Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) **Schlussbericht**
3. Titel **Kohärente Strahlquelle für die optische Freiraumkommunikation auf der Basis von hybrid integrierten Diodenlasern und Verstärkern (KoStraKom)**	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] **Institutsleiter: Prof. Dr. G. Tränkle** **Projektleiter: Dr. G. Erbert** **Bearbeiter: Dr. A. Wicht** **S. Spiessberger**	5. Abschlussdatum des Vorhabens **31.07.2011** 6. Veröffentlichungsdatum 7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) **Forschungsverbund Berlin e.V.-Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik** **Gustav-Kirchhoff-Str. 4** **12489 Berlin**	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 10. Förderkennzeichen **50 YB0810** 11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 14. Tabellen 15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

Ziel des Vorhabens war es, auf der Basis von Halbleitertechnologie und Mikrosystemtechnik eine kompakte, zuverlässige und energieeffiziente Strahlquelle zu schaffen, die für die Freiraumkommunikation mittels kohärenter optischer Verfahren einsetzbar ist.

Im Gegensatz zu bisherigen Lösungen, die auf dem Einsatz von optisch gepumpten Festkörperlasern und Faserverstärkern beruhen, enthält die Strahlquelle nur aktive Komponenten – Oszillator und Verstärker – auf der Basis der Diodenlaser-Technologie.

Auf diese Weise kann das Gewicht, der Energieverbrauch und die Komplexität der Strahlquelle gegenüber optisch gepumpten Lasern drastisch verringert werden; damit wird die Zuverlässigkeit der Strahlquelle deutlich erhöht und es werden die raumfahrtspezifischen Anforderungen besser getroffen.

19. Schlagwörter

MOPA, Linienbreite, kohärente optische Datenübertragung, Weltraumkommunikation

20. Verlag	21. Preis

Leibniz
Ferdinand-Braun-Institut

Kohärente Strahlquelle für die optische Freiraumkommunikation auf der Basis von hybrid integrierten Diodenlasern und Halbleiterlaser-Verstärkern

Zuwendungsempfänger:	Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik im Forschungsverbund Berlin e.V. Gustav-Kirchhoff.Str. 4 12489 Berlin
Förderkennzeichen:	50 YB 0810
Vorhabensbezeichnung:	Es werden die physikalisch-technologischen Grundlagen auf der Basis von Halbleiter- und Mikrosystemtechnik für eine kompakte, zuverlässige und energieeffiziente Strahlquelle geschaffen, die für die Freiraumkommunikation mittels kohärenter und nichtkohärenter optischer Verfahren einsetzbar ist.
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2008 – 31.07.2011
Berichtszeitraum:	01.08.2008 – 31.07.2011

Abschlussbericht

Institutsleiter:	Prof. Dr. G. Tränkle
Projektleiter:	Dr. G. Erbert
Bearbeiter:	Dr. A. Wicht
	S. Spiessberger

I. Kurze Darstellung

Ziel des Vorhabens ist es, auf der Basis von Halbleitertechnologie und Mikrosystemtechnik die physikalisch-technologischen Grundlagen für eine kompakte, zuverlässige und energieeffiziente Strahlquelle zu schaffen, die für die Freiraumkommunikation mittels kohärenter und nichtkohärenter optischer Verfahren einsetzbar ist.

Die Strahlquelle soll im Gegensatz zu bisherigen Lösungen, die auf dem Einsatz von optisch gepumpten Festkörperlasern und Faserverstärkern beruhen, nur aktive Komponenten – Oszillator und Verstärker – auf der Basis der Diodenlaser-Technologie enthalten.

Auf diese Weise kann das Gewicht, der Energieverbrauch und die Komplexität der Strahlquelle gegenüber optisch gepumpten Lasern drastisch verringert werden; damit wird die Zuverlässigkeit der Strahlquelle deutlich erhöht und es werden die raumfahrtspezifischen Anforderungen besser getroffen.

Im Folgenden werden die in den einzelnen Arbeitspunkten erzielten Resultate dargelegt.

Zusammenfassung

- **AP 1: Design und Realisierung der Oszillatoren (1060 nm Diodenlaser mit integrierten Bragg-Gittern)**
    - Es wurden DFB Laser mit einer Resonatorlänge von 1 mm und 2 mm mit einem Koppelkoeffizienten von 4 cm^{-1} realisiert.
    - Es wurden DBR Laser mit einer Gesamtlänge von 4 mm (Resonator: 3 mm, DBR-Gitter: 1 mm) und mit Frontfacettenverspiegelungen von 1% und 30% realisiert.
- **AP 2: Elektro-optische Charakterisierung der Oszillatoren**
    - Sowohl DFB als auch DBR Laser erreichen eine Ausgangsleistung von 100 mW, welche für die Verwendung in einem MOPA System gewünscht wird.
    - Beide Lasertypen weisen einen stabilen Singlemode-Betrieb über einen weiten Strombereich auf.
    - DFB Laser mit einer Resonatorlänge von 2 mm ereichen eine FWHM Linienbreite von 280 kHz und eine intrinsische Linienbreite von 7 kHz. DBR Laser mit einer Frontfacettenverspiegelung von 30% erreichen eine FWHM Linienbreite kleiner 200 kHz und eine intrinsische Linienbreite bis an die Grenze der vorhandenen Messmöglichkeiten von 2 kHz.
- **AP 3: Design und Realisierung von Halbleiterverstärkern**
    - Es wurden Halbleiterverstärker mit Doppel und Triple-Quantum Well und mit Gesamtlängen von 4 mm und 6 mm (Länge RW-Eingang: 2 mm) realisiert. Die angestrebte Ausgangsleistung von einem Watt wird mit diesen Verstärkern erreicht.
- **AP 4: Design und Realisierung mikro-optische Bank**
    - Mikro-optische Bänke wurden entworfen und realisiert. Das Konzept beinhaltet einen Mikroisolator um optische Rückkopplung zu unterdrücken.

- **AP 5: Charakterisierung der gesamten Strahlquelle (Modul)**
    - Die realisierten Strahlquellen wurden charakterisiert. Die Ergebnisse übertreffen die durch das Projekt vorgegebenen Ziele.

Wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, wurden die im Projekt angestrebten technischen Zielgrößen erreicht.

technischer Kernparameter	**Ziel**	**erreicht**
Ausgangsleistung in einem kollimierten Strahl	1 W	≥ 1.2 W
Linienbreite im statischem Betrieb (FWHM)	< 200 kHz	≤ 150 kHz
thermischer modensprungfreier Durchstimmbereich	> 300 GHz	≥ 450 GHz
Leistungsverbrauch der Halbleiterkomponenten	< 4 W	≤ 3.6 W

Tabelle 1: Technische Zielgrößen

II. Eingehende Darstellung

AP 1,2: Design und Realisierung der Oszillatoren (1060 nm-Diodenlaser mit integrierten Bragg-Gittern) und elektro-optische Charakterisierung.

Im folgenden wird zunächst der im Rahmen des Projektes neu aufgebaute Messplatz vorgestellt und die Charakterisierung der Diodenlaser

Linienbreitenmesspatz

Eine zuverlässige und präzise Linienbreitenmessmethode ist die Schwebungsmessung. Dabei wird das Spektrum durch Überlagerung zweier Strahlen in den HF-Bereich verschoben, wodurch eine Charakterisierung mit einem Oszilloskop oder einem Spektrumanalysator ermöglicht wird. Werden Laserstrahlen zweier Laser überlagert, handelt es sich um ein heterodynes Verfahren, wird der Strahl eines Lasers geteilt und mit Hilfe einer Verzögerungsfaser und eines AOMs überlagert, spricht man vom *self-delayed*-heterodynen Verfahren. Sowohl das heterodyne als auch das *self-delayed* heterodyne Verfahren sind geeignet, um Linienbreiten hinunter bis 200 kHz und weniger zu analysieren.

Tests des bestehenden Linienbreitenmessplatzes ergaben die Notwendigkeit, die mechanische und thermische Stabilität des Aufbaus grundlegend zu verbessern und die Datenaufnahme und -auswertung grundlegend zu modifizieren. Dazu wurde zum einen ein neuer optomechanischer Aufbau entwickelt und zum anderen das Messverfahren grundlegend modifiziert und ergänzt.

Der Aufbau gestattet nun die Charakterisierung von Laserlinienbreiten mit Hilfe zweier verschiedener, sich ergänzender Verfahren (heterodynes und *self-delayed* heterodynes Verfahren), die in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt sind. Bei dem heterodynen Verfahren wird die Strahlung von zwei nominal identischen Lasern überlagert und das Schwebungssignal mit Hilfe einer Photodiode aufgenommen. Die Analyse des RF-Photodiodensignals liefert dann eine Aussage über die relative Linienbreite der Laser zueinander und damit – sofern man annimmt, dass das Frequenzrauschen der Laser unkorreliert ist – eine obere Grenze für die Linienbreite eines einzelnen Lasers. Wenn beide Laser tatsächlich identische Frequenzrauschspektren besitzen, kann auch die Kurzzeit-Linienbreite eines einzelnen Lasers bestimmt werden: sie ist halb so groß wie die Kurzzeit-Linienbreite des Schwebungssignalspektrums. Das heterodyne Verfahren erlaubt auch die Bestimmung von Linienbreiten sehr schmalbandiger Laser (sub-kHz).

Allerdings driftet die Schwebungsfrequenz einer heterodynen Messung aufgrund von Temperatur- und Stromschwankungen. Dieser Drift ist typischerweise zu groß um Frequenzrauschspektren zu ermitteln, da für Frequenzrauschanalysen lange Messzeiten benötigt werden. Um heterodyne Linienbreitenmessungen mit längerer Messzeit durchführen zu können, wurde der bestehende heterodyne Linienbreitenmessplatz um einen Frequenzstabilisierung („Lock“) der beiden Laser aufeinander erweitert. Dabei wurde die Regelbandbreite mit einigen kHz so gering gewählt, dass die beiden Laser im relevante Frequenzbereich des Fourierspektrums frei laufen. Mit diesem Lock wird die Schwebungssignalfrequenz im zeitlichen Mittel konstant gehalten.

Das *self-delayed* heterodyne Verfahren kommt mit einem einzigen Laser aus. Es ist in Abbildung 2 dargestellt. Beim *self-delayed* heterodynen Verfahren wird die Strahlung eines Lasers mit einem Strahlteiler aufgeteilt und dann wieder überlagert, wobei einer der beiden Teilstrahlen um eine Strecke verzögert wird, der größer als die Kohärenzlänge des Lasers ist. Auf diese Weise können zwei identische, bezüglich des Frequenz- bzw. Phasenrauschens statistisch unabhängige Lasersysteme experimentell „simuliert“ werden.

Das *self-delayed* heterodyne Verfahren hat den Vorteil, dass es nur einen Laser benötigt,

und dass daher das häufig schwierige und / oder zeitaufwendige Abstimmen der Frequenz zweier Laser aufeinander entfällt. Nachteilig gegenüber dem heterodynen Verfahren ist allerdings, dass die minimal nachweisbare Linienbreite umgekehrt proportional zu Faserlänge ist. Bei einer Faserlänge von 2000 m ergibt sich aus einer vereinfachenden Abschätzung eine minimal nachweisbare Linienbreite von etwa 100 kHz.

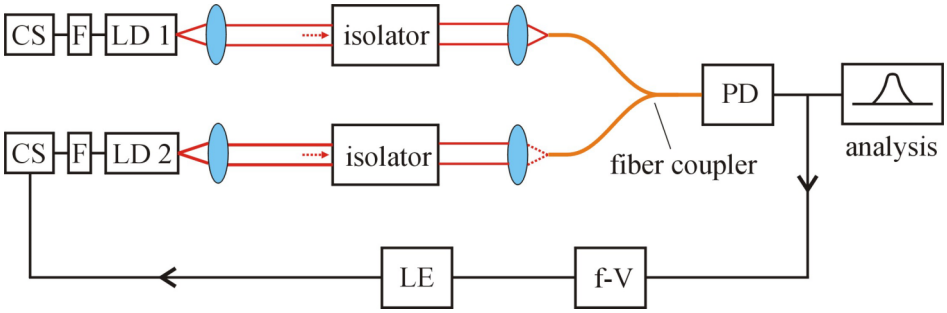

Abbildung 1: Heterodynes Linienbreitenmessverfahren mit „schwachem Frequenz-Lock". Mit diesem wird die Schwebungsfrequenz konstant gehalten, so dass Messungen des Phasenrauschens auch bei großen Messzeiten möglich sind. CS: Stromquelle, F: Tiefpassfilter, LD: Laserdiode, PD: Photodiode, f-V: Frequenz-Spannungswandler, LE: Lock-Elektronik.

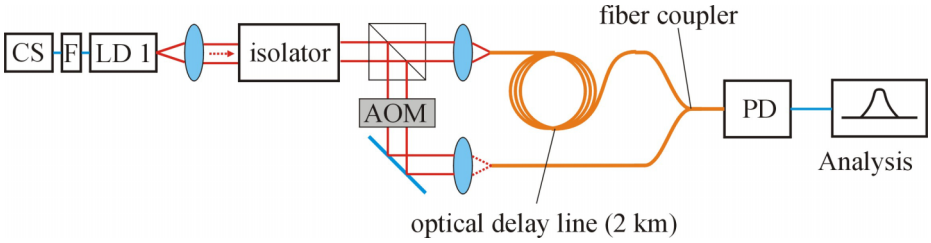

Abbildung 2: „Self-delayed-heterodynes" Linienbreitenmessverfahren.

Der opto-mechanische Teil des Linienbreitenmessplatzes ist in Abb. 3 zu sehen. Der Linienbreitenmessplatz ist durch optische Glasfasern modular aufgebaut um bei Bedarf auch Linienbreitenmessungen von Laserquellen zu ermöglichen, die sich außerhalb des Messplatzes befinden. Ein speziell entwickelter Laserhalter (Abb. 3 rechts) stellt eine hohe mechanische und thermische Stabilität sicher.

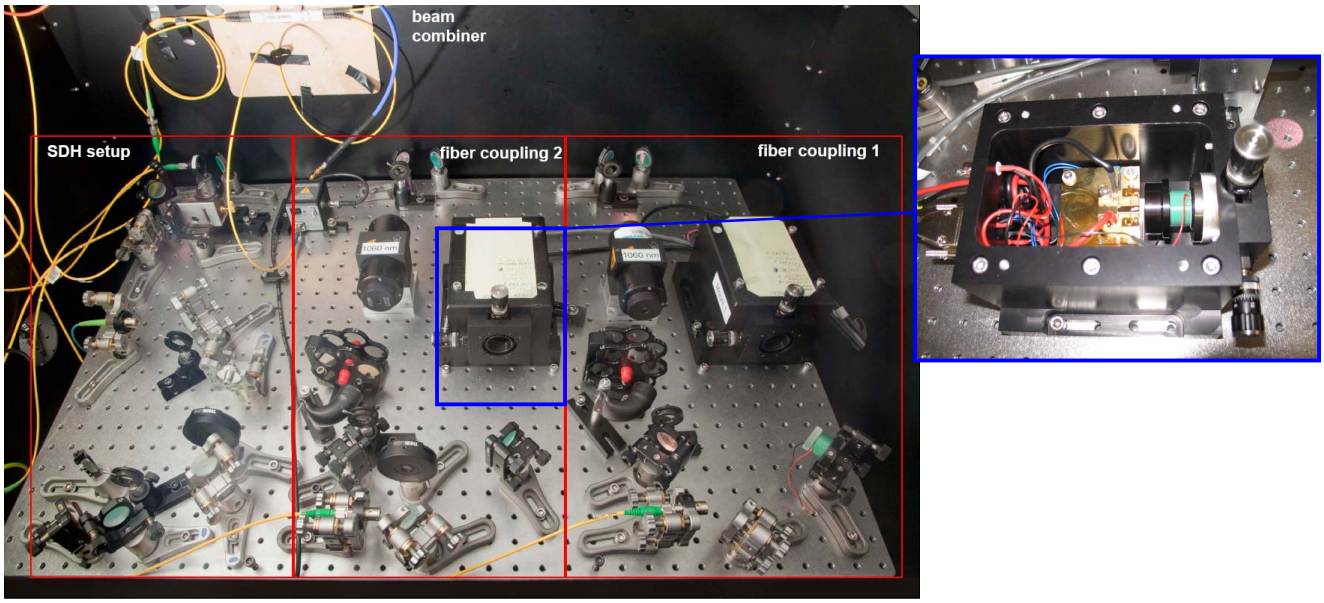

Abbildung 3: Linienbreitenmessplatz bestehend aus zwei Faserkoppeleinheiten und einer „self-delayed-heterodynen“ Messeinheit.

Die intrinsische Linienbreite von Halbleiterlasern wird hauptsächlich durch spontane Emissionen hervorgerufen und ist invers proportional zu der Ausgangsleistung. In einer Messumgebung wird die Linienbreite allerdings durch technisches Rauschen, hervorgerufen durch Temperaturfluktuationen, mechanische Vibrationen oder Rauschen des Stromtreibers, vergrößert (technische Linienbreite). Die tatsächlich gemessene Linienbreite ist daher eine Kombination aus beiden Rauscheinflüssen und wird als FWHM-Linienbreite (volle Halbwertsbreite) bezeichnet. Da für die kohärente optische Kommunikation hauptsächlich die intrinsische Linienbreite von Bedeutung ist, ist es wichtig die beiden Anteile zu trennen.

Bislang wurde am FBH die Trennung von technischem und intrinsischem Rauschen durch einen „Voigtfit“ realisiert. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass diese Verfahren keine zuverlässigen Ergebnisse liefert, wenn die Differenz der technischen und der intrinsischen Linienbreite zu groß wird.

Um die Analyse weiter zu verfeinern, werden daher nun Frequenzrauschspektren aufgezeichnet, welche einen unmittelbareren Einblick in die spektrale Verteilung des Frequenzrauschens des Lasers ermöglichen.

In Abb. 4 ist dargestellt, wie Frequenzrauschspektren ermittelt werden. Der verwendete Spektrumanalysator FSV (Rohde und Schwarz) ermittelt die Rauschleistung innerhalb einer kleinen Filterbandbreite auf einer Flanke des Schwebungssignals und teilt diese durch die Gesamtleistung des Signals. Die so erhaltene Charakteristik, die spektrale Leistungsdichte des Phasenrauschens, ist in Abb. 4 (links) dargestellt. In diesem Plot lassen sich bereits die beiden Rauschanteile (1/f, white noise) erkennen. Allerdings werden die Anteile anschaulicher und leichter interpretierbar, wenn die Werte mit der quadrierten Fourierfrequenz (im plot als „carrier offset“ frequency bezeichnet) multipliziert werden. Auf diese Weise erhält man die spektrale Leistungsdichte des Frequenzrauschens. Sie ist in Abb. 4 rechts dargestellt. Für kleine Fourierfrequenzen fällt das Spektrum mit einem 1/f-Verhalten ab (hier: bis 1 MHz). Für größere Fourierfrequenzen wird der 1/f-Anteil zunächst vergleichbar mit dem weißen Rauschanteil bis schließlich, für große Fourierfrequenzen, der weiße Rauschanteil dominiert. Die intrinsische Linienbreite eines Lasers in Hz kann aus diesem Rauschuntergrund durch die Multiplikation mit π ermittelt werden.

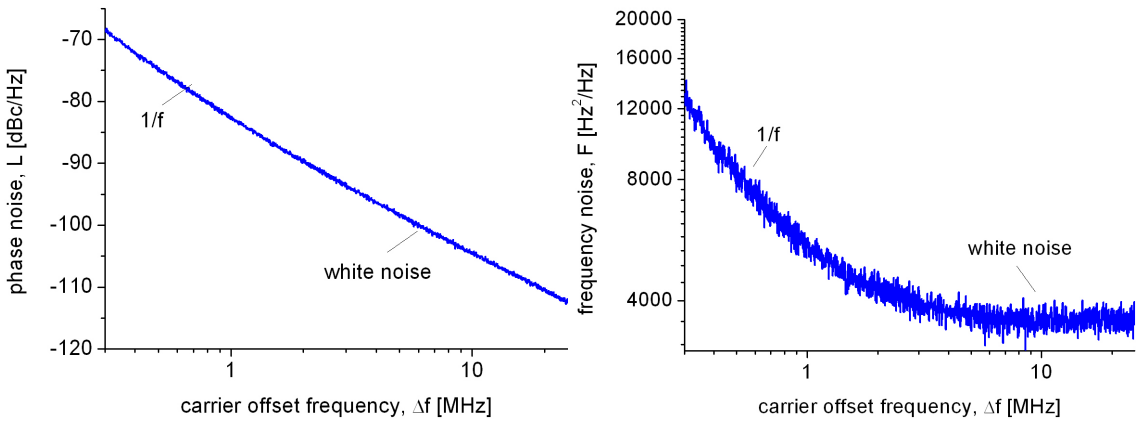

Abbildung 4: Ermittlung von Frequenzrauschspektren eines Schwebungssignals. (links): Phasenrauschspektrum, (rechts): Frequenzrauschspektrum.

Design und halbleitertechnologische Herstellung sowie Charakterisierung von Oszillatoren

DFB-RW-Laser

In der ersten Iteration wurden DFB-Laser („distributed feedback laser“) unterschiedlicher Länge und mit unterschiedlichem Koppelkoeffizienten hergestellt. Realisiert wurden DFB-Laser mit einem Koppelkoeffizienten von 4 cm^{-1} bei einer Länge von 1 mm und 2 mm und Laser mit einem Koppelkoeffizienten von 10 cm^{-1} und einer Länge von 1 mm. Des Weiteren wurde der Einfluss der Frontfacettenreflektivität auf die Ausgangsleistung, die spektrale Stabilität und die Linienbreite untersucht. Alle charakterisierten Laser erreichen bereits bei einem Injektionsstrom von 300 mA eine Ausgangsleistung von mindestens 100 mW, welche für den Einsatz in einem MOPA-System („master oscillator power amplifier“) ausreichend ist.

In Abb. 5 (links) sind Frequenzrauschspektren für verschiedene Ausgangsleistungen abgebildet. Man erkennt wie erwartet ein 1/f Verhalten für kleine Fourierfrequenzen und einen weißen Rauschuntergrund für größere Fourierfrequenzen.

Ein Vergleich der erzielten Linienbreiten von DFB Lasern mit einem Koppelkoeffizienten von 4 cm^{-1} und einer Länge von 1 und 2 mm sind in Abb. 5 (rechts) abgebildet.

Die FWHM Linienbreite (Messzeit = 170 µs) besitzt ein Minimum von 600 kHz (110 mW) für eine Resonatorlänge von 1 mm und 280 kHz (65 mW) für 2 mm. Die intrinsische Linienbreite fällt mit einem 1/P-Verhalten ab. Die geringste intrinsische Linienbreite wird für das Bauteil mit einer Resonatorlänge von 1 mm bei einer Ausgangsleistung von 230 mW erreicht und beträgt 30 kHz. Für 2 mm Resonatorlänge werden 7 kHz bei 120 mW erreicht.

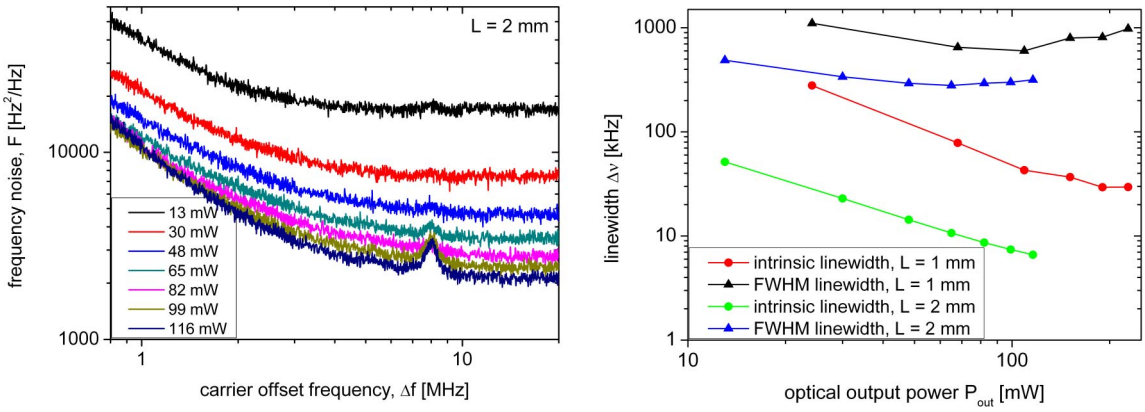

Abbildung 5: Heterodyne Linienbreitenmessung von DFB Lasern. (links): Frequenzrauschspektren für verschiedene Ausgangsleistungen (DFB mit 2 mm Länge). (rechts): FWHM und intrinsische Linienbreite in Abhängigkeit von der optischen Ausgangsleistung für 1 und 2 mm Länge.

DBR-RW-Laser

Neben DFB-Lasern wurden zusätzlich DBR-Laser charakterisiert. Bei DBR-Lasern erstreckt sich das integrierte Gitter nicht über den gesamten Resonator (wie bei einem DFB-Laser), sondern ist an einem Ende des Chips als wellenlängenselektiver Spiegel implementiert. Die Frontfacette kann daher bei diesen Lasern hoch verspiegelt werden, ohne dass sich Probleme bei der spektralen Stabilität ergeben. Diese Eigenschaft macht DBR-

Laser potentiell besonders geeignet für die Verwendung in hybriden MOPA-Systemen, da die höhere Frontfacettenverspiegelung prinzipiell eine höhere Unempfindlichkeit gegen externe optische Rückkopplungen verspricht.

Es wurden DBR-Laser mit einer Gesamtlänge von 4 mm (3mm Resonator + 1 mm Gittersektion) und mit Frontfacettenreflektivitäten von 1% und 30% untersucht.

Die Laser mit einer Frontfacettenverspiegelung von 1% liefern eine hohe Ausgangsleistung von 1 W sind allerdings im Hinblick auf spektrale Stabilität nicht für den Einsatz in einem MOPA Modul geeignet.

Bei einer Frontfacettenverspiegelung von 30% wird in etwa bei einem Injektionsstrom von 300 mA die für den Einsatz in einem MOPA-System gewünschte Ausgangsleistung von 100 mW erreicht.

In Abb. 6 (links) sind Frequenzrauschspektren für verschiedene Ausgangsleistungen abgebildet. Auch hier erhält man wie erwartet ein 1/f Verhalten für kleine Fourierfrequenzen und einen weißen Rauschuntergrund für größere Fourierfrequenzen, allerdings sind zusätzliche Rauscheinflüsse mit komplexerem Spektrum zu erkennen. Diese Rauscheinflüsse werden vermutlich durch den Stromtreiber oder Rauschen auf der Messerde verursacht.

Die Linienbreite in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung ist in Abb. 6 (rechts) abgebildet. Die FWHM Linienbreite (Messzeit = 170 µs) ist nahezu konstant und entspricht 180 kHz. Die intrinsische Linienbreite fällt mit einem 1/P-Verhalten ab. Die geringste intrinsische Linienbreite wird bei einer Ausgangsleistung von 180 mW erreicht und beträgt 2 kHz. Soweit uns bekannt, ist dies die geringste intrinsische Linienbreite von solitären Diodenlasern, über die bisher in der Literatur berichtet wurde. Die theoretisch erwartete Linienbreite ist ebenfalls eingezeichnet und stimmt mit der ermittelten exzellent überein.

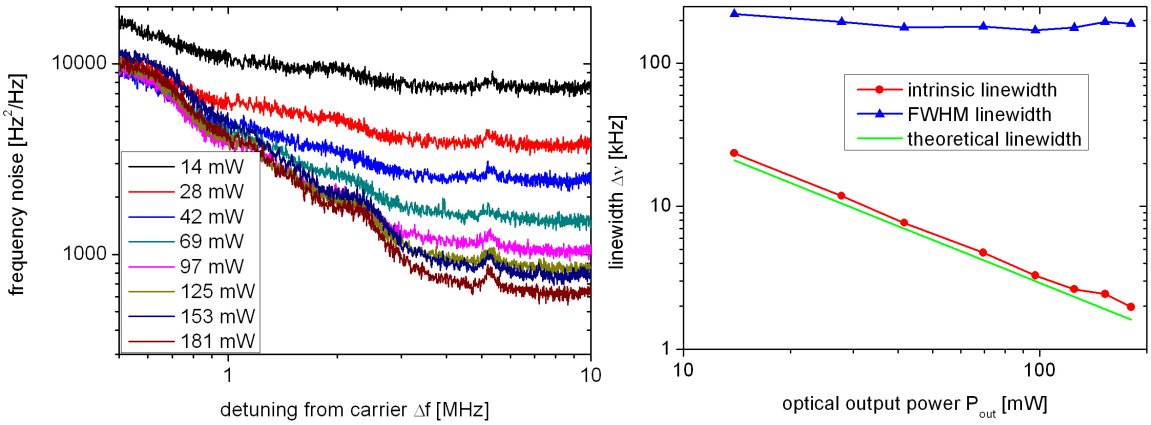

Abbildung 6: Heterodyne Linienbreitenmessung von DBR Lasern. (links): Frequenzrauschspektren für verschiedene Ausgangsleistungen. (rechts): FWHM und intrinsische Linienbreite in Abhängigkeit von der optischen Ausgangsleistung. Des Weiteren ist die theoretisch erwartete Linienbreite eingezeichnet.

AP 3: Design und Realisierung von Halbleiterverstärkern

Es wurden Halbleiterverstärker mit Doppel und Triple-Quantum Well und mit Gesamtlängen von 4 mm und 6 mm (Länge RW-Eingang: 1 mm) realisiert. In Abbildung 13 sind Verstärker aus dem Bestand des FBHs Verstärkern aus der 1. Iteration dieses Projektes gegenübergestellt. Bei den Verstärkern der ersten Iteration ist gegenüber älteren Designs die Tendenz, bei mäßigen Injektionsströmen bereits die Laserschwelle zu überschreiten, deutlich verbessert worden. Selbst bei einem Trapezstrom von 4 A (I_{RW} = 300 mA) lasen diese Verstärker noch nicht selbstständig, wodurch sie sich hervorragend als Verstärker für den Einsatz in einem MOPA-Konzept eignen.

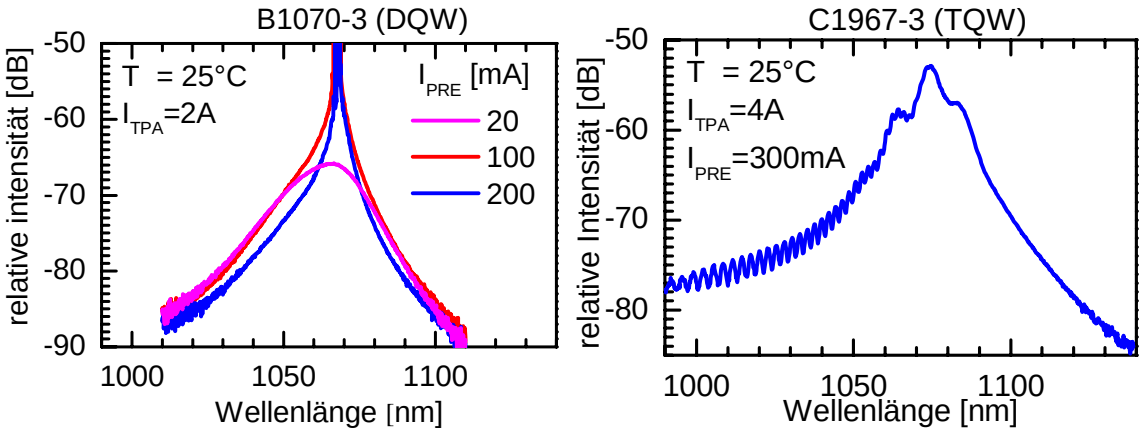

Abbildung 1: Verstärker aus Bestand (links), Verstärker aus 1. Iteration (rechts). Bei den Verstärkern aus der 1. Iteration ist die Tendenz zum Selbstlasern unterdrückt.

AP 4,5: Design und Realisierung der mikro-optischen Bank und Charakterisierung der gesamten Strahlquelle (Modul)

Das Design der Mikrobank mit allen optischen Komponenten und allen Halbleiterbauelementen ist in Abb. 4 (links) abgebildet. Abb. 4 (rechts) zeigt das aufgebaute Modul mit Kontaktierung und Wärmesenke.

Der Oszillator (MO) ist ein DBR Laser mit identischer Struktur und Beschichtung wie in AP 1,2. Der Verstärker (PA) besitzt eine “tapered” Verstärkersektion und eine Rippenwellenleiter-Eingangssektion (Länge jeweils 2 mm). Der Ausgangsstrahl des MO wird mit einem asphärischen Mikrozylinderlinsenpaar kollimiert. Die verwendeten Linsen sowie der Kleber sind weltraumqualifiziert. Der kollimierte Strahl wird durch einen Mikroisolator geführt, um optische Rückkopplungseffekte auf den Master Oszillator zu unterdrücken. Anschließend wird er Strahl in den Verstärker durch ein weiteres Mikrolinsenpaar eingekoppelt. Der Ausgangsstrahl des MOPAs wird durch ein drei Linsen-System kollimiert, um einen runden Strahl zu erhalten. Alle Halbleiterkomponenten und Optiken sind auf einer Fläche von 50 x 10 mm^2 integriert. Die elektrischen Kontaktierungen des Oszillators und des Verstärkers erfolgen galvanisch getrennt, um eine elektrische Wechselwirkung und ein Übersprechen des Rauschens der Stromquelle des Verstärkers zu den Kontakten des Oszillators zu verhindern.

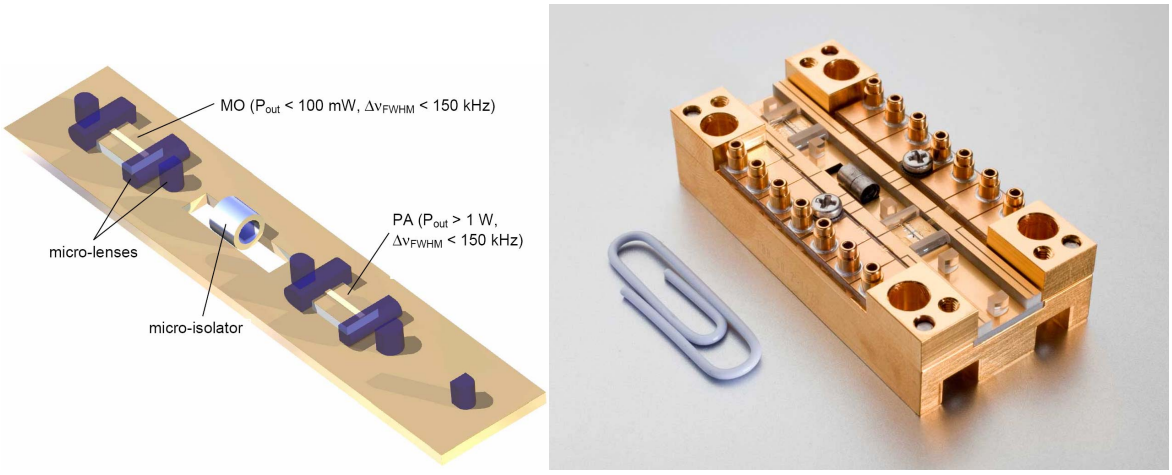

Abbildung 4: (links): Mikro-optische Bank mit allen optischen Komponenten und allen Halbleiterelementen. Abmessung 50 x 10 mm^2. (rechts): Aufgebautes MOPA Modul mit Kontaktierung und Wärmesenke.

Alle im Folgenden präsentierten Messungen wurden, wenn nicht anders gekennzeichnet, bei einer Temperatur von 25°C und einem Strom durch die Rippenwellenleitereingangssektion des Verstärkers von 200 mA durchgeführt.

Die Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Injektionsstromes in die „tapered“-Sektion I_{TA} des Verstärkers ist in Abb. 5 für verschiedene Injektionsströme in den Oszillator I_{MO} dargestellt. Für Ströme > 750 mA ist die Steigung linear und entspricht 0,79 W/A. Für I_{TA} = 2000 mA und I_{MO} = 200 mA wird eine Ausgangsleistung von 1,2 W erreicht. Die Konversionseffizienz (Ausgangsleistung geteilt durch den Leistungsverbrauch der Halbleiterkomponenten) bei diesem Arbeitspunkt beträgt 28 %.

Damit sind die im Projekt angestrebten Ziele von einer Ausgangsleistung von 1 W bei einer Konversionseffizienz von > 25 % erfüllt.

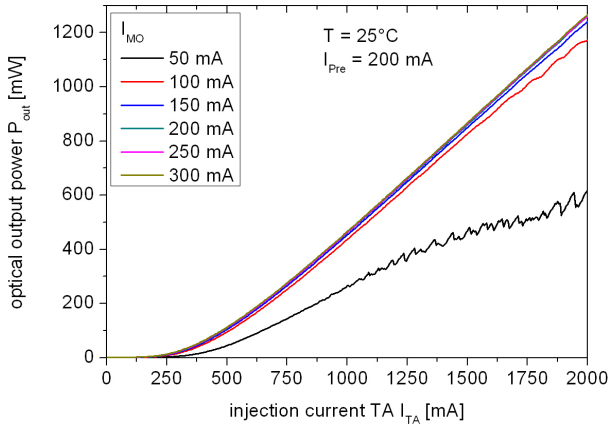

Abbildung 5: Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Injektionsstroms in die „tapered"-Sektion des Verstärkers für verschiedene Injektionsströme in den Oszillator.

Das optische Spektrum in Abhängigkeit von I_{TA} ist in Abb. 6 (links) dargestellt. Das Spektrum weist einen stabilen Monomodebetrieb über den gesamten Strombereich auf. In Abb. 6 (rechts) ist ein Vergleich von jeweils einem Spektrum des Oszillators im Vergleich zu dem des MOPAs dargestellt. Beide Spektren sind auf die Peakleistung normiert. Abgesehen von einem höheren Rauschuntergrund des MOPAs (-40 dB beim MOPA im Verhältnis zu –57 dB beim MO, Auflösung OSA: 10 pm), welcher durch spontane Emissionen des PA hervorgerufen wird, sind beide Spektren identisch.

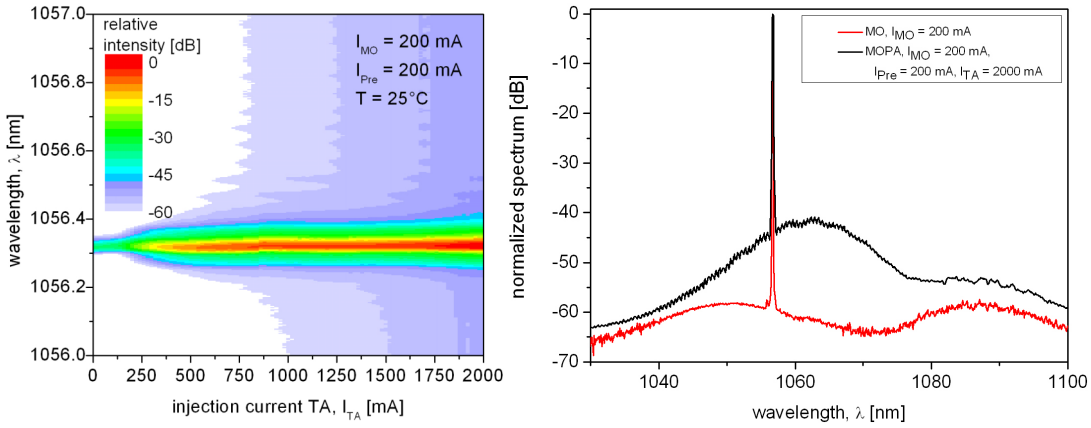

Abbildung 6: Optisches Spektrum in Abhängigkeit des Injektionsstromes in die „tapered"-Sektion des Verstärkers für einen Oszillatorstrom von 200 mA.

Die thermische Durchstimmbarkeit des MOPA Moduls ist in Abb. 7 dargestellt. Der spektrale Drift ist linear und modensprungfrei. Die Steigung beträgt 0,07 nm/K. Das Modul kann über 1.4 nm mit einer Temperaturänderung von 20 Kelvin durchgestimmt werden.

Die im Projekt angestrebte modensprungfreie Durchstimmbarkeit von 300 GHz (etwa 1 nm) ist damit übertroffen.

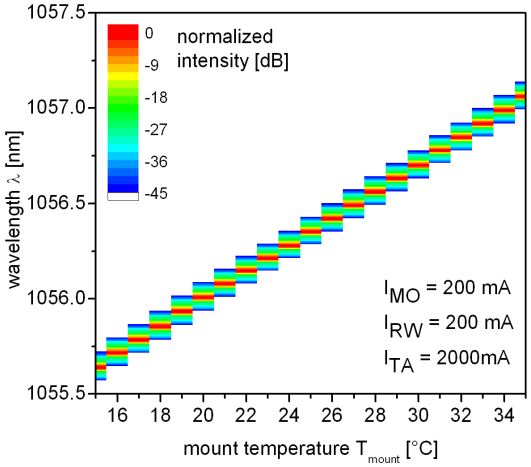

Abbildung 7: Optisches Spektrum in Abhängigkeit der Temperatur der Wärmesenke für einen Oszillatorstrom von 200 mA und einen „tapered"-Sektion Verstärkerstrom von 2000 mA.

RF Schwebungssignale einer heterodynen Linienbreitenmessung (10 µs) sind in Abb. 8 (links), für verschiedene Oszillatorströme, dargestellt. Aus diesen Schwebungssignalen wurde die FWHM Linienbreite ermittelt. Frequenzrauschspektren für verschiedene Oszillatorströme sind in Abb. 8 (rechts) dargestellt. Die Frequenzrauschspektren weisen im Vergleich zu den Einzelemittern (AP 1,2) keinerlei zusätzlichen Rauschkomponenten auf. Wir führen dies auf die bessere galvanische Entkopplung der isolierten Kontakte auf der Mikrobank zurück.

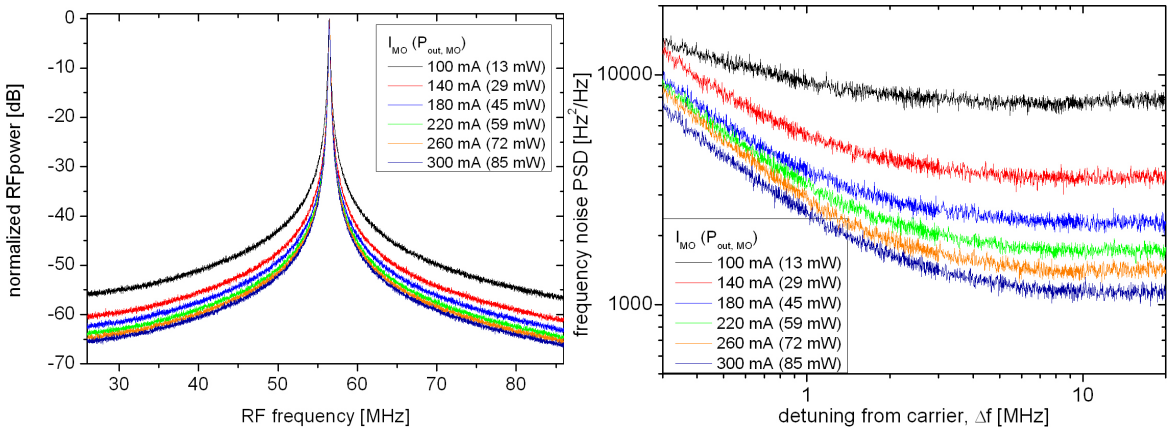

Abbildung 8: (links): RF Schwebungssignale einer heterodynen Linienbreitenmessung für verschiedene Injektionsströme in den Oszillator. (rechts): Frequenzrauschspektren einer heterodynen Linienbreitenmessung für verschiedene Injektionsströme in den Oszillator.

Die Ergebnisse der heterodynen Linienbreitenmessung in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung des Oszillators sind in Abb. 9 (links) dargestellt. Die volle Halbwertsbreite (FWHM) der Linienbreite beträgt ungefähr 100 kHz für den gesamten Leistungsbereich. Die intrinsische Linienbreite besitzt das theoretisch erwartete 1/P Verhalten mit einer minimalen Linienbreite von 3.6 kHz bei einer Gesamtausgangsleistung des MOPAs ($P_{out, MOPA}$) von 1.25 W (Ausgangsleistung des Oszillators $P_{out,MO}$ = 85 mW). Die Linienbreiten des MOPAs entsprechen denen des MOs. In Abb. 9 (rechts) ist zu erkennen, dass I_{TA} wie erwartet keinen Einfluss auf die Linienbreite hat.

Sowohl die FWHM Linienbreite als auch die intrinsische Linienbreite unterschreiten die im Projekt angestrebte Linienbreite von 200 kHz deutlich.

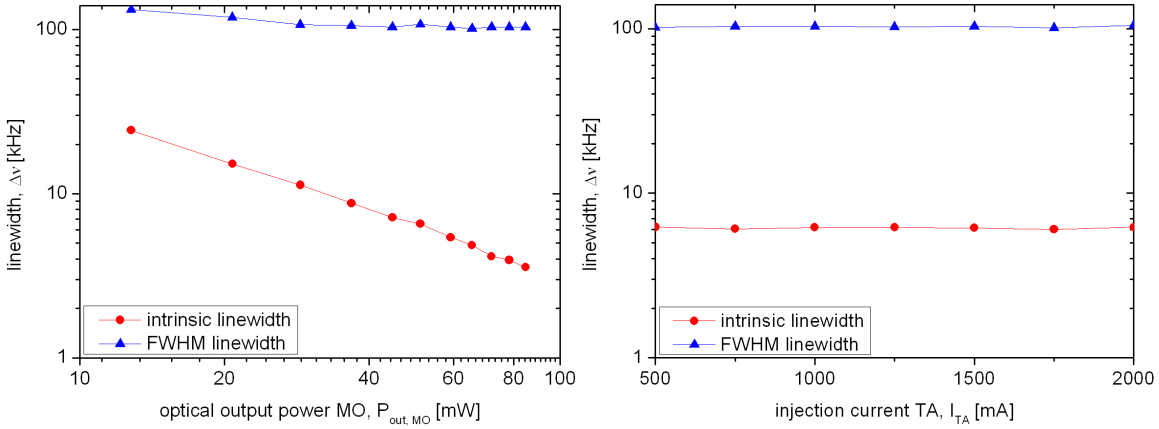

Abbildung 9: (links): FWHM und intrinsische Linienbreite in Abhängigkeit der optischen Ausgangsleistung des Oszillators. (rechts): FWHM und intrinsische Linienbreite in Abhängigkeit des Injektionsstromes in die „tapered"-Sektion des Verstärkers.

Des Weiteren ist das MOPA Modul durch den integrierten Isolator recht unempfindlich gegenüber externer optischer Rückkopplung. Durch diese Eigenschaft kann für manche Anwendungen auf einen externen Hochleistungs-Isolator verzichtet werden, wodurch Platz und Gewicht eingespart werden können.

Soweit uns bekannt, ist die dies das erste mikro-integrierte MOPA Konzept mit geringer Linienbreite, welches eine Ausgangsleistung im Watt Bereich liefert und die anspruchsvollen Anforderungen von Weltraumapplikationen (wie mechanische Stabilität, kleine Abmessungen und Effizienz) berücksichtigt.

Wir denken, dass dieses Konzept erhebliche Vorteile gegenüber optisch gepumpten Festkörperlasern bietet, die bereits für die kohärente optische Datenübertragung im All verwendet werden. Vorteile dieses Konzeptes sind: eine kleinere Abmessung, eine höhere mechanische Stabilität, eine höhere Effizienz und die Möglichkeit Halbleiterlaser direkt mit hoher Modulationsbandbreite (bis in den GHz-Bereich hinein) modulieren zu können. Halbleiterlaser können auch mit hoher Regelbandbreite (bis zu einigen MHz) frequenzstabilisiert werden, was einen Vorteil gegenüber Festkörperlasern darstellt. Das entwickelte System hat das Potential, die „Performance" zukünftiger kohärenter optischer Systeme erheblich zu verbessern.

Umwelttests

Um die MOPA Module im Hinblick auf eine Qualifizierbarkeit für die Raumfahrt zu beurteilen wurden Vibrationstests, Temperaturwechselbelastungen und Dauertests durchgeführt.

Vibrationstests wurden in mehreren Belastungsstufen durchgeführt (8 g_{rms}, 21 g_{rms}, 29 g_{rms}, 3 Achsen). Außerdem wurden Schocktests mit 1000 g (3 Achsen) durchgeführt. Diese Spezifikationen sind nach unserem Wissen ausreichend für eine Qualifizierung als Bauteil in einem „Laser Communication Terminal". Die getesteten MOPA Module haben diese Spezifikationen ohne eine messbare Veränderung der Ausgangsleistung, des optischen Spektrums, der Linienbreite oder einer sonstigen Beeinträchtigung überstanden und haben diesen Test damit erfolgreich bestanden.

Temperaturwechselbelastungen wurden in zwei Stufen durchgeführt. Zunächst wurden

die Module 105 Zyklen zwischen –25°C und +60°C ausgesetzt. Nach dieser Belastung fiel die Ausgangsleistung bei dem getesteten Modul leicht von 1,3 auf 1,18 W ab (I_{MO} = 200 mA, I_{Pre} = 200 mA, I_{TA} = 2000 mA, T = 25°C). Die spektralen Eigenschaften und die Linienbreite veränderten sich allerdings nicht wesentlich. Vermutlich hat sich die Kopplung zwischen MO und PA durch die Belastungen leicht verschlechtert. Eine weitere verschärfte Belastung mit 43 Zyklen von -40°C bis +85°C veränderte die Eigenschaften jedoch nicht weiter.

Dauertests zweier Module über 1000 h (I_{MO} = 200 mA, I_{Pre} = 200 mA, I_{TA} = 2000 mA, T = 25°C) zeigten einen leichten Leistungsabfall bei einem Modul und keine Veränderung der Ausgangsleistung bei einem weiteren Modul. Der Abfall der Ausgangsleistung des einen Moduls ist allerdings so gering, dass extrapoliert nach 7000 h die Ausgangsleistung immer noch 80% des Ausgangswertes entsprechen würde. Die spektralen Eigenschaften sowie die Linienbreite änderten sich nicht wesentlich.

Die MOPA-Module übertreffen die durch das Projekt vorgegebenen Ziele.

Berlin, den 03.01.2012