



Titel:

Zuwendungsempfänger: Ferdinand-Braun-Institut,
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
im Forschungsverbund Berlin e.V.
Gustav-Kirchhoff. Str. 4
12489 Berlin

Förderkennzeichen: 16SV5061

Vorhabensbezeichnung: Durchstimmbarer-Mikrosystem-Diodenlaser
DuMiDiL

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2010 – 30.06.2011

Berichtszeitraum: 01.04.2010 – 30.06.2011

Abschlussbericht

Institutsleiter: Prof. Dr. G. Tränkle

Projektleiter: Dr. Bernd Sumpf

Bearbeiter: Ralf Staske

Ahmad Bawamia

Arnim Ginolas

Gunnar Blume

1. Zielstellung und Grundkonzept

Spektral schmalbandige, durchstimmbare Diodenlaser werden für Anwendungen wie die interferometrische Längenmesstechnik, die Absorptionsspektroskopie an Gasen oder die Raman-Spektroskopie benötigt. Derartige Systeme basieren typischer Weise auf External Cavity Lasern. Die Durchstimmung wird dabei über die mechanische Drehung von externen Gittern realisiert. Dieses Grundprinzip erfordert relativ große Aufbauten und ist nicht sehr robust. Für industrielle Anwendungen sind derartige Lichtquellen oft zu teuer.

Das Projekt DuMiDiL hatte sich zum Ziel gestellt ein neuartiges Konzept für spektral durchstimmbare schmalbandige Lichtquellen auf Basis eines Diodenlasers in externem Resonator (ECL) zu untersuchen. In einem an die Anwendungen angepassten Spektralbereich erfolgt die schmalbandige Durchstimmung der Lichtquelle ausschließlich über den Anregungsstrom ohne bewegliche Teile. Der ECL wird als optisches Mikrosystem auf einer Grundfläche kleiner als 5 mm x 10 mm realisiert. Um die Lichtquelle vor Umwelteinflüssen zu schützen, wird das gesamte System mit Silicon basierendem Material (SilGel®) verkapselt. Auf eine zusätzliche Hermetisierung kann damit verzichtet werden.

Ziel war die Emissionswellenlänge des Helium:Neon-Lasers von ca. 632.8 nm. Eine durchstimmbare Lichtquelle bei dieser Wellenlänge besitzt ein großes Marktpotential in der interferometrischen Messtechnik.

Die angestrebten elektro-optischen Zielspezifikationen der DuMiDiL-Lichtquelle sind im Folgenden zusammengefasst:

Zentrale Wellenlänge:	λ	=	(633 ± 1) nm
Durchstimmbereich:	$\Delta\lambda$	=	50 pm (40 GHz)
Emissionslinienbreite:	$\delta\lambda$	≤	0.015 pm (10 MHz)
Ausgangsleistung:	P_{op}	=	5 mW
Leistungsaufnahme:	P_{el}	≤	1 W

Die Linienbreite der Lichtquelle bestimmt über die Kohärenzlänge den möglichen Längenmessbereich¹. Basierend auf der angestrebten Linienbreite würde dann die Kohärenzlänge (und damit der maximal mögliche Längenmessbereich) etwa 12 m betragen. Die spektrale Durchstimmung soll über einen Bereich von 40 GHz erfolgen. Die kleinste Länge, die mit dem Laser gemessen werden kann^{2,3} würde dann 4 mm betragen. Bei einer typischen Messgenauigkeit für interferometrische Längenmessungen mit durchstimmbaren Lasern von einigen 10^{-6} (Refs. ^{4,5}) sind Genauigkeiten bis in den nm-Bereich mit einer solchen Strahlquelle möglich.

Der Aufbau des ECDLs ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Resonator der Lichtquelle wird von der Frontfacette des Halbleiter-Gewinnmediums und dem Reflexions-Bragg-Gitter (RBG) gebildet. Die spektrale Akzeptanzbreite des RBGs begrenzt den Durchstimmbereich der Lichtquelle. Die angestrebte geringe Emissionslinienbreite wird durch einer Laserkavität möglichst hoher Güte realisiert. Dementsprechend muss die Reflektivität des RBGs und die Frontfacettenreflektivität des Halbleiter-Gewinnmediums R_f möglichst groß gewählt werden. Die hier vorgestellten haben ein $R_f = 30\%$ bzw. $R_f = 70\%$.

¹ A. Abou-Zeid „Diodenlaser für die interferentielle Längenmesstechnik“ *PTB-Mitteilungen* **120**, 95-104 (2010)

² L.L. Deck „Absolute distance measurements using FTPSI with a widely tunable IR laser“ *Proceedings of SPIE* Vol. **4778**, 218 - 226 (2002)

³ L.L. Deck „Fourier-Transform phase-shifting interferometry“ *Applied Optics*, **42**, 2354 -2365 (2003)

⁴ F. Pollinger, K. Meiners-Hagen, A. Abou-Zeid „Absolutlängen mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometrie“, *PTB-Mitteilungen* **120**, 105 – 109 (2010)

⁵ Th. Kinder, K.-D. Salewski „Absolute distance interferometer with grating-stabilized tunable diode laser at 633 nm“, *Journal of Optics A* **4**, 364 – 368 (2002)

Die Rückfacette der Dioden ist mit einer Reflektivität $R_r \leq 5 \times 10^{-4}$ antireflexionsbeschichtet.

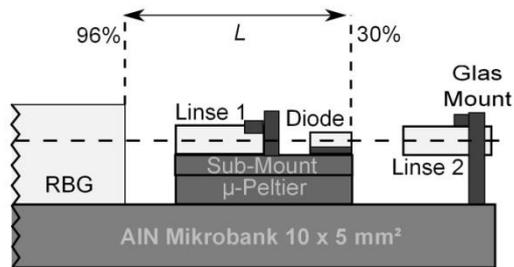


Abb. 1: Grundkonzept der realisierten Mikrosystemlichtquelle

Die Linse 1 kollimiert den aus dem Halbleiter kommenden divergenten Strahl auf das RBG und fokussiert den reflektierten Strahl in die aktive Zone der Diode zurück. Die Linse 2 dient der Kollimation des für den Anwender nutzbaren Strahls.

Damit innerhalb der Akzeptanz des RBGs von 50 pm nur eine Mode anschwingt, sollte der Modenabstand im Resonator größer als 50 pm sein. Das erfordert eine optische Länge von kleiner als 4 mm.

Durch die Einbettung des Resonators in ein Silicon-basiertes Material müssen Linsen verwandt werden, die in einer Umgebung mit einem Brechungsindex $n = 1.4$ eingesetzt werden können. Das Grundprinzip der Gradientenlinse, die über eine wohldefinierte Änderung der Brechzahl entlang des radialen Abstandes eine Kollimation erreicht, erlaubt den Einsatz derartiger Linsen als Kollimatoren.

Im Folgenden werden nun die im Projekt in den einzelnen Arbeitspaketen erzielten Ergebnisse vorgestellt.

2. Durchgeführte Arbeiten

2.1. Arbeitspaket 1 – Simulationsrechnungen zum optischen Design

Die Resonatorlänge des ECLs darf eine optische Länge von 4 mm nicht überschreiten. Es wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, die zu einer Auswahl der möglichen optischen Komponenten führten. Dazu gehörten zum einen die verwendbaren Gradientenlinsen und zum anderen die maximale Länge der Halbleiter-Gewinnmedien. Für die ausgewählten Teile wurden dann die Positionen auf der Mikrobank bei Verkapselung mit SilGel[®] bestimmt. Ebenfalls berechnet wurden die Strahlengänge bei Abbildung in Luft. Die Simulationsrechnungen erfolgten mit dem Programm WinABCD.

Das zur Herstellung der Gewinnmedien verwendete Lasermaterial basiert auf einem GaInP Doppel-Quantenwell, der in 500 µm AlGaInP Wellenleiterschichten eingebettet ist. Diese Struktur führt zu einer vertikalen Divergenz der Diodenlaser von 32° (full-width at half-maximum – FWHM) bzw. 55° (95% Leistungseinschluss). Die laterale Divergenz ist mit ca. 10° (95%) deutlich geringer. Entsprechend des größeren vertikalen Winkels ist eine Optik mit einer numerischen Apertur von mindestens 0.46 erforderlich.

Aus den Standard-Linsen der Firma Gritech wurde die Linse GT-FLRL-050-023-50 mit einer numerischen Apertur von 0.55 ausgewählt. Im Idealfall wird damit Licht aus einem Gesamtwinkel von 67° eingesammelt. Nach dieser einfachen geometrischen Abschätzung wird etwa 1.5% der Leistung pro Durchgang von der Linse abgeschnitten. Der vom Hersteller spezifizierte Arbeitsabstand, d.h. die Distanz zwischen Facette des Diodenlasers und der Linse, beträgt 0.06 mm. Die Linse besitzt eine Brennweite von 0.44 mm. Alle Werte sind für den Betrieb in Luft angegeben. Die Länge der Linse ist 1.02 mm. Der Brechungsindex im Zentrum der Gradientenlinse wird mit 1.629 angegeben.

Um die optische Resonatorlänge bei Verkapselung in SilGel[®] zu ermitteln wurden in der

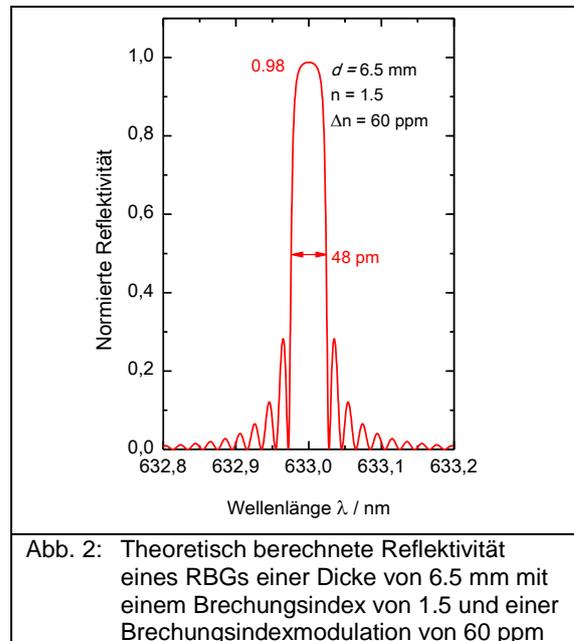
folgenden Tabelle die Daten für die einzelnen Komponenten im Resonator zusammen gestellt. Der Brechungsindex für die Gradientenlinse ist der für das Zentrum der Linse angegebene Wert. Für SilGel[®] wurde der von der Firma angegebene Wert von $n = 1.4$ für Raumtemperatur angenommen.

Tabelle 1: Optische Weglängen im External Cavity Laser - Die Brechungsindizes der einzelnen Materialien sind den entsprechenden Datenblätter der Hersteller entnommen. Der Abstand GRIN-Linse RBG wird unter Berücksichtigung der maximalen optischen Länge des Resonators gewählt.

	L mm	n	L_{opt} mm
Distanz Facette Diodenlaser – GRIN-Linse	0.06	1.4	0.084
GRIN-Linse	1.02	1.629	1.662
Distanz GRIN-Linse - RBG	0.06	1.4	0.084
Summe			1.830

Bei einer maximal zulässigen optischen Länge von 4 mm darf das Halbleitergewinnmedium nur eine optische Länge 2.17 mm besitzen. Mit dem experimentell ermittelten Wert für den effektiven Gruppenindex von 4.26 folgt somit eine maximale Länge des Gewinnmediums von 510 μm . Dementsprechend wurde diese zu 500 μm ausgewählt.

Das RBG sollte entsprechend den obigen Anforderungen eine spektrale Halbwertsbreite von 50 pm und eine Reflektivität größer von 95% besitzen. Entsprechend spezifiziert wurde es bei der Firma Optigrate bestellt. Abbildung 2 zeigt ein simuliertes Reflektionspektrum. Angenommen wurde eine Länge des Gitters von 6.5 mm, ein Brechungsindex des Materials von 1.5 und eine Modulation des Brechungsindex im Gitter von 60 ppm (60×10^{-6}). Zu erkennen ist, dass eine maximale Reflektivität von 0.98 und eine Halbwertsbreite von 48 pm erreicht werden kann.



Die im Resonator wirksame Reflektivität des RBG wird durch die begrenzte NA der Linse auf einen Wert von etwa 90% reduziert. Weiterhin führt die nicht perfekte Kollimation zu Einkoppelverlusten des vom RBG kommenden Lichts in den Rippenwellenleiter. Auf Grund dieser Verluste kann vom RBG nur etwa 80% der Leistung wieder in das Gewinnmedium zurückgekoppelt werden.

Den angestrebten optischen Aufbau bei Verkapselung mit SilGel[®] zeigt Abbildung 3. Gezeigt wird die Ansicht in Draufsicht, d.h. in der slow axis der Emission im oberen Teil der Darstellung und in der Seitenansicht, d.h. in der fast axis im unteren Teil der Abbildung. Es wurden die in Tabelle 1 genannten Komponenten und ein Halbleiter-Gewinnmedium der Länge von 500 μm und einer Streifenbreite von 5 μm verwandt. Zur besten Kollimation der Strahlung aus dem Diodenlaser muss bei Einbettung der Optiken in SilGel[®] der Abstand der Linsen von den Facetten des Halbleiters 95 μm im Unterschied zu Luft betragen.

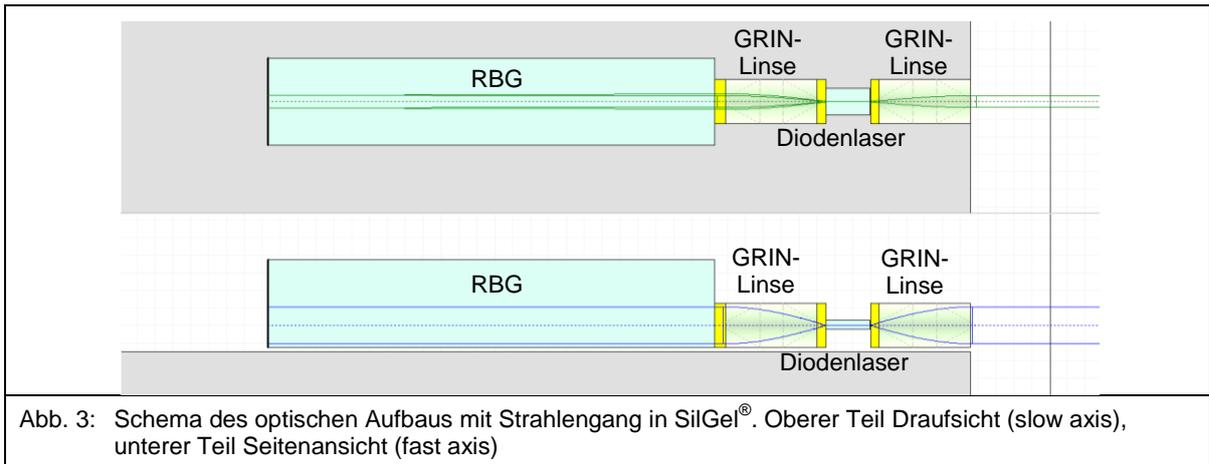


Abb. 3: Schema des optischen Aufbaus mit Strahlengang in SilGel[®]. Oberer Teil Draufsicht (slow axis), unterer Teil Seitenansicht (fast axis)

Bei der Montage einer zu verkapselnden Bank ist zu beachten, dass beim Positionieren der Linsen auf den SilGel[®]-Arbeitsabstand von 95 μm der Laser nicht anschwingt. Erst das Einbringen des Silicon-Gels führt zur Kollimation des Strahles und damit zum Erreichen der Laserschwelle. Damit erfordert dieser Montageschritt eine sehr hohe Präzision.

2.2. Arbeitspaket 2 – Herstellung von 633 nm Gewinnmedien für die Mikrosystem Laserlichtquelle; Charakterisierung von Referenzlasern

In diesem Arbeitspaket wurden die elektro-optischen und spektralen Parameter von Referenzlasern und die Zuverlässigkeit von in SilGel[®] verkapselten Lasern der Chargen A1582-6-1 und A1582-6-2 untersucht. Diese Chargen besaßen eine ähnliche Vertikalstruktur wie die Charge A2037-6-1, die für die gezeigten Mikrosystem-Lichtquellen benutzt wurde.

2.2.1. Elektro-optische und spektrale Untersuchung von Referenzlasern

Im Projekt wird eine geringe spektrale Linienbreite gefordert, die über eine möglichst hohe Resonatorgüte, d.h. über eine hohe Facetten-Reflektivität, erreicht werden soll. Bei Halbleiterlasern wird die Rückfacette typischer Weise mit einer Reflektivität von 96% verspiegelt. Damit ist die Güte nur über die die Reflektivität der Frontfacette R_f zu steuern. Andererseits reduziert ein großes R_f die Ausgangsleistung.

Aus Gründen der erreichbaren Resonatorgüte kommen nur Lichtquellen mit einer Frontfacetten-Reflektivität größer 30% in Frage. Diese sollte aber einen Wert von 70% auch nicht übersteigen, da sonst eine deutliche Verringerung der erreichbaren Ausgangsleistung auftritt. Dementsprechend werden im folgenden Diodenlaser mit $R_f = 30\%$ und $R_f = 70\%$ diskutiert.

Abb. 4 zeigt für Diodenlaser mit den zwei unterschiedlichen Frontfacetten-Reflektivitäten $R_f = 30\%$ und 70% gemessene Leistungs-Strom-Kennlinien bei $T = 15^\circ\text{C}$. Der Schwellenstrom des Laser mit $R_f = 30\%$ beträgt $I_{th} = 32 \text{ mA}$, die Steilheit $S = 0.81 \text{ W/A}$. Wie aus der Simulation erwartet, ist für das Bauelement mit $R_f = 70\%$ ist die Schwelle mit $I_{th} = 29 \text{ mA}$ und die

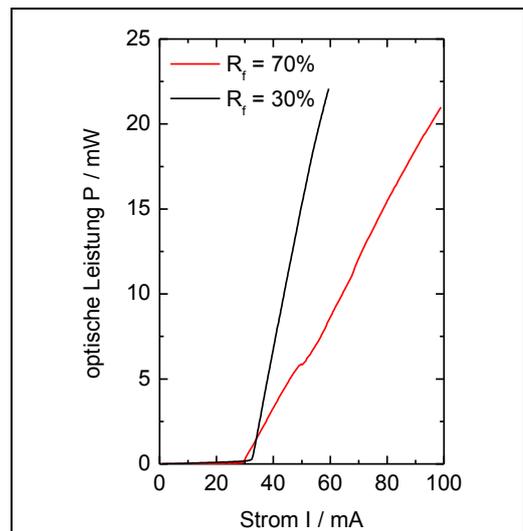
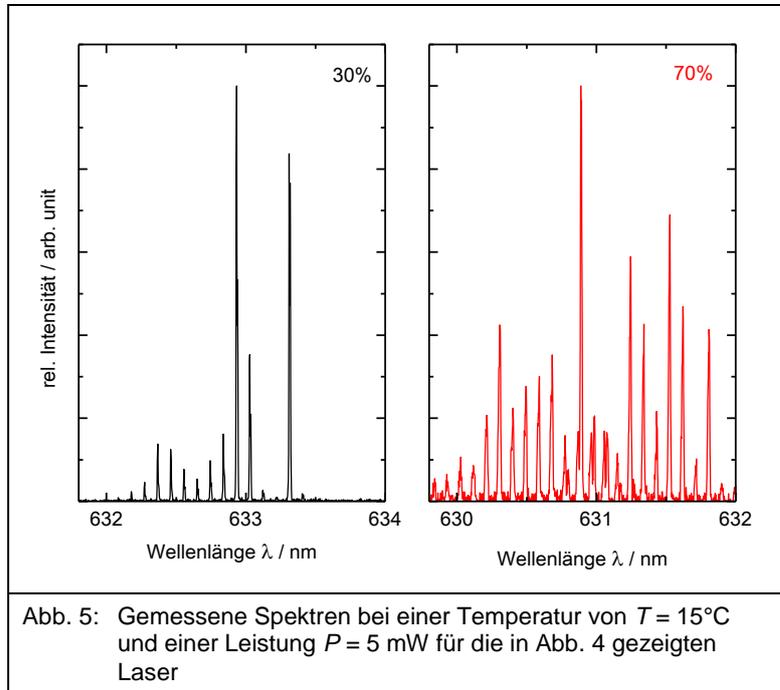


Abb. 4: Vergleich der experimentellen Leistungs-Strom-Kennlinie für Diodenlaser mit $L = 500 \mu\text{m}$, $W = 5 \mu\text{m}$, $R_f = 30\%$ oder 70% , $R_r = 96\%$ bei $T = 15^\circ\text{C}$

Steilheit mit $S = 0.3 \text{ W/A}$ im Vergleich zu dem Laser mit $R_f = 30\%$ geringer. Beide Laser erreichen eine maximale Ausgangsleistung größer 20 mW . Die Zielleistung im Projekt von $P = 5 \text{ mW}$ wird 38 mA (30%) bzw. 46 mA (70%) erreicht.

Abbildung 5 zeigt mit einer Auflösung von 7 pm gemessene Spektren für die beiden oben gezeigten Laser bei einem Anregungsstrom von 50 mA und einer Temperatur von 15°C . Zu erkennen ist für beide Laser, dass die Güte des Resonators zu einer deutlichen Ausprägung eines Modenkamms und zur Trennung der einzelnen Moden führt. In beiden Fällen beträgt der mittlere Abstand zwischen zwei Moden im gezeigten Bild $\Delta\lambda = 94 \text{ pm}$. Damit folgt für den effektiven Gruppenindex ein Wert von 4.26 .

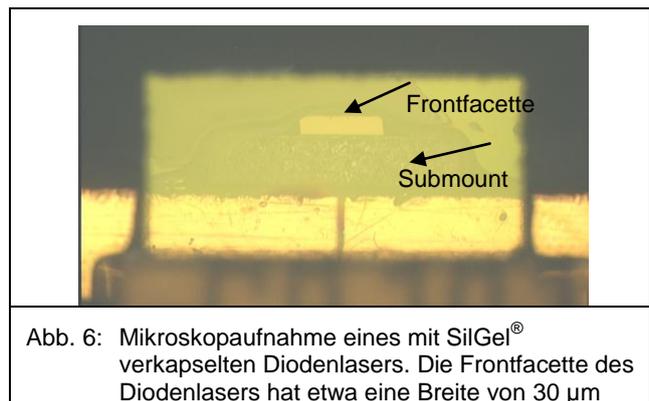


Die Messungen an den Referenzlasern zeigen, dass sowohl bei einer Frontfacetten-Reflektivität von $R_f = 30\%$ oder $R_f = 70\%$ und $R_f = 96\%$ die Laser die geforderten $P = 5 \text{ mW}$ Ausgangsleistung erreichen. Ebenfalls ausreichend ist die Güte des Resonators um die angestrebten spektralen Eigenschaften zu erhalten. Aus diesem Grund wurden die Experimente zu den Diodenlasern in externer Kavität sowohl mit Dioden einer Frontfacetten-Reflektivität von $R_f = 30\%$ als auch $R_f = 70\%$ durchgeführt.

2.2.2. Verkapselung von Diodenlasern mit SilGel®

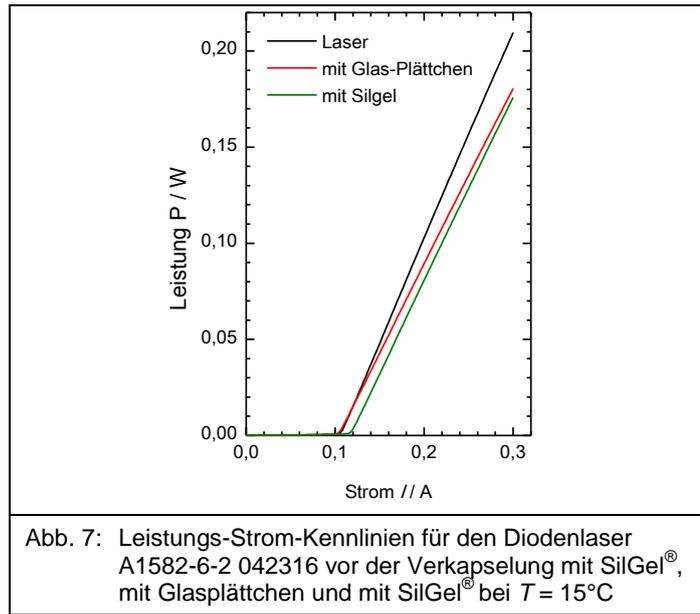
Vor die Laser wurden auf einem Sockel Glas-Plättchen geklebt, die zusammen mit der Frontfacette des Lasers einen Spalt bilden, der dann mit SilGel® verfüllt wurde. Die Abbildung 6 zeigt eine entsprechende Mikroskopaufnahme für einen der eingekapselten Laser.

In der Aufnahme ist deutlich die Frontfacette des Diodenlasers zu erkennen, die rau erscheinende Oberfläche des Submounts und das Rechteck des VBGs. An einige Stellen der Aufnahme, z.B. im Bereich rechts oben erkennt man Bereiche, die nicht mit SilGel® verfüllt worden, aber auch deutlich entfernt vom Diodenlaser sind. Dieser ist an der Frontfacette vollständig in das Silicon-basierte Material eingebettet.



Die Kennlinien aller Diodenlaser wurden vor Montage des Glasplättchens, danach und nach Verfüllung des Spaltes mit SilGel® vermessen. Das Ergebnis für den Laser A1582-6-2 042316 ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Diodenlaser selbst hat einen Schwellenstrom $I_{th} = 105 \text{ mA}$ und eine Steilheit von $S = 1.1 \text{ W/A}$. Mit dem Plättchen bleibt

die Schwelle konstant, aber die Steilheit sinkt etwas auf $S = 0.9 \text{ W/A}$. Damit kommt es zu einer Verringerung der maximalen Ausgangsleistung. Ursache dafür Streuung der Emission im Glas-Plättchen sein. Nach Verfüllung des Spaltes mit SilGel® steigt der Schwellenstrom auf $I_{th} = 120 \text{ mA}$ während die Steilheit sich wieder auf $S = 1.0 \text{ W/A}$ erhöht. Ursache ist die Veränderung der Frontfacetten-Reflektivität des Diodenlasers durch die geänderte optische Umgebung. Während in Luft mit $n = 1$ der Laser eine Reflektivität $R_f = 30\%$ besitzt, liefert die Beschichtung in SilGel® ($n = 1.4$) ein $R_f = 21\%$. Wie zu erwarten erhöht sich der Schwellenstrom und die Steilheit.



2.2.3. Zuverlässigkeit der verkapselten Diodenlaser

Im Folgenden werden die Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von mit SilGel® verkapselten Diodenlasern vorgestellt werden. Sie erfolgten an drei Breitstreifenlasern mit einer Streifenbreite von $30 \mu\text{m}$ und Längen von $750 \mu\text{m}$ (2 Stück) und $1500 \mu\text{m}$ (1 Stück). Die Frontfacetten-Reflektivitäten betragen 6% , 10% bzw. 30% . Diese Laser waren auf CuW Submounts und C-Mounts montiert worden.

Die Leistung für die Alterungsuntersuchungen von $P_{rel} = 200 \text{ mW}$ wurde so gewählt worden, dass die angestrebte Zilleistung im ECL verifiziert werden konnte. Dabei sind die in Tabelle 2 zusammengefassten Daten zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Daten der drei verkapselten Diodenlaser mit einer Streifenbreite von $30 \mu\text{m}$
 P_{op} – angestrebte Leistung des ECLs, p_{op} - Leistungsdichte ECL
 P_{rel} – Leistung im Alterungstest, p_{rel} - Leistungsdichte im Alterungstest

Laser	$W / \mu\text{m}$	$L / \mu\text{m}$	$R_f, \%$	FB	P_{op} / mW	$p_{op} / \text{MW/cm}^2$	P_{rel} / mW	$p_{rel} / \text{MW/cm}^2$
ECL-Systeme	5	500	70	5.7	5	0.1		
		500	30	1.9				
042316	30	750	30	1.9			200	0.67
042513		750	10	1.2				
042301		1500	6	1.1				

Bezüglich der Zuverlässigkeit der Bauelemente im Bereich der Facette spielen zwei physikalische Größen eine Rolle:

- die optische Leistungsdichte der emittierten Laserstrahlung $p = P / A$ mit P der emittierten Leistung und A der Fläche des emittierenden Gebietes
- die Facettenbelastung $FB = \frac{P_{fac}}{P_{out}} = \frac{1+R_f}{1-R_f}$ mit der Frontfacetten-Reflektivität R_f .

Die Tabelle zeigt, dass die Facettenbelastung für die ECL-Systeme auf Grund des großen R_f im Vergleich mit den Referenzlasern sehr groß ist. Im Alterungstest wird die durch eine höhere optische Leistungsdichte von 0.67 MW/cm^2 ausgeglichen.

Das Ergebnis des Alterungstests ist in Abbildung 8 dargestellt. Die ersten beiden Dioden sind nach etwa 1000 h bzw. 1600 h ausgefallen sind. Die dritte lief fehlerfrei über 6450 h . Die genauen Daten der Alterung sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

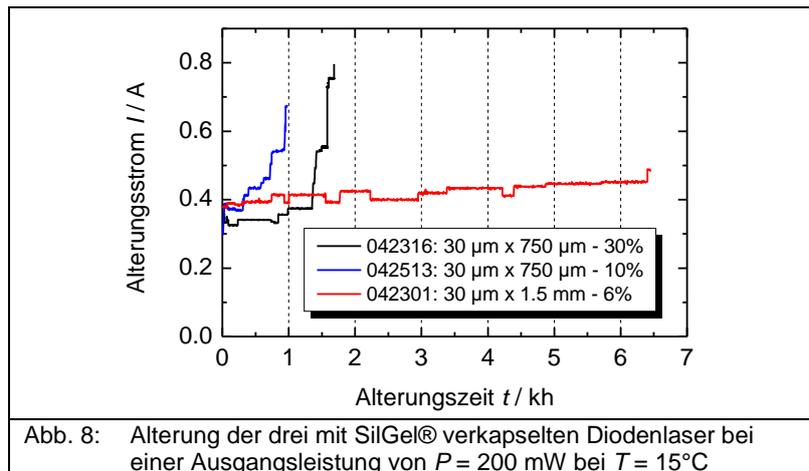


Tabelle 3: Alterungsergebnis für die drei verkapselten Diodenlaser
Die zu erreichende Facettenlast p_{rel} für die ECL Quellen beträgt 0.1 MW/cm^2 , t_{rel} – fehlerfrei Alterungszeit, t_{op} – fehlerfreier Betrieb bei p_{OP} und gegebenem R_f , $p_{\text{rel-korr}}$ – mit der Facettenbelastung korrigierte Leistungsdichte für ECL für fehlerfreien Betrieb über t_{rel} für einen Laser mit R_f

Laser	R_f	$R_f = 70\%$			$R_f = 30\%$	
		t_{rel} h	$p_{\text{rel-korr}}$ MW/cm ²	t_{op} h	$p_{\text{rel-korr}}$ MW/cm ²	t_{op} h
042316	30%	1680 h	0.22	18000 h	0.67	130000 h
042513	10%	980 h	0.14	2100 h	0.44	30000 h
042301	6%	≥ 6450 h	0.13	12000 h	0.40	150000 h

Die Leistungsdichte $p_{\text{rel-korr}}$ berücksichtigt die unterschiedlichen Facettenbelastungen bei den unterschiedlichen Werten für R_f . Er gibt die Leistungsdichte an, für die über die angegebene Zeit t_{rel} ein zuverlässiger Betrieb möglich ist. Damit kann dann der Beschleunigungsfaktor

$$\pi_p = \left(\frac{p_{\text{rel-korr}}}{p_{\text{op}}} \right)^\beta$$

bestimmt werden über den dann die Zeit für den fehlerfreien Betrieb bei $p_{\text{op}} = 0.1 \text{ MW/cm}^2$ t_{op} ermittelt wurde. Für β wurde ein Wert von 2.3 benutzt, der für Diodenlaser bei 808 nm ermittelt wurde⁶. Mit diesen Werte konnte dann für ECLs mit $R_f = 70\%$ eine mean time to failure MTTF von 10000 h berechnet werden, mit $R_f = 30\%$ sogar MTTF = 100000 h.

Zur Untersuchung der Fehlerursachen wurden die Facetten der Diodenlaser mittels Elektrolumineszenz-Aufnahmen untersucht. Tabelle 4 zeigt Mikroskopaufnahmen des aktiven Streifens der drei Dioden bei Anregung unterhalb der Laserschwelle. Die Aufnahmen vor der Alterungsuntersuchung zeigen eine homogene Ausleuchtung des Streifens. Die Aufnahme für den Laser 042316, der mit der höchsten Facettenbelastung gealtert wurde nach dem Ausfall ein kleiner dunkler Spot (siehe Pfeil) beobachtet, der einen Defekt anzeigt. Die bei geringer Facettenlast gealterten Laser zeigen weiterhin eine homogene Ausleuchtung des Streifens. Es gibt hier keinen Hinweis auf einen Facettenfehler.

Der Ausfall des Lasers 042513 ist auf Darklines an der Rückfacette begründet. Dies zeigt die ebenfalls in Tab. 4 dargestellte Kathodolumineszenz-Aufnahme. Im Bereich der Rückfacette beginnen mehrere Darklines, die bis 484 μm in den Resonator hinein laufen.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass eine Verkapselung der Bauelemente mit SilGel® keinen negativen Einfluss auf die Facette des Lasers hat. Bei einer Facettenbelastung von 0.1 MW/cm^2 können Lebensdauer größer 10000 h abgeschätzt werden, die die Projektzielstellungen erfüllen.

⁶ K. Häusler, U. Zeimer, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle, „Degradation model analysis of laser diodes“, *J. Mater. Sci: Mater Electron* 19 160-164 (2008)

Tabelle 4: Elektrolumineszenzaufnahmen der in SilGel® verkapselten Diodenlaser vor und nach der Alterung

Lasertyp	Elektrolumineszenzbild vor der Alterung	Elektrolumineszenzbild nach der Alterung	Kathodolumineszenzbild nach der Alterung
042513			
042316			
042301			

2.3. Arbeitspaket 3 – Design der AlN-Mikrobänke

In diesem Arbeitspaket wurden die für die ECL Laser benötigten AlN Mikrobänke konzipiert. Eine schematische Draufsicht auf die Bank ist in Abbildung 9 dargestellt.

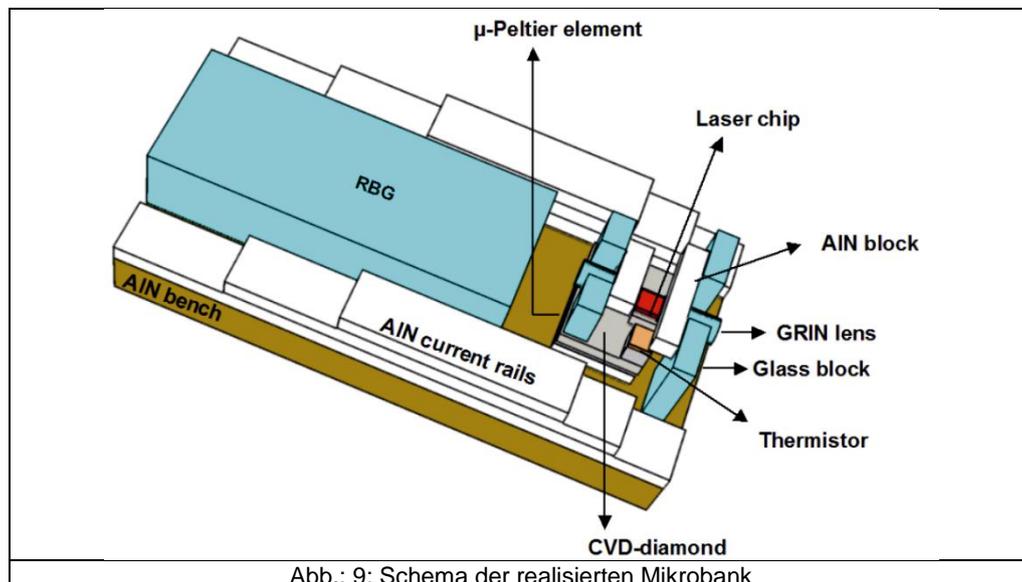


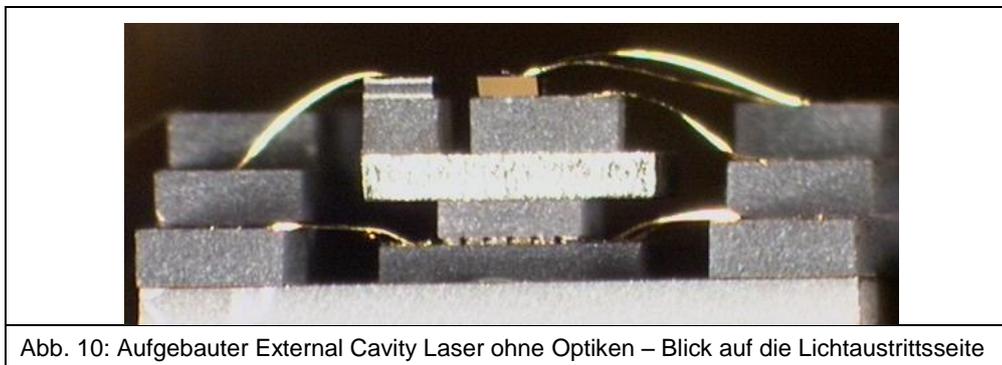
Abb.: 9: Schema der realisierten Mikrobank

Die Mikrobank hat eine Breite von 5 mm und eine Länge von 10 mm. Die drei Ebenen „AlN current rails“ dienen den elektrischen Anschlüssen für den Diodenlaser, das µ-Peltier-Element und dem Thermistor. Die Temperierung des Diodenlasers erfolgt mit einem Peltier-Element „Nextreme: OptoCooler™ hv14“. Dieses hat eine maximale Kühlleistung von 1.7 W bei einer Grundfläche 1.52 mm x 1.79 mm. Es ist mit nur 0.57 mm sehr dünn. Auf der Mikrobank wurden mittels Laser Justagemarkierungen für passive Montage geschrieben.

Die passive Montage der Mikrobänke lässt sich in folgende Arbeitsschritte unterteilen:

1. Montage der drei Bondstützpaare (AlN current rails)
2. Lötung des Peltierelementes auf die AlN Grundplatte (Flip-Chip-Bonder) und Bondung der Stromanschlüsse.
3. Lötung eines Diamant-Submounts auf die „kalte“ Seite des Peltier-Elementes.
4. Der Diodenlaser-Chip wird auf einem Diamant Submount aufgelötet.
5. Ebenfalls am Flip-Chip-Bonder wird der Diodenlaser auf Diamant auf das Peltier-Element gelötet.
6. Bondung der Stromanschlüsse an den Diodenlaser.
7. Klebung des Thermistors
8. Bondung der Stromanschlüsse an den Thermistor.

Eine Frontansicht eines so entstandenen Moduls ist in der Abbildung 10 dargestellt.



2.4. Arbeitspaket 4 – Aktive Montage der Mikrobänke und Charakterisierung

Die Montage der GRIN-Linsen und des RGB auf dem im Arbeitspaket 3 gefertigten Modul erfolgt aktiv, also im Lumineszenz- bzw. Laserbetrieb des Gewinnmediums. Dabei wird während der Montage die Leistungs-Strom-Spannung-Kennlinien der Bauelemente, das Emissionsspektrum und die Eigenschaften des kollimierten Strahls vermessen. Die Justage der optischen Elemente erfolgt primär anhand der Strahleigenschaften und des spektralen Verhaltens. Die vorjustierten optischen Elemente werden mittels UV-härtenden Klebers fixiert.

In Abb. 11 werden die Leistungs-Strom-Kennlinien von drei ECLs verglichen. Gezeigt wird die Charakteristika von zwei unverkapselten Systemen mit Gewinnmedien mit $R_f = 30\%$ und 70% sowie eines verkapselten Moduls mit einer Diode mit $R_f = 30\%$.

In den unverkapselten ECLs wurden der einzelnen optischen Komponenten an ihren entsprechend der aktiven Justage optimalen Position fixiert. Im Falle der eingebetteten Quelle wurden alle Optiken auf die theoretisch ermittelten Positionen (siehe Abschnitt 2.1) fixiert. Anschließend erfolgte das Verfüllen mit dem Silicon-Gel.

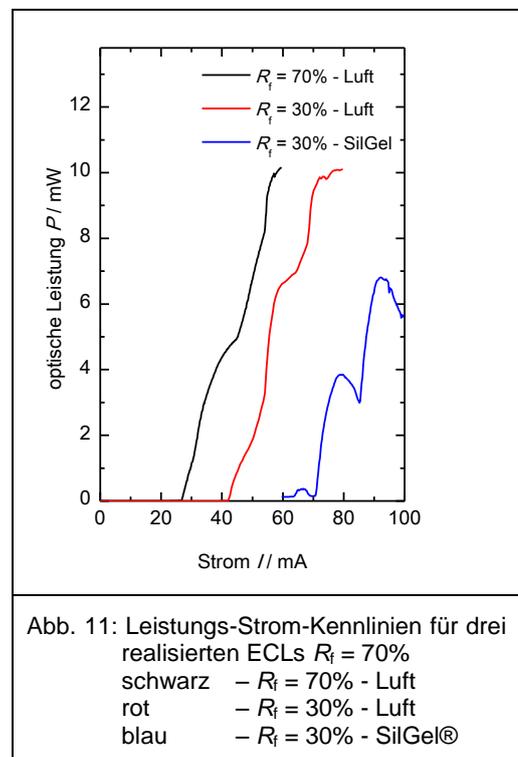


Tabelle 5 fasst die elektro-optische Daten zusammen. Die Steilheiten wurden jeweils von der Schwelle bis zu einer Leistung von $P = 5$ mW ermittelt.

Tabelle 5: Elektro-optische Daten von drei ECLs

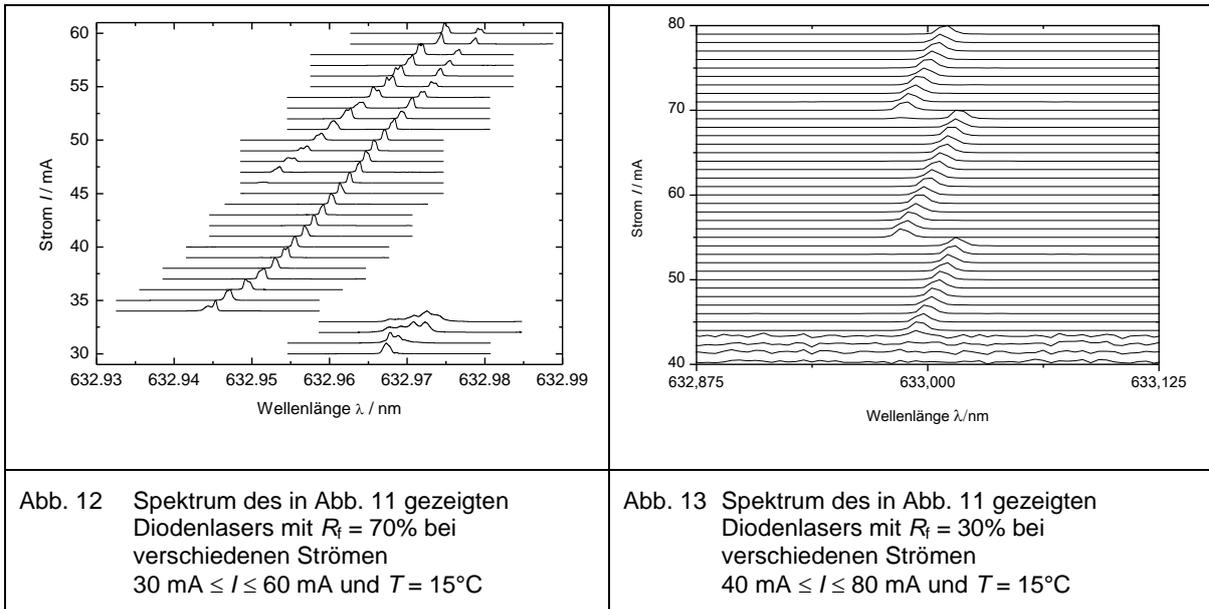
R_f %		I_{th} mA	S W/A	$I(5\text{ mW})$ mA	$P_{ei}(5\text{ mW})$ W
70	Luft	26	0.3	45	0.12
30	Luft	42	0.3	55	0.15
30	SilGel	71	0.2	87	0.25

Wie zu erwarten hat im Fall der nicht verkapselten ECLs, der mit $R_f = 70\%$ eine geringere Schwelle als der mit $R_f = 30\%$. Die Steilheiten sind identisch. Der verkapselte ECL besitzt eine deutlich höhere Schwelle. Dies ist wahrscheinlich auf die oben genannte Problematik der Platzierung der Linsen auf den theoretischen Positionen. Geringe Abweichungen vom Optimum können hier zu einer Verringerung des effektiven Reflexionskoeffizienten an der Rückseite des ECLs führen. Damit würde sich die Laserschwelle erhöhen.

Alle drei Quellen erreichen die im Projekt spezifizierte optisch Leistung von 5 mW, wobei die Leistungsaufnahme immer kleiner 250 mW. Selbst zusammen mit der in das Peltier-Element eingespeisten Leistung wird der Zielwert von 1 W elektrischer Leistung nicht überschritten.

2.5. Arbeitspaket 5 – Untersuchung des Durchstimmverhaltens und der Langzeitstabilität

Die Emissionsspektren der ECLs in Luft sind in den Abbildungen 12 und 13 dargestellt.



Wie Abbildung 12 zeigt, läuft der Laser mit $R_f = 70\%$ unterhalb eines Stromes von 34 mA (ca. 1.8 mW) auf zwei Moden. Oberhalb dieses Wertes bis etwa 46 mA (ca. 5.3 mW) arbeitet er einmodig. Der einmodige Durchstimmbereich zwischen den beiden Kinks beträgt 19 pm. Die Emissionslinienbreite im Bereich der Einmodigkeit wurde zu 5 MHz mittels eines angepassten Delayed Heterodyne Messplatzes bestimmt.

Die Änderungen des Emissionsspektrums korrelieren mit den Kinks in der in Abbildung 11 gezeigten Kennlinie, aber auch mit Veränderungen im lateralen Fernfeld der Lichtquelle. Dies ist in Abb. 14 gezeigt. Zu erkennen ist, dass bei Strömen unterhalb von 34 mA die Emission scheinbar unter zwei Winkeln erfolgt und erst oberhalb dieses Wertes die gesamte Leistung unter einem Winkelbereich abgestrahlt wird. Oberhalb von 46 mA sind wieder zwei Winkelbereiche zu erkennen. Dies lässt die Vermutung zu, dass die oben

gezeigten zwei Peaks jeweils mit der Emission unter unterschiedlichen Winkeln korrelieren. Um Single-Mode-Betriebes über einen größeren Spektralbereich zu erreichen, wurde das Einbringen einer zusätzlichen Modenblende in den Resonator erprobt. Der Durchstimmbereich konnte so auf etwa 30 pm erhöht werden, allerdings sank die erreichte Ausgangsleistung des ECLs auf etwa 3.8 mW. Damit wird die Zielspezifikation nicht mehr erreicht. Deshalb wurden Gewinnmedien mit $R_f = 70\%$ für die weiteren Arbeiten verworfen.

Die Spektren bei verschiedenen Anregungsströmen für einen ECLs mit $R_f = 30\%$ in Luft zeigt 13. Zu erkennen ist, dass der Laser über den gesamten Strombereich einmodig läuft. Von der Laserschwelle bis zum ersten Kink bei 55 mA emittiert der ECL auf einer Mode, springt dann auf die nächste, um dann beim nächsten Kink bei 69 mA wiederum auf die nächste Mode zu springen. Das spektrale Verhalten korreliert mit den in der Kennlinie aufgetretenen Kinks. Der spektrale Durchstimmbereich beträgt für den zuletzt genannten Bereich 34 pm, das sind 25 GHz. Die Durchstimmrate beträgt mit 2.35 pm/mA. Ebenfalls gemessen wurde die Seitenmoden-Unterdrückung. Sie war im Bereich von der Schwelle bis zu 10 mW besser als 25 dB.

Der im Vergleich zum Design der Quelle etwas geringere Durchstimmbereich entspricht einer optischen Länge des Resonators von 5.7 mm. Die kann durch eine gewisse Eindringtiefe des Lichts in das RBG begründet sein. In der Literatur sind für eine Modulation des Brechungsindex zwischen 50 ppm und 75 ppm Wege von 1.4 mm bis 2.1 angegeben worden. Die Verwendung von Gewinnmedien einer geringeren Länge und kürzerer Grin-Linse würde über die Verringerung der Resonatorlänge zu einer Vergrößerung des Durchstimmbereiches führen.

In Abbildung 15 ist die Abhängigkeit der Linienbreite vom Anregungsstrom dargestellt. In der Umgebung des Umschaltens zwischen den jeweiligen Moden im Bereich der Kinks beträgt die Linienbreite bis zu 15 MHz. Im Bereich zwischen den Kinks ist der Wert von etwa 8 MHz innerhalb der angestrebten Spezifikation des Projektes. Dem entspricht eine Kohärenzlänge von etwa 30 m.

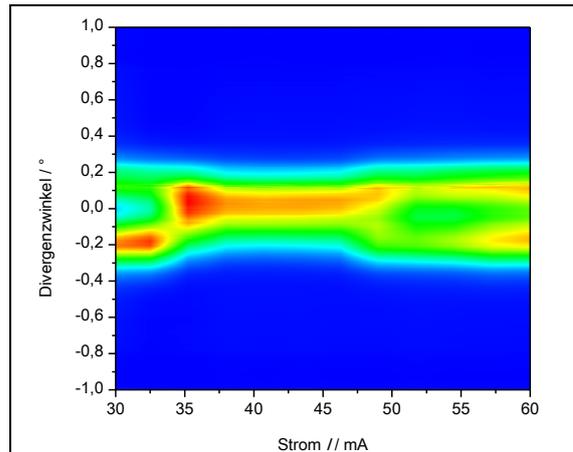


Abb. 14: Laterales Fernfeld des ECLs aus Abb. 12 in Abhängigkeit vom Strom rot – $P_{norm} = 1$; blau – $P_{norm} = 0$

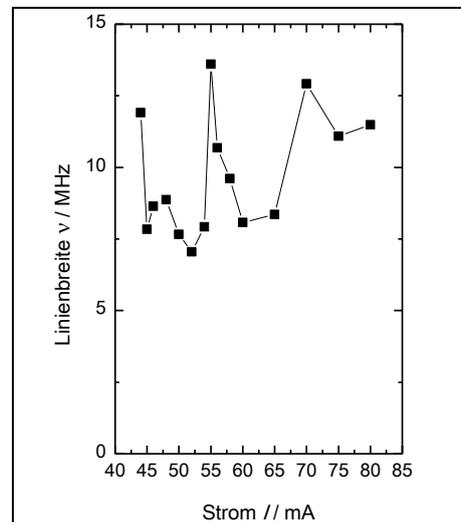


Abb. 15: Linienbreite des in Abb. 13 gezeigten ECLs bei verschiedenen Strömen $40 \text{ mA} \leq I \leq 80 \text{ mA}$ und $T = 15^\circ\text{C}$

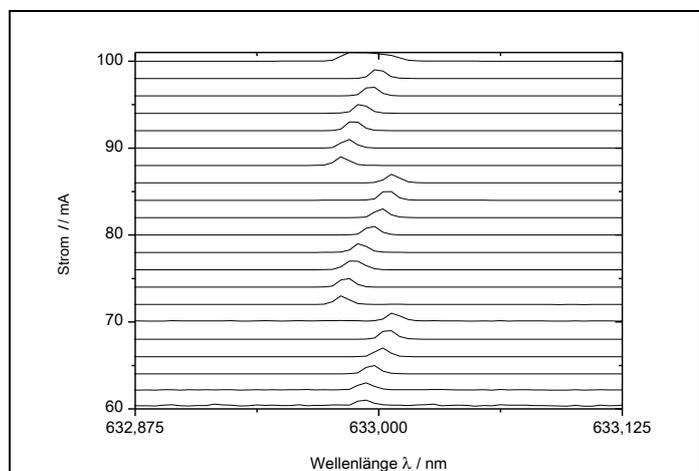


Abbildung 16: Spektrum des in Abb. 11 verkapselten ECLs bei verschiedenen Strömen $60 \text{ mA} \leq I \leq 100 \text{ mA}$ und $T = 15^\circ\text{C}$

Mit den dargestellten Ergebnissen wurde das vorgeschlagene Konzept verifiziert und die Zielspezifikationen des Projektes weitgehend erfüllt. Im Folgenden werden nun Messergebnisse für einen in SilGel® verkapselten ECL vorgestellt.

Das Spektrum für den verkapselten ECLs aus Abb. 11 ist in der Abb. 16 dargestellt. Zwischen den Modensprüngen beträgt der größte Durchstimmbereich 26 pm. Dieser im Vergleich zur Quelle ohne SilGel® kleinere Wert ist durch den höheren Brechungsindex des Gels im Vergleich zur Luft zu begründen. Innerhalb einer Mode erfolgt die Durchstimmung auch hier linear.

Die Linienbreite der Quelle liegt im Bereich von etwa 20 MHz. Die oben diskutierte Verringerung des Reflexionskoeffizienten der Rückseite könnte hier zu einer Verringerung der Güte des Resonators und damit zu der vergrößerten Linienbreite führen.

Trotz dieser zu verbessernden Punkte, konnte für die SilGel® verkapselte Quelle das Prinzip einer nur über den Strom einmodig durchstimmbaren Lichtquelle für interferometrische Anwendungen verifiziert werden.

Die Hauptschwierigkeit beim Aufbau der verkapselten ECLs ist die oben geschildert Montage anhand der theoretischen Positionen der Optiken. Hier wäre mehr es wünschenswert gewesen in weiteren Experimenten Erfahrungen hinsichtlich einer verbesserten Technik zu erzielen. In der kurzen Projektlaufzeit war dies leider nicht möglich.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt wurde das angestrebte Konzept zur Realisierung einer nur über den Strom einmodig durchstimmbaren Lichtquelle mit geringer Linienbreite auf Basis eines ECLs erfolgreich realisiert. Die erreichten Spezifikationen für die Quellen in Luft und SilGel® sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die Zielwellenlänge und die Ausgangsleistung ist für alle ECLs erreicht wurden. In Luft wurden auch die gewünschte Spezifikation bezüglich der Linienbreite erreicht. Auf Grund der oben geschilderten Montagetechnologie der mit SilGel® verfüllten Quellen ist die Linienbreite einen Faktor 2 größer als die Zielvorgabe.

Der zu geringe Durchstimmbereich kann in allen Fällen durch das Verwenden eines kürzeren Laserchips und kürzer Linsen auf 50 pm angepasst werden. Alle Quellen haben inklusive der Kühlleistung des Peltierelements eine Leistungsaufnahme kleiner als 1 W.

Tabelle 6: Vergleich der Zielspezifikationen mit den im Projekt erreichten Parametern der ECLs

Parameter	Zielspecs.	$R_t = 70\%$ in Luft	$R_t = 30\%$ in Luft	$R_t = 30\%$ in SilGel®
Zentrale Wellenlänge λ /nm	633 ± 1	633	633	633
Durchstimmbereich: $\Delta\lambda$ /pm	50	19	34	26
Durchstimmbereich: $\Delta\nu$ /GHz	40	14	25	19
Emissionslinienbreite: $\delta\lambda$ /pm	0.015	0.007	0.010	0.030
Emissionslinienbreite: $\delta\nu$ /MHz	10	5	8	20
Ausgangsleistung: P_{op} /mW	≥ 5	≥ 10	≥ 10	≥ 7

Für Referenzlaser wurde gezeigt, dass die Verkapselung mit dem Silicon-Gel keine Begrenzung der Lebensdauer der Bauelemente verursacht. Es konnten Lebensdauern größer 10000 h nachgewiesen werden.

Damit konnten alle Projektziele erreicht werden.

Berlin, den 10. Januar 2012

Dr. Bernd Sumpf