas, Andreas Rathsfeld, Uwe Bandelow, Mindaugas Radziunas

CLEO München 2019

[4] Polarization beam combining scheme for high-power, broad-area semiconductor laser diodes: modelling, simulations, and experiments

Carsten Brée, Volker Raab, Joan Montiel, Guillermo Garre, Kestutis Staliunas, Uwe Bandelow, Mindaugas Radziunas

CLEO München 2019

[5] Auf der Photonics West, 1.-6. Feb. 2020, wird in San Francisco eine Präsentation der Ergebnisse erfolgen: J. Montiel et.al. „1 kW cw fiber-coupled diode laser with enhanced brightness”

Internet:

[6] Es wurde eine zweisprachige Internetseite eingerichtet, über die eine Kontaktaufnahme möglich ist:

Deutsch: https://www.raab-photonik.com/de/projekte/hip_laser

Englisch: https://www.raab-photonik.com/en/projects/hip_laser

Messen:

[7] Bis zur kommenden LWoP (München 2021) sollte planungsgemäß eine marktreife Umsetzung des Leistungslasers durch monocrom präsentabel sein.

Patente:

[8] Derzeit wird die Erstellung eines oder mehrerer gemeinsamer Patente forciert.