

## SpektraLAS / HessLa

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

**Förderkennzeichen:** 13N9730

**Vorhabensbezeichnung:** „Halbleiterschichtstrukturen für hocheffiziente spektral  
stabilisierte Laserstrahlquellen“ (HessLa)  
Im Rahmen des Verbundprojektes:  
Verbesserung der spektralen Eigenschaften von  
Hochleistungsdiodenlasern (SpektraLas)

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.09.2008 – 28.02.2012

## Schlussbericht

**Institutsleiter:** Prof. Dr. G. Tränkle

**Projektleiter:** Dr. G. Erbert

**Bearbeiter:** Dr. P. Crump

C. M. Schultz

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt  
beim Autor.

## Inhalt

Schlussbericht .....	0
1 Kurzdarstellung .....	2
1.1 Aufgabenstellung .....	2
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
2 Eingehende Darstellung .....	6
2.1 Erzielte Ergebnisse im Vergleich mit den angestrebten Zielen .....	6
2.1.1 Diodenlaser mit extrem schmalen vertikalen Fernfeld (ELoD-Laser) .....	6
2.1.2 Effizienzoptimierter Referenzlaser mit einer für den Gittereinbau angepassten Schichtstruktur .....	10
2.1.3 Diodenlaser mit monolithisch integrierten Gittern (DFB-Laser) .....	13
2.1.4 Lieferungen .....	20
2.2 Zahlenmäßiger Nachweis .....	20
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	20
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit .....	20
2.5 Fortschritt bei anderen Stellen .....	21
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen .....	21
2.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen .....	21
2.6.2 geplante Veröffentlichungen .....	22

## 1 Kurzdarstellung

### 1.1 Aufgabenstellung

Das primäre Ziel dieses industriellen Verbundprojektes war die Erforschung und Entwicklung von Komponenten und Systemen zur Realisierung von spektral stabilisierten Diodenlaserstrahlquellen. Diodenlaser mit gegenüber dem Stand der Technik wesentlich verbesserten spektralen Eigenschaften sind entscheidende Komponenten für zukünftige optische Materialbearbeitungssysteme. Diese Diodenlaser eignen sich einerseits zum Pumpen von schmalbandigen Absorptionslinien in Festkörperlasern und Faserlasern [3] und andererseits können sie für hochbrillante Strahlquellen, die auf Wellenlängenmultiplex zur Verbesserung der Strahlqualität beruhen, genutzt werden [4]. Das Vorhaben HessLa hatte im Rahmen des Verbundes die Aufgabe physikalisch-technologische Grundlagen für neuartige Halbleiterchips zu erforschen, die für Diodenlaser in diesen Strahlquellen eingesetzt werden können. Es waren Halbleiterchips für drei Lasertypen zu untersuchen: Erstens, Diodenlaser mit extrem geringer vertikaler Divergenz, die eine verlustarme, justierfreundliche externe spektrale Stabilisierung ermöglichen, zweitens, Diodenlaser mit monolithisch-integrierten Gitterstrukturen („distributed Feedback (DFB)“), unter Ausnutzung der Zweischritt – Epitaxie und drittens, Diodenlaser basierend auf den Designs für den Gittereinbau jedoch ohne Gitter zum Vergleich mit den DFB – Diodenlasern. Für alle drei Lasertypen wurden zuverlässige Ausgangsleistungen von 10W aus einem 100µm Einzelemittler und ein elektro-optischer Wirkungsgrad im Betriebspunkt des Einzelemittlers (10W) von mindestens 60% angestrebt. Beispielhaft waren die Forschungsarbeiten bei der Wellenlänge 976nm auszuführen. Halbleiterchips für Einzelemittler waren am FBH zu montieren und zu untersuchen einschließlich erster Zuverlässigkeitstests. Größere Stückzahlen, einige hundert, von Halbleiterchips waren als Barren und Einzelemittler an die Verbundpartner Jenoptik, DiLAS und ILT-Aachen zu liefern. Diese waren vorgesehen für die Entwicklung der oben genannten Diodenlaser - Strahlquellen bis hin zum Aufbau von Prototypmodulen.

### 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) ist eines der führenden Institute für anwendungsorientierte und industrienaher Forschung in der Mikrowellentechnik und Optoelektronik. Auf der Basis von III/V – Verbindungshalbleitern realisiert es Hochfrequenz-Bauelemente und Schaltungen für die Kommunikationstechnik und Sensorik sowie hochbrillante Diodenlaser für Materialbearbeitung, Lasertechnologie, Medizintechnik und Präzisionsmesstechnik. Die enge Zusammenarbeit des FBH mit Industriepartnern und Forschungseinrichtungen garantiert die schnelle Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis. Die Aktivitäten des FBH erstrecken sich dabei über die gesamte Wertschöpfungskette vom Design bis zum montierten Bauelement einschließlich Charakterisierung und Zuverlässigkeitstests. Die Ausrüstung dafür reicht von modernen und im engen Kontakt mit dem führenden Hersteller Aixtron entwickelten Epitaxie Anlagen (MOVPE) über industrie-kompatible Prozesslinien für 2“, 3“ und 4“ Wafer hin zu zuverlässigen Montage von Einzelemittlern und automatisierten Messverfahren. Für Diodenlaser sind insbesondere die patentierten und routinemäßig eingesetzten Verfahren zur Facettenpassivierung hervorzuheben (siehe bestehende Schutzrechte). Weiterhin konnte das FBH das know how aus vorher durchgeführten wissenschaftlichen Forschungsarbeiten (siehe auch 1.4 wissenschaftlich technischer Stand) insbesondere in Bezug auf Design und Charakterisierung für diese Arbeiten einsetzen. Bezüglich der Verbundpartner bestanden langjährige stabile Beziehungen, so dass die notwendige Einarbeitungszeit zur detaillierten Abstimmung der Projektarbeiten in kurzer Zeit erledigt werden konnte.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das FBH hatte im Rahmen des Vorhabens Diodenlaser bei einer Wellenlänge von 976 nm zu untersuchen. Für die Realisierung von Laserbauelementen mit schmalbandigen Spektren wurden 2 Lösungsansätze verfolgt. Im ersten Lösungsansatz waren möglichst effiziente leistungsstarke Laserbauelemente mit extrem geringer insbesondere vertikaler Divergenz zu entwickeln, zu realisieren, zu testen und an die Projektpartner zu liefern. Die Diodenlaser sind als ELoD-Laser („Extremely Low Divergence“) gekennzeichnet. Die entsprechende Arbeit wurde im Rahmen des Arbeitspakets AP1 durchgeführt. Die spektrale Stabilisierung dieser Bauelemente mittels externer holografischer Volumengittern (VHG) erfolgte bei den Verbundpartnern JOLD, DiLAS und ILT (Institut für Lasertechnik, Aachen).

Der zweite Lösungsansatz betraf die Entwicklung und Untersuchung von leistungsstarken 90µm Breitstreifenlasern mit monolithisch integrierten Gittern. Schichtstrukturen wurden entwickelt, die einerseits möglichst effizient sind und andererseits kompatibel mit einem Gittereinbau sind. Die Technologie für den Gittereinbau wurde untersucht. Das betraf verschiedene Designs für die Schichtstrukturen in denen das Gitter implementiert wurde, ätztechnische Varianten der Gittererzeugung und Parametervariationen für den anschließenden zweiten Epitaxieschritt. Es wurden nur Strukturen untersucht bei denen sich das Gitter über die gesamte Kavität erstreckt (sogenannte DFB-Laser), da auf diese Weise die geringste Beeinflussung der Struktur und bei Erhaltung einer großen spektralen Selektivität zu erwarten war.

Als Referenz zu den DFB-Lasern wurden aus dem gleichen Schichtdesign auch Diodenlaser ohne Gitter hergestellt, im Folgenden als HE-Laser bezeichnet. Erstens, um aufzuzeigen, dass das gewählte Schichtdesign das Potential für die angestrebte Effizienz hat, ohne den einschränkenden Aspekt der zusätzlichen Gittertechnologie. Zweitens, um gerade diesen Einfluss des zusätzlichen Schrittes für die Gitterherstellung zu charakterisieren und zu quantifizieren. Halbleiterchips dieser Referenz-Diodenlaser wurden ebenfalls an die Projektpartner geliefert. Sie dienten in deren Diodenlaserstrahlquellen als Referenzelemente. Auch die VHG-Stabilisierung konnte so mit der Stabilisierung von ELoD-Strukturen verglichen werden. Diese Arbeiten wurden bei den Projektpartnern Jenoptik, DiLAS und ILT durchgeführt.

Die Forschungsarbeiten wurden in drei iterativen Schritten durchgeführt. Jede Iteration bestand aus Designrechnungen, Epitaxie (MOVPE) für die Schichtstrukturen und deren Charakterisierung mittels eines stark verkürzten Waferprozesses, dem Bauelementprozess, der Montage von Einzelemittlern, deren Charakterisierung und Zuverlässigkeitstest. Für die DFB-Laser waren jeweils zusätzliche Forschungsarbeiten für die Technologie der Gitterherstellung und des epitaktischen Überwachens der Gitterstruktur notwendig. Die ersten zwei planmäßigen Iterationen erfolgten während der geplanten Projektlaufzeit. Eine zusätzliche Iteration wurde während der kostenneutralen Verlängerung durchgeführt, um neue Varianten in Hinblick auf eine weitere Verbesserung der elektro-optischen Kenndaten zu erproben.

Das konkrete Chipdesign in Bezug auf Kavitätslänge, Kontaktgeometrie und Chipgröße wurde im Wesentlichen mit den Projektpartnern bereits vor der Antragstellung vereinbart. Die Diodenlaser wurden als Einzelemitter mit 90µm Streifenbreite und als 10mm-Barren mit einer Belegungsichte von 20% ausgeführt. Im Laufe des Projektes wurden für die Barren weitere Belegungsichten von den Projektpartnern gewünscht und in den Iterationen berücksichtigt.

Das FBH hat den Projektpartnern Halbleiterchips für Laserbarren und Einzelemittlern aus jeder Iterationsstufe planmäßig bereitgestellt. Ergebnisse der Projektpartner sind in die folgenden Iterationen eingeflossen.

#### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Konventionelle GaAs-basierte Diodenlaser emittieren mit einer spektralen Breite von typischerweise 4nm (mit 95% Leistungseinschluss). Diese spektrale Breite ist, wie in der Aufgabenstellung erläutert, für viele Anwendungen zu groß. An der Reduzierung der spektralen Breite wird seit vielen Jahren auch in Hinblick auf Anwendungen, die nur eine geringe optische Leistung und Effizienz erfordern, geforscht. Generell werden zwei Varianten untersucht mittels monolithisch integrierten oder externen Gitterstrukturen [1,2].

Während des letzten Jahrzehntes haben militärisch geförderte Programme in den Vereinigten Staaten deutliche Fortschritte ermöglicht, die gerade ihren Eingang in die Industrie finden. Beispiele von Spitzenwerten aus der amerikanischen Entwicklungen sind im Folgenden aufgelistet. Externe Stabilisierung mit VHG Techniken ermöglichen Breitstreifenlaser mit circa 5W mit einer Spektralbreite von <0.5nm [5,6]. GaAs-basierter Einzelemittlern mit 100µm Streifenbreite mit monolithisch integriertem Gittern haben Leistungen von  $\geq 4W$  und eine Effizienz von circa 50% erreicht, sowohl bei den Emissionswellenlängen 808nm und 976nm [7,8]. 976nm Einzelemittlern mit 100µm Streifenbreite erreichen eine Effizienz bei dem im Projekt angestrebten Arbeitspunkt von 60% [9,10] allerdings sind diese Strukturen nicht dahingehend konzipiert, dass ein monolithische Gitterstabilisierung ermöglicht wird.

[1] Scifres, D. R., Burnham, R. D., and Streifer, W. (1974). Appl. Phys. Lett. 25(4), 203–206.

[2] Chi, M., and Petersen, P. M. (2011). In "Landolt-Bornstein" New Series, Group VIII (Advanced Materials and Technologies), Vol. 1 (Laser Physics and Applications), Subvol. B (Laser Systems). pp. 245–257. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

[3] R. Paschotta, J. Nilsson, A.C. Tropper and D.C. Hanna "Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers" IEEE J. Quant. Electron. Vol. 33, No. 7, pp. 1049-1056 (1997).

[4] T. Y. Fan, "Laser beam combining for high-power, high-radiance sources," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 11, 567-577 (2005).

[5] G. Venus, L. Glebov, V. Rotar, V. Smirnov, P. Crum, and J. Farmer "Volume Bragg semiconductor lasers with near diffraction limited divergence" Proc. SPIE Vol. 6216, 621602, (2006).

[6] G. J. Steckman, W. Liu, R. Platz, D. Schroeder, C. Moser, and F. Havermeier "Volume Holographic Grating Wavelength Stabilized Laser Diodes" IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron., Vol. 13, No. 3, pp672-678 (2007).

[7] M. Kanskar, Y. He, J. Cai, C. Galstad, S.H. Macomber, E. Stiers, D. Botez and L.J. Mawst Electron. Lett. Vol. 42, No. 25, pp1455–1457 (2006).

[8] Y. He, H. An, J. Cai, C. Galstad, S. Macomber and M. Kanskar Electron. Lett. Vol. 45, No. 3, pp.163–164 (2009)

[9] P. Yalamanchili, V. Rossin, J. Skidmore, K. Taia, X. Qiu, R. Duesterberg, V. Wong, S. Bajwa, K. Duncan, D. Venables, R. Verbera, Y-Z. Daia, J-P. Fevea and E Zucker "High-power, high-efficiency fiber-coupled multimode laser-diode pump module (9XX nm) with high-reliability" Proc. SPIE Vol. 6876, 687612, (2008)

[10] P. Crump, J. Wang, T. Crum, S. Das, M. DeVito, W. Dong, J. Farmer, Y. Feng, M. Grimshaw, D. Wise and S. Zhang: "> 360W and > 70% Efficient GaAs-Based Diode Lasers" Proc. SPIE 5711, (2005).

In Bezug auf effiziente und leistungsstarke Diodenlaser, hatte das FBH in den letzten Jahren Laserbarren mit Konversionswirkungsgrad von > 70% um Emissionswellenlänge von 940nm und 808nm entwickelt [11,12]. Der Arbeitspunkt für Einzelemitter lag dabei im Bereich 4W..5W. Bei dem im Projekt angestrebten Arbeitspunkt von 10W sank die Effizienz jedoch auf etwa 45%...50% ab. Das FBH hatte auch Einzelemittlern mit 100µm Streifenbreite entwickelt, die zuverlässigen Betrieb bis 20W und eine Spitzenleistung von 25W demonstriert haben [13,14].

Zweitens, hatte das FBH Breitstreifenlaser bei einer Emissionswellenlänge von 1060 nm entwickelt, die gleichzeitig einen sehr geringen vertikalen Fernfeldwinkel von < 25° (mit 95% Leistungseinschluss) und eine Ausgangsleistung von > 35W demonstrierten. [15]. Die Effizienz lag allerdings nur bei Werten zwischen 30%...40% In allen Fällen gehörten diese Ergebnisse zu den weltweit publizierten Spitzenwerten.

Drittens, hatte das FBH Breitstreifenlaser mit integriertem Gittern mittels Zweischritt Epitaxie entwickelt, mit Emissionswellenlängen um 808 nm und 976 nm, die gleichzeitig schmalbändige Spektren ( $< 0,3$  nm mit 95% Leistungseinschluss) und eine Konversionswirkungsgrad von  $> 35\%$  demonstriert hatten [16,17].

[11] A. Knigge, G. Erbert, J. Jonsson, W. Pittroff, R. Staske, B. Sumpf, M. Weyers and G. Tränkle "Passively cooled 940 nm laser bars with 73% wall-plug efficiency at 70W and 25°C" *Electron. Lett.* Vol. 41 pp250-251 (2005).

[12] P. Crump, H. Wenzel, G. Erbert, P. Ressel, M. Zorn, F. Bugge, S. Einfeldt, R. Staske, U. Zeimer, A. Pietrzak, and G. Tränkle "Passively Cooled TM Polarized 808-nm Laser Bars With 70% Power Conversion at 80-W and 55-W Peak Power per 100- $\mu$ m Stripe Width" *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol. 20, No. 16, pp. 1378-1380 (2008).

[13] P. Crump, G. Blume, K. Paschke, R. Staske, A. Pietrzak, U. Zeimer, S. Einfeldt, A. Ginolas, F. Bugge, K. Häusler, P. Ressel, H. Wenzel and G. Erbert, "20W continuous wave reliable operation of 980nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 $\mu$ m", *Proc. SPIE.* 7198, 719814 (2009).

[14] P. Crump, C. Roder, R. Staske, A. Pietrzak, W. Pittroff, A. Ginolas, J. Fricke, K. Paschke, F. Bugge, P. Ressel, H. Wenzel and G. Erbert, "Limitations to Peak Continuous Wave Power in High Power Broad Area Single Emitter 980 nm Diode Lasers", *Conf. Digest CLEO/Europe, CBP33TUE* (2009).

[15] A. Pietrzak, H. Wenzel, G. Erbert, and G. Tränkle "High-power laser diodes emitting light above 1100 nm with a small vertical divergence angle of 13°" *Optics Lett.* Vol. 33, No. 19 pp. 2188-2190 (2008).

[16] A. Klehr, F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, A. Knauer, P. Ressel, H. Wenzel and G. Tränkle "High power broad area 808 nm DFB lasers for pumping solid state lasers" *Proc. SPIE* Vol. 6133, 61330F, (2006)

[17] C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, O. Brox, F. Bugge and G. Erbert "Narrow Vertical Far-Field 975-nm Broad-Area DFB Lasers for Wide Temperature Range Operation", *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol. 21, pp. 593-595 (2009).

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Keine, außerhalb der Projektpartnern Jenoptik, DiLAS, FhG ILT, GRINTECH und Ingeneric.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Erzielte Ergebnisse im Vergleich mit den angestrebten Zielen

Im Projekt wurden, wie bereits dargestellt drei Diodenlasertypen (ELoD, Referenz und DFB) designt, realisiert und untersucht. Die anzustrebenden Kenndaten wurden für Einzelemitter mit einer Streifenbreite von 90 $\mu$ m und einer Resonatorlänge  $L$ , im Bereich  $L = 3...4$  mm festgelegt. Die Emissionswellenlänge ist 976nm. Der Kenndaten wurden am FBH an Einzelemittern ermittelt, die mit der Epitaxienseite zur Wärmesenke (p-unten) auf passiv gekühlte Laserträger („Chip-On-Submount“) montiert wurden. Die Betriebstemperatur war 25°C und der thermische Widerstand betrug circa 3.5K/W.

**Tabelle 1** listet die angestrebten Zieldaten auf und **Tabelle 2** die erreichten Daten.

**Tabelle 1:** Übersicht über die angestrebten Zieldaten

Design	Betriebsleistung, $L_B$	Effizienz bei $L_B$	vert. Fernfeld	lat. Fernfeld	Spektr. Breite
			bei $L_B$ , mit 95% Leistungseinschluss		
ELoD	10W	>60%	$\leq 25^\circ$	$7^\circ$	--
Referenz	10W	>60%	$\leq 45^\circ$	$7^\circ$	--
DFB	10W	>60%	$\leq 45^\circ$	$7^\circ$	<0.3nm

**Tabelle 2:** Übersicht über die erreichten Daten.

Design	Betriebsleistung, $L_B$	Effizienz bei $L_B$	vert. Fernfeld	lat. Fernfeld	Spektr. Breite
			bei $L_B$ , mit 95% Leistungseinschluss		
ELoD	10W	58%	$26^\circ$	$10^\circ$	--
Referenz	10W	65%	$47^\circ$	$9^\circ$	--
DFB	10W	58%	$45^\circ$	$10^\circ$	0.7nm

Das ELoD Design hat die angestrebte geringe vertikale Divergenz bis auf  $1^\circ$  Abweichung erreicht, wobei diese noch im Rahmen der Messunsicherheit (Untergrundkorrektur) liegt. Die Effizienz bei 10W liegt mit 58% knapp unter dem Zielwert von 60%. In Kombination mit der geringen Divergenz ist dieser Wert jedoch momentan Weltspitze. Am größten ist Abweichung in der laterale Divergenz. Jedoch waren hierfür im Rahmen des Projektes auch nur geringe Forschungskapazitäten vorgesehen.

Mit den Referenzlasern konnte der Zielwert für die Effizienz deutlich überschritten werden. Er entspricht den weltweit publizierten Bestwerten. Die etwas größere vertikale Divergenz war für die vorgesehenen Anwendungen noch unkritisch. Die durch das Einbringen der Gitterstruktur veränderte Wellenführung reduzierte dann die Divergenz wieder auf den Zielwert.

Die DFB-Laser zeigen eine stabile, spektral schmalbandige Emission. Die spektrale Breite liegt etwas über dem Zielwert, ist aber für die meisten der angedachten Anwendungen ausreichend und eine deutliche Verbesserung gegenüber nicht stabilisierten Diodenlasern. Die erreichte Effizienz verfehlt zwar um 2% die angestrebten 60%, der erreichte Wert von 58% ist aber ein derzeitiger Weltspitzenwert.

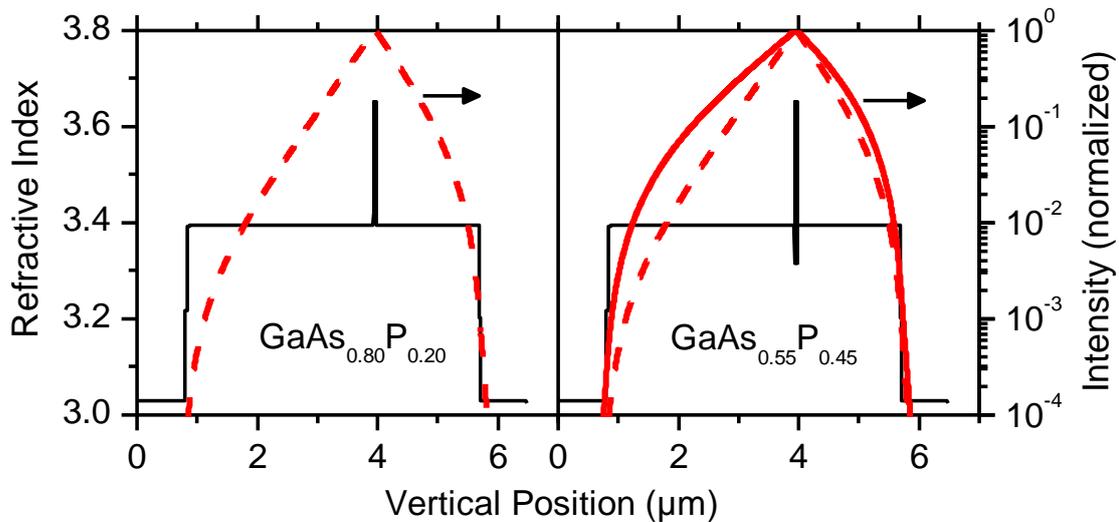
Auch für diese Lasertypen konnte die Zielstellung für das laterale Fernfeld nicht erreicht werden. Die Werte sind vergleichbar mit denen aus der aktuellen Literatur bekannten Werten. Hier zeigte sich, dass weitere Forschungsarbeiten, die auch die Aufbautechnik einschließen, notwendig sind.

#### 2.1.1 Diodenlaser mit extrem schmalen vertikalen Fernfeld (ELoD-Laser)

Für eine Emission mit schmalen vertikalem Fernfeld muss die Wellenführung durch Wahl

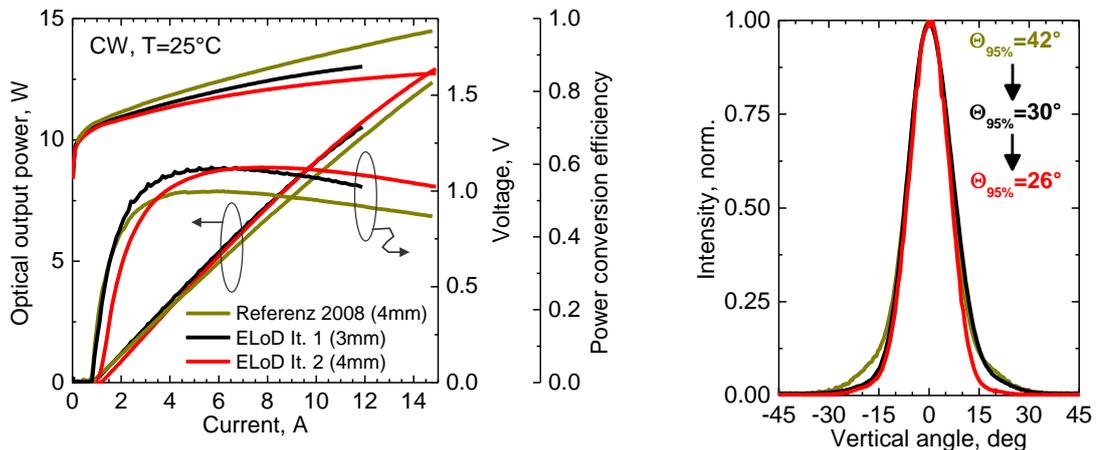
von Schichtdicken und –kompositionen in Diodenlasern so gestaltet werden, dass die Nahfeldbreite entsprechend groß ist. Für die angestrebten  $25^\circ$  bei einem Leistungsinhalt von 95% ( $1/e^2$ -Level der Fernfeldintensitätsverteilung) ist mindestens eine Nahfeldbreite (Näherung für einen Gaußstrahl) von  $2,8\mu\text{m}$  (95% Leistungsinhalt) bzw.  $4,2\mu\text{m}$  (99% Leistungsinhalt) notwendig. Herkömmliche Laserstrukturen kommen demgemäß mit nur halb so dicken Schichten aus. Das Designziel des Vorhabens war es, basierend auf einer minimal möglichen Wellenleiterdicke die angestrebte geringe Fernfelddivergenz zu erreichen. Um die angestrebten Kenndaten für die ELoD-Diodenlaser zu erreichen, waren folgende Aufgaben zu lösen:

- Bei den großen Schichtdicken besteht in der Regel die Gefahr, dass auch höhere vertikale Schwingungsmoden angeregt werden. Diese sind zu unterdrücken, da sie die Effizienz der Grundmode reduzieren und nicht verwertbares Licht liefern. Durch geeignete Wahl insbesondere einer starken Asymmetrie bezüglich der Komposition (Brechzahl) der Mantelschichten konnte die Anzahl der höheren Schwingungsmoden verringert werden. Zwischen der n-Mantelschicht und der Wellenleiterschicht wurde eine sehr kleine Differenz in der Komposition (15% im AIAs-Gehalt im Wellenleiter, 19% AIAs – Gehalt in der n-Mantelschicht) gewählt. Dadurch kann nicht nur die Anzahl der höheren Moden verringert werden sondern auch deren optische Abstrahlungsverluste in das Substrat definiert eingestellt werden. Diese Differenz ist andererseits hinreichend hoch zu erhalten, um den Einfluss von Schwankungen in der epitaktischen Züchtung zu minimieren.
- Trotz der großen Dicke der Schichten für den angestrebten Lasertyp ist ein Serienwiderstand im Bereich  $20\text{m}\Omega$  anzustreben, um den Anteil der Jouleschen-Verlustwärme bei Betriebsströmen bis zu 12A für den Arbeitspunkt 10W, so klein wie möglich zu halten. Um diesen Wert zu erreichen, wurden die Komposition der Wellenleiterschichten, das Dotierungsprofil und die Lage der aktiven Zone optimiert. Für einen geringen Serienwiderstand ist der AIAs-Gehalt in der Mantelschicht so gering wie möglich zu wählen, andererseits ist für eine effiziente Lichterzeugung eine Mindestbarriere für die in die aktive Zone injizierten Ladungsträger erforderlich. Die im vorigen Abschnitt angeführten 15% AIAs – Anteil wurden als optimal für den Wellenlängenbereich um 976nm gefunden.
- Die Wellenführung insbesondere in Strukturen mit dickem Wellenleiter wird stark von der aktiven Zone beeinflusst. Die aus Quantentrögen bestehende aktive Zone hat eine höhere Brechzahl als die Wellenleiterschicht. Um einen ausreichenden modalen Gewinn bei dem stark verbreiterten Nahfeld zu erreichen, wurden drei durch Barrieren getrennte Quantentröge eingesetzt. Die zunächst dafür eingesetzte aktive Zone hatte einen starken Einfluss auf die Nah- bzw. Fernfeldverteilung. Die Halbwertbreite war mit circa  $15^\circ$  zwar hinreichend klein aber der Winkel für 95% Leistungseinschluss lag deutlich über der geforderten Zielstellung. Im Vorhaben wurde eine neuartige aktive Zone entwickelt, die einen deutlich reduzierten Einfluss auf die Wellenführung zeigt. Das neue Design beruht auf der speziellen Wahl der Komposition der Barriere-Schichten. Die Barriere-Schichten wurden so gewählt, dass sie eine geringere Brechzahl als die Wellenleiterschicht haben. Die Barrieren wirken dann als Kompensationsschichten und minimieren die Wellenführung der aktiven Zone, wie in **Abb. 1** illustriert. Durch die Nutzung dieser speziellen Barriere-Schichten konnten die Zielstellungen erreicht werden. Ein Patent dafür wurde angemeldet (siehe **Absatz 2.6**).



**Abb. 1:** Brechzahlprofil der vertikalen Schichtstruktur und simuliertes Intensitätsprofil der Grundmode für einen 976 nm Diodenlaser  
**Links:** Design mit einer konventionellen aktiven Zone zeigen. Barriere  $\text{GaAs}_{0.8}\text{P}_{0.2}$   
**Rechts:** Design mit der neuen aktiven Zone Barriere  $\text{GaAs}_{0.55}\text{P}_{0.45}$

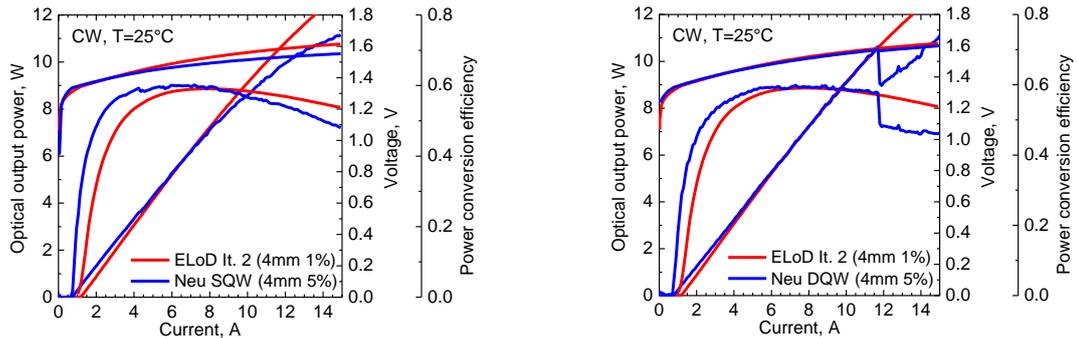
Diodenlaser basierend auf den angegebenen Designkriterien wurden während des Vorhabens in zwei Iterationen entwickelt, realisiert und untersucht. Die Charakteristika von exemplarischen Einzelemittlern sind in **Abb. 2** präsentiert. Zum Vergleich sind FBH-Ergebnisse von Referenzstrukturen aus 2008 präsentiert. Von Iteration 1 zu Iteration 2 konnte die Effizienz bei 10W Ausgangsleistung von 45% bis auf 58% verbessert werden. Dieses Ergebnis wurde erreicht trotz der Reduzierung des Fernfeldwinkels von  $42^\circ$  auf  $26^\circ$  (Winkel mit 95% Leistungseinschluss).



**Abb. 2.** Charakteristika von Breitstreifenlasern FBH-Referenzstruktur von 2008 (dunkelgelb, mit 4mm Resonatorlänge), mit ELoD -Design It. 1 Struktur (schwarz, mit 4mm Resonatorlänge) und It. 2 Struktur (rot, mit 4mm Resonatorlänge).  
**Links:** Optische Ausgangsleistung, Flussspannung und Effizienz als Funktion des Stromes.  
**Rechts:** Optische Intensität als Funktion des vertikalen Winkels.

Da die angestrebten Ziele bezüglich Effizienz noch nicht völlig (58% - Ziel 60%) erreicht wurden, wurde während der kostenneutralen Verlängerung eine zusätzliche Iteration durchgeführt. Die Anzahl von Quantentrögen wurde auf 2 (DQW) beziehungsweise auf 1 (SQW) verringert und die aktive Zone wurde asymmetrischer in die Wellenleiterschicht (dünnerer p-Wellenleiter) eingebettet. Die Charakteristika von derartigen Diodenlasern sind

exemplarisch in **Abb. 3** zu sehen. Diese neuen Strukturen zeigten, wie erwartet, einen geringeren Schwellenstrom und einen geringeren Serienwiderstand. Die Effizienz bei 10W ist aber bei beiden Strukturen im Rahmen der Messgenauigkeit gleich. Die thermische Stabilität ist für die SQW – Struktur geringer, was zu einer leicht verringerten Steilheit führt. Bei der DQW-Struktur traten bei höheren Leistungen modale Instabilitäten auf, die vermutlich auf zu dünne mantelschichten zurückzuführen sind. Um den Vorteil der geringeren Schwelle insbesondere für die SQW-Struktur auszuspielen, sind weitere Iterationen (z. B. 6mm Resonatorlänge statt der 4mm) notwendig, die dann Effizienzwerte über 60% erwarten lassen.

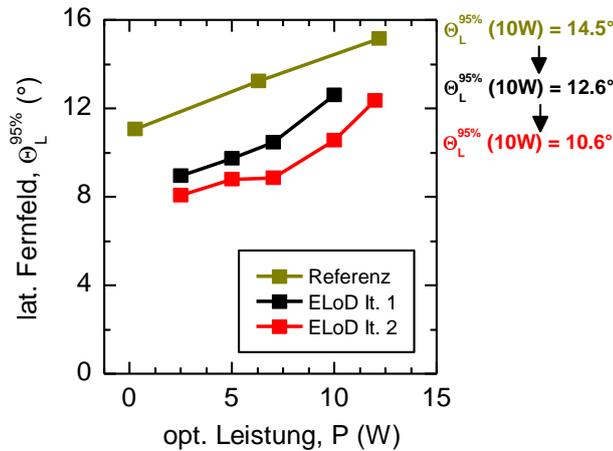


**Abb. 3:** Optische Ausgangsleistung, Flussspannung und Effizienz als Funktion des Stromes für Breitstreifenlaser mit ELoD Design It 3 (blau). Zum Vergleich sind Charakteristika der ELoD It. 2 Laser ebenfalls dargestellt (rot).

**Links:** ELoD It. 3 Designs mit nur ein Quantentrog (SQW).

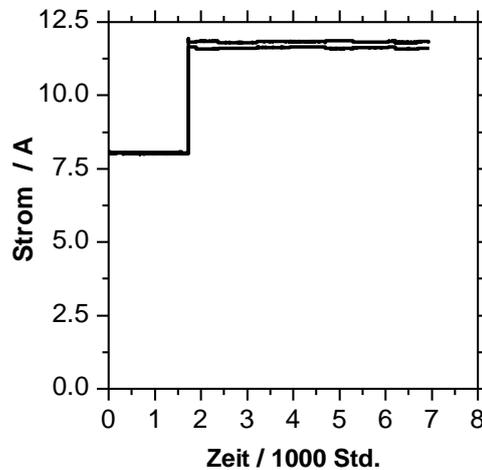
**Rechts:** ELoD It. 3 Designs mit zwei Quantentrögen (DQW).

Als drittes Ziel wurde der Einfluss der Wellenleiterstrukturen auf das laterale Fernfeld untersucht. Die Ergebnisse sind in **Abb. 4** dargestellt. **Abb. 4** zeigt die Fernfeldwinkel als Funktion der optischen Ausgangsleistung. Durch eine verbesserte Effizienz konnte die thermisch bedingte Brechzahldifferenz zwischen dem gepumpten Bereich und den ungepumpten Bereichen verringert werden. Aufgrund der geringeren Brechzahldifferenz konnte die laterale Divergenz reduziert werden. Die laterale Chipgeometrie wurde parallel zu den auf die vertikale Struktur bezogenen Iterationen ebenfalls verändert. Als Ergebnis konnte die Brechzahldifferenz weiter minimiert werden. Letztendlich konnte das laterale Fernfeld im Arbeitspunkt 10W von  $14^\circ$  bis auf  $10^\circ$  reduziert (Werte mit 95% Leistungseinschluss) werden. Die Ergebnisse demonstrieren einen guten Fortschritt, aber das Ziel  $7^\circ$  wurde nicht erreicht.



**Abb. 4:** Lateraler Fernfeldwinkel (95% Leistungseinschluss,  $\Theta_L^{95\%}$ ) als Funktion der optischen Leistung für Diodenlaser basierend auf einer FBH-Referenzstruktur von 2008 (dunkelgelb, mit 4mm Resonatorlänge), auf der ELoD It. 1 Struktur (schwarz, mit 3mm Resonatorlänge), und auf der ELoD It. 2 Struktur (rot, mit 4mm Resonatorlänge)..

Die Zuverlässigkeit dieser neuartigen Wellenleiterstrukturen wurde anhand von zwei Lasern aus der Iteration 2 getestet. Die Diodenlaser wurden zunächst bei einer konstant gehaltenen Ausgangsleistung von 7W über 2000h betrieben. Danach wurde die Ausgangsleistung auf 10W erhöht und der Test über weitere 5000h fortgesetzt. In Abb. 5 ist der für die Ausgangsleistungen erforderliche Betriebsstrom in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Es konnte kein Stromanstieg beobachtet werden, so dass gute Chancen bestehen, diesen Lasertyp für mindestens 10W Betriebsleistung für industrielle Anwendungen zu qualifizieren.

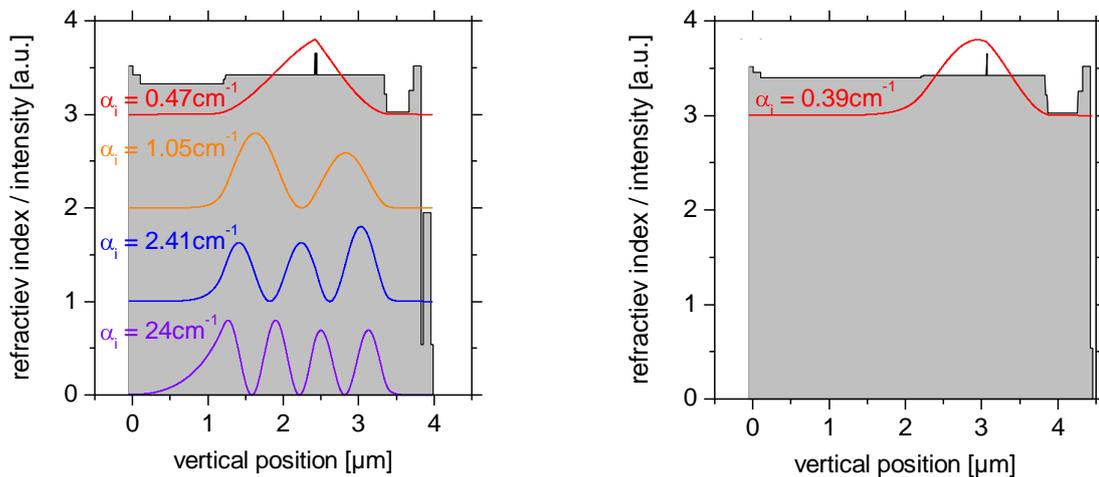


**Abb. 5:** Alterungstest von zwei ELoD Diodenlasern aus It. 2. Die Diodenlaser wurden 2000 Stunden bei konstanter Ausgangsleistung von 7W gealtert, darauf folgend 5000 Stunden bei 10W .

### 2.1.2 Effizienzoptimierter Referenzlaser mit einer für den Gittereinbau angepassten Schichtstruktur (HE-Laser)

Ein Kernziel des Vorhabens war es, effiziente Diodenlaser mit monolithisch integriertem Gitter für den Leistungsbereich um 10W zu entwickeln. Diese Diodenlaser brauchen eine vertikale Struktur, die einerseits hinreichend effizient und für den Leistungsbereich 10W geeignet ist und andererseits es ermöglicht, mittels eines zweiten Epitaxieschrittes nach einer Ätzung einer periodischen Struktur ein Gitter zu implementieren. Für das grundlegende Design gelten ähnliche Grundregeln wie für die ELoD-Laser. Die Forderung nach einem geringen AIAs-Gehalt wird hier noch verstärkt durch den Gitterprozess. Ein geringerer AIAs – Gehalt macht die Technologie aus folgendem Grund einfacher. InGaP ist als Schicht die

periodisch strukturiert wird vorgesehen. Die Brechzahldifferenz zwischen InGaP und den Umgebungsschichten wird mit deren geringerem AlAs – Gehalt größer. Eine große Brechzahldifferenz erlaubt sehr dünne Schichten für das an sich sonst störende InGaP bzw. einen relativ großen Abstand zwischen aktiver Zone und der Gitterregion. Da die Anforderungen an die vertikale Divergenz gegenüber den ELoD-Lasern stark reduziert sind, kann die Wellenleiterschichtdicke geringer gehalten werden, das erleichtert das Erreichen höherer Wirkungsgrade.

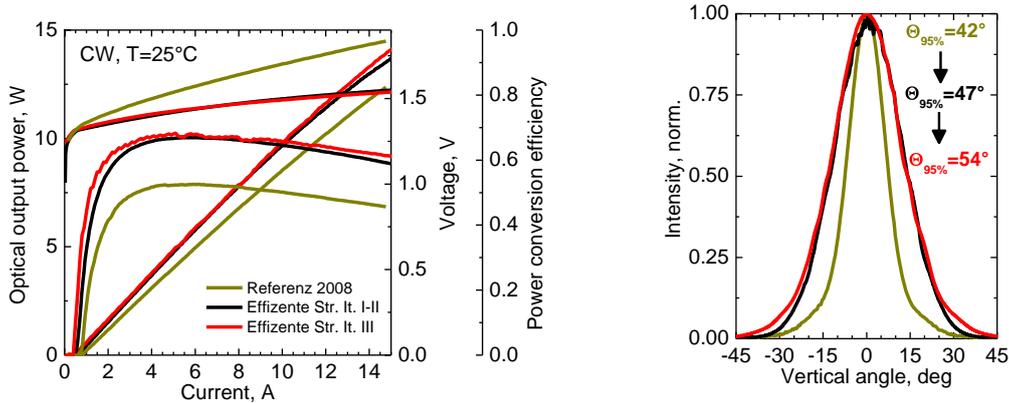


**Abb. 6:** Brechzahlprofil der vertikalen Schichtstruktur und simulierte Intensitätsprofile der vertikalen Schwingungsmoden für HE Diodenlaser

**Links:** HE Laserdesign It. 1 und 2 mit DQW als aktiver Zone.

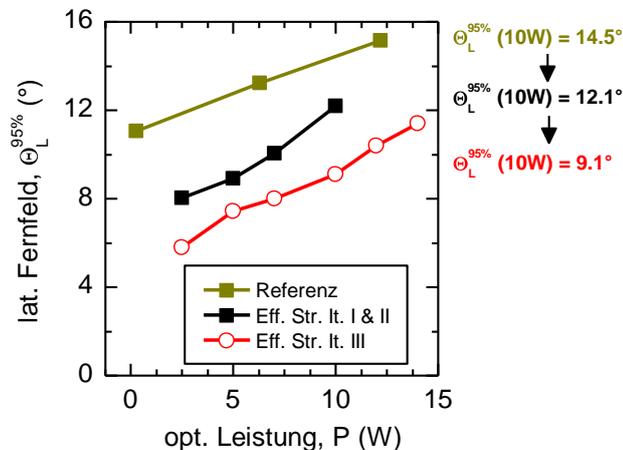
**Rechts:** HE Laserdesign It. 3 ausgelegt für vertikalen Einmodenbetrieb und SQW als aktiver Zone.

Zwei Vertikalstrukturen wurden während des Vorhabens für die DFB- bzw. HE- Laser entwickelt. Die Brechzahlprofile und simulierte Modenprofile für die zwei HE Laser Designs sind in **Abb. 6** zu sehen. Für Iterationen 1 und 2 wurde eine Struktur mit zwei Quantentrögen (DQW) eingebettet in einem aus  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  bestehenden Wellenleiter eingesetzt. Der Wellenleiter ist  $2,2\mu\text{m}$  dick und die aktive Zone liegt asymmetrisch im Wellenleiter, das heißt, die p-Wellenleiterdicke betrug  $0,9\mu\text{m}$ . Diese Struktur kann vier vertikale Moden führen. Die Obermoden schwingen im Laserbetrieb in der Regel nicht an, da die Dicke der n-Mantelschicht so gewählt wurde, dass deren Verluste infolge Substratkopplung sehr hoch sind.. Es stellte sich jedoch heraus, dass für die DFB-Laser die Gitterkopplung für eine der Moden so stark war, dass trotz der höheren Verluste Obermoden nahe der Laserschwelle bei einer anderen Wellenlänge emittierten. In der dritten Iteration (während der kostenneutralen Verlängerung), wurde daher eine zweite HE Laser Struktur entwickelt, mit dünnerem Wellenleiter und nur einem Quantentrog als aktive Zone (SQW). Diese Struktur erlaubt nur eine Schwingungsmoden. Allerdings führte die weitere Reduktion der Wellenleiterdicke zu einer größeren vertikalen Divergenz.



**Abb. 7.** Charakteristika von HE-Lasern (It1 schwarz, mit 3mm Resonatorlänge, It. 3 rot, mit 4mm Resonatorlänge) im Vergleich mit einer FBH-Referenzstruktur von 2008 (dunkelgelb, mit 4mm Resonatorlänge)  
**Links:** Optische Ausgangsleistung, Flussspannung und Effizienz als Funktion des Stromes  
**Rechts:** Vertikale Abstrahlcharakteristik

Die Charakteristika von exemplarischen HE Laser Einzelemittlern sind in **Abb. 7** zu sehen. Zum Vergleich sind wiederum die FBH-Ergebnisse von Referenzstrukturen aus 2008 präsentiert (von **Abb. 2** wiederholt). Die HE Laser Struktur für It. 1 und 2 erreichen eine Effizienz bei 10W Ausgangsleistung von 65%. Der Fernfeldwinkel ist um  $47^\circ$  nahe dem  $45^\circ$  Zielwert (Winkel mit 95% Leistungseinschluss). Die HE Laser Struktur für It. 3 zeigt eine erhöhte Effizienz von 66% um 10W. Allerdings hat sie einen vertikalen Fernfeldwinkel von  $54^\circ$  (95% Leistungseinschluss).

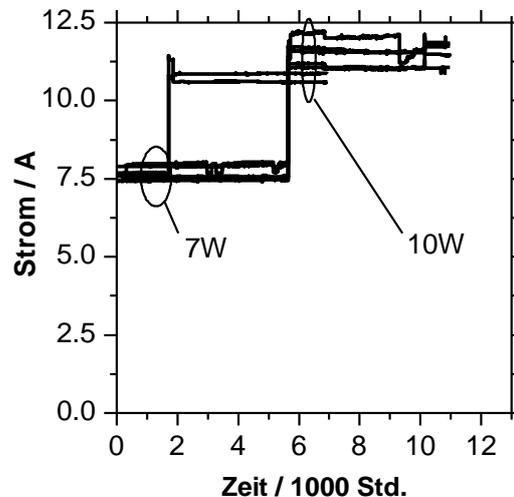


**Abb. 8:** Lateraler Fernfeldwinkel (95% Leistungseinschluss,  $\Theta_L^{95\%}$ ) als Funktion der optischen Leistung für Diodenlaser basierend auf einer FBH-Referenzstruktur von 2008 (dunkelgelb, mit 4mm Resonatorlänge), auf der HE Laser Struktur für It. 1 (schwarz, mit 3mm Resonatorlänge), und auf HE Laser Struktur für It. 3 (rot, mit 4mm Resonatorlänge)

Untersuchungen zum lateralen Fernfeld wurden in Analogie zu ELoD-Lasern durchgeführt. **Abb. 8** zeigt die Fernfeldwinkel als Funktion der optischen Ausgangsleistung. Die erhöhte Effizienz und die geänderte laterale Struktur führen zu einer geringeren Divergenz. Der laterale Fernfeldwinkel beim Betriebspunkt von 10W wurde von  $14^\circ$  bis auf  $9^\circ$  reduziert (95% Leistungseinschluss). Wie für die ELoD Diodenlaser wurden hier Fortschritte erreicht, aber für das Ziel von  $7^\circ$  sind weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Die Zuverlässigkeit von HE-Laser der Strukturen aus It. 1 und 2 wurde bei 7W und 10W getestet. **Abb. 9** zeigt den Betriebsstrom über die Testzeit zur Aufrechterhaltung der entsprechenden Leistungen. Nach mehr als 10000 Stunden Alterungszeit gibt es keine Ausfälle. Die Betriebsströme haben sich sehr wenig geändert, so dass auch diese Struktur

für den industriellen Einsatz qualifizierbar ist.



**Abb. 9:** Alterungstest von sieben HE Diodenlasern mit dem Design aus It. 1 und 2.. Die Diodenlaser wurden 2000h beziehungsweise 6000h bei konstant gehaltener Ausgangsleistung von 7W gealtert, darauf folgend weitere 5000h bei 10W

### 2.1.3 Diodenlaser mit monolithisch integrierten Gittern (DFB-Laser)

Eine monolithische Integration von Gittern in den Halbleiterchip hat den Vorteil, dass die zusätzlichen Aufwände zur Herstellung und Montage von externen spektral-selektiven Reflektoren entfallen können. Aus den verschiedenen Methoden, um Gitter in den Halbleiterchip zu integrieren, wurde hier das Verfahren gewählt, den gesamten Chip mit einem uniformen Gitter zu strukturieren (DFB). Die Implementation eines Gitters ist mit Störungen der kristallinen Perfektion verbunden. Diese Störungen können sowohl die Lebensdauer als auch die Effizienz beeinflussen. DFB – Laser brauchen, da sich das Gitter über die gesamte Resonatorlänge erstreckt, für die spektrale Stabilisierung nur eine sehr geringe Störung, deshalb wurde für die vorgesehenen Hochleistungsanwendungen diese Variante gewählt.

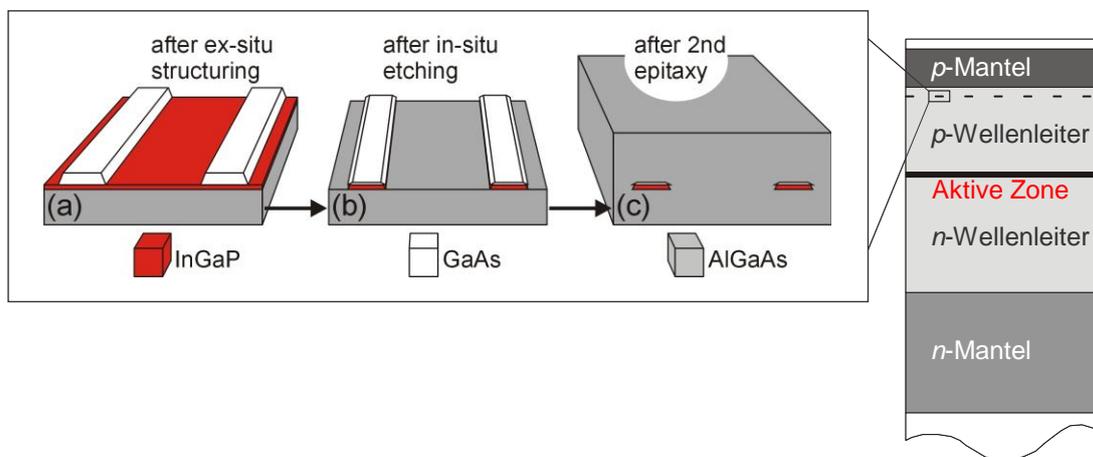
Aufgabe in diesem Arbeitspaket war es, einerseits die Technologie zu entwickeln, die einen möglichst störungsfreien Einbau des Gitters in die Schichtstruktur ermöglicht und andererseits die Wirkung des Gitters durch Lage und Ausführungsform so zu optimieren, dass bei einer Leistung von 10W sowohl die spektrale Filterung ausreichend als auch die Effizienz optimal ist.

Während des Vorhabens wurde eine neuartige Technik zur Strukturierung des Gitters entwickelt, die die eingebrachten Störungen weiter minimieren und damit eine erhöhte Effizienz und Leistung ermöglicht. Ein Patent wurde dafür angemeldet (siehe **Absatz 2.6** für Information).

In der **Abb. 10** sind die wesentlichen technologischen Schritte der Herstellung dargestellt. Die Schichtstruktur der HE Laser von **Absatz 2.1.2** bildet die Grundlage. Das Gitter wird in der p-Wellenleiterschicht implementiert. Die genaue Lage und Dicke der Zusatzschichten sind so ausgewählt, dass eine optimale Rückkopplung durch das Gitter erreicht wird. Als Zusatzschichten werden eine InGaP-Schicht für die Erzeugung der Brechzahldifferenz und eine GaAs-Schicht für einen störungsarmen, reproduzierbaren technologische Prozess benutzt.

Im ersten Epitaxieschritt werden die Schichten der HE-Laserstruktur bis einschließlich der aktiven Zone und ein Teil der p-Wellenleiterschicht, sowie die InGaP und GaAs

Zusatzschichten gewachsen Nach diesem Epitaxieschritt werden die Wafer außerhalb der Epitaxieanlage strukturiert. Die abschließende GaAs-Schicht wurde mit holografischer und nasschemischer Techniken periodisch strukturiert, das heißt das die GaAs-Schicht in den Gräben vollständig bis auf die darunter liegende InGaP – Schicht entfernt wurde. Die weitere Prozessierung bis zum vollständigen Wachstum der Epitaxieschichten erfolgt in der Epitaxieanlage. Mittels einer materialelektiven Gasphasen-Ätztechnik wird zunächst im Epitaxiereaktor die freigelegte InGaP-Schicht zwischen den GaAs-Stegen entfernt. Dabei wird auch ein Teil der GaAs Schicht auf den Stegen entfernt. Dieser In-Situ Ätzprozess führt zu einer deutlichen Reduzierung der Sauerstoffkontaminierung, die bei der Ex-Situ Gitterherstellung eingetragen wurde. Weiterhin wird auf mehr als 70% der Fläche die InGaP-AlGaAs-Heterogrenze durch eine AlGaAs-AlGaAs-Grenze ersetzt. Damit wurde erreicht, dass der Bahnwiderstand gegenüber dem der HE-Laser nicht mehr messbar erhöht ist. Die reduzierte Sauerstoffkontamination führt zu geringeren internen Verlusten und ermöglicht bei optimaler Wahl der Gitterparameter eine Effizienz, die nahe an die der HE-Laser kommt.

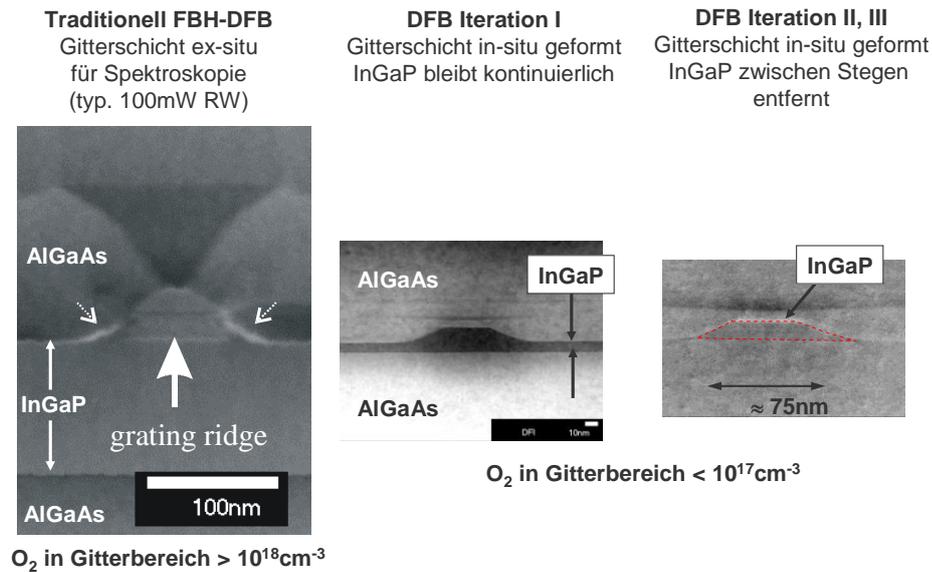


**Abb. 10:** Schema des neu entwickelten Herstellungsprozess für DFB-BA Diodenlaser.

**Rechts:** vertikale Querschnitt durch der Laserstruktur.

**Links:** Phasen des Herstellungsprozess. (a) Eine Teilstruktur wurde zuerst gewachsen, mit InGaP und GaAs als letzte Schichten. Die GaAs-Schicht wurde nasschemisch strukturiert. (b) Eine selektive Gasphase-Ätzung in der Epitaxie-Anlage reinigt die Oberfläche und entfernte das InGaP in den Bereichen zwischen den Gitterstegen. (c) Nach der Ätzung wird der Rest der vertikalen Struktur vollständig gewachsen.

Eine Strukturanalyse des Gitterbereiches wurde mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Gitterstege sauber und defektarm hergestellt werden können, wie in **Abb. 11** zu sehen ist. Eine Analyse mittels Sekundärer Ion Massenspektroskopie (SIMS) im Gitterbereich bestätigt, dass ein Sauerstoffgehalt kleiner als  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  erreicht wurde. Im Vergleich zu einer Prozessführung ohne Ätzung ist der Gehalt um circa eine Größenordnung reduziert und überschreitet nicht mehr die Höhe, die durch die vorgesehene Dotierung gegeben ist. Um diesen Ätzprozess reproduzierbar zu führen, wurde die Dicke der InGaP – Schicht auf 10nm reduziert. Für 4mm lange Laser kann damit noch eine hinreichend große Gitterwirkung erreicht werden.



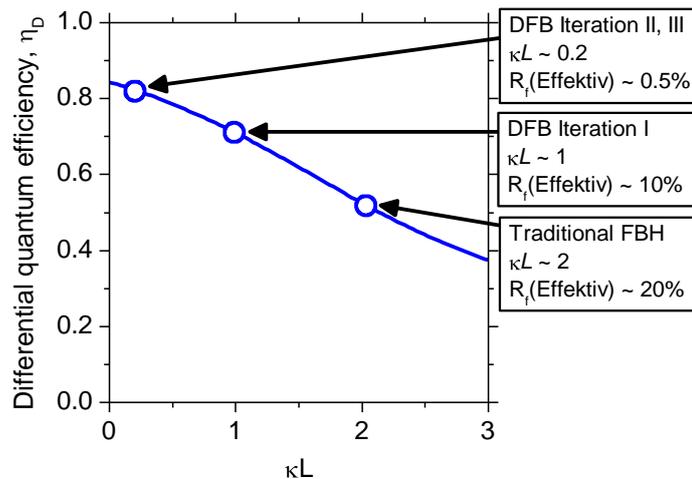
**Abb. 11:** TEM Querschnitte des Gitterbereiches.

**Links:** Traditionelle FBH-Gitter, wie sie für Anwendungen in Spektroskopie benutzt wurden. Die Gitterstege sind völlig mit Nasschemie strukturiert, haben eine Dicke  $> 50nm$  und enthalten  $>10^{18}cm^{-3}$  Sauerstoff. Eine InGaP Restschicht mit Dicke  $> 100 nm$  ist klar zu erkennen.

**Mitte:** Neu entwickelte FBH DFB-BA Gitter, für It. 1. Die finalen Gitterstege sind in der Epitaxie Anlage strukturiert. Der Sauerstoffgehalt ist  $<10^{17}cm^{-3}$ , und die InGaP Restschicht hat eine Dicke  $\sim 10nm$ .

**Rechts:** Weiter entwickelte FBH DFB-BA Gitter, für It. 2 und 3. Die finalen Gitterstege sind in der Epitaxie Anlage strukturiert. Der Sauerstoffgehalt ist  $<10^{17}cm^{-3}$ , und die InGaP Restschicht ist vollständig entfernt.

Neben den technologischen Untersuchungen zur Realisierung der Gitter wurden Simulationen zur Wirksamkeit der Gitterstruktur durchgeführt. Entscheidende Größe ist hier der sogenannte Koppelkoeffizient  $\kappa$ . Er gibt quasi die spektral selektive Resonatorgüte an, beziehungsweise entspricht multipliziert mit der Kavitätslänge dem Reflexionsgrad des Auskoppelspiegels. Die zu erwartende Steilheit der Leistungskennlinie über dem Betriebsstrom ist damit direkt von  $\kappa$  bei vorgegebener Resonatorlänge abhängig. **Abb. 12** zeigt eine Rechnung des Anstieges als Funktion der dimensionslosen Gitterstärke,  $\kappa L$ , für eine exemplarische Laserstruktur (der HE Laser Struktur für It. 1 und 2). Die Rechnungen wurden auf der Basis der Theorie gekoppelter Moden durchgeführt. Ein kleinerer Koppelkoeffizient bringt größere Anstiege, da ein größerer Anteil der optischen Leistung ausgekoppelt wird. Ein großer Anstieg ist natürlich für die Effizienz bei hoher Ausgangsleistung vorteilhaft, andererseits wird mit einem kleinen Koppelkoeffizienten die Laserschwelle ebenfalls erhöht und die spektrale Selektivität wird eingeschränkt. Letzteres betrifft das Verhältnis der Resonatorgüte mit Gitter bei der gewünschten Wellenlänge zur Resonatorgüte ohne Gitter, die durch die Restreflektivität der Auskoppelfacette gegeben ist. Die Einschränkung der spektralen Selektivität ist kritisch und zu optimieren, da die Wellenlänge des maximalen optischen Gewinns nicht für alle Betriebsbedingungen mit der durch das Gitter vorgegebenen Wellenlänge übereinstimmt. Im Laserbetrieb ändert sich zwischen den Betriebsbedingungen für 1W und 10W Ausgangsleistung die Temperatur der aktiven Zone um circa 25K. (Standardaufbauten mit einem thermischen Widerstand von 3K/W). Das hat eine Verschiebung des maximalen optischen Gewinns um circa 10nm zur Folge. Die Stärke der Gitterkopplung muss also ausreichend sein, um das Anschwingen von Fabry-Perot-Moden zu unterdrücken.

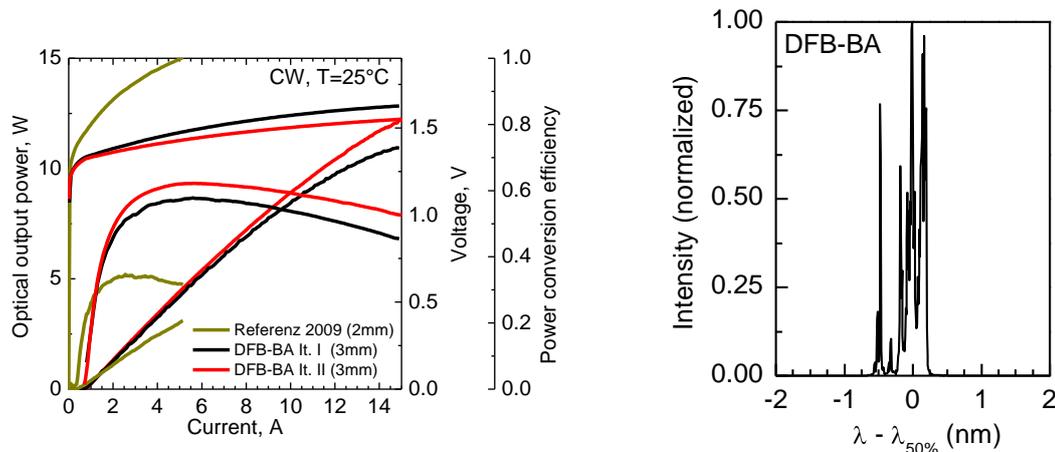


**Abb. 12:** Simulierter Steilheit der Strom-Leistungskennlinie als Funktion der Gitter Kopplungsstärke,  $\kappa L$ . Die Designpunkten für DFB-Iterationen 1, 2 und 3 sind gekennzeichnet.

Zur Optimierung des Koppelkoeffizienten, das heißt des effektiv wirksamen Reflexionsgrades, wurden die erhaltenen Messdaten der HE Laser als Referenz genutzt. Diodenlaserchips mit den HE-Strukturen (siehe **Absatz 2.1.2**) wurden mit Reflexionsgraden der Frontfacette zwischen 0.5% und 2% hergestellt. In diesem Bereich wurde eine Effizienz > 60% erreicht. Kleinere Reflexionsgrade reduzierten die Effizienz, aufgrund stark erhöhter Schwellenströme. Traditionelle FBH DFB-BA Diodenlaser nutzten Gitter mit einem  $\kappa L \sim 2$ , die einem effektiven Frontfacettengrad  $R_f \sim 20\%$  entsprechen und deutlich zu groß sind. DFB-BA Diodenlaser aus It. 1 nutzen Gitter mit  $\kappa L \sim 1$ , die einem Reflexionsgrad von  $R_f \sim 10\%$  entsprechen. Damit wurde das Optimum noch nicht erreicht. Die Schlussfolgerung dieser Vergleiche und Simulationen war es, einen Koppelkoeffizienten einzustellen, aus dem ein  $\kappa L \leq 0.5$  resultiert. In den Iterationen 2 und 3 wurde  $\kappa L$  bis auf 0.2 reduziert, welches einem Reflexionsgrad der Auskopplung von  $R_f \sim 0.5\%$  entspricht und damit mit dem Reflexionsgrad der maximalen Effizienz der HE-Laser konsistent war.

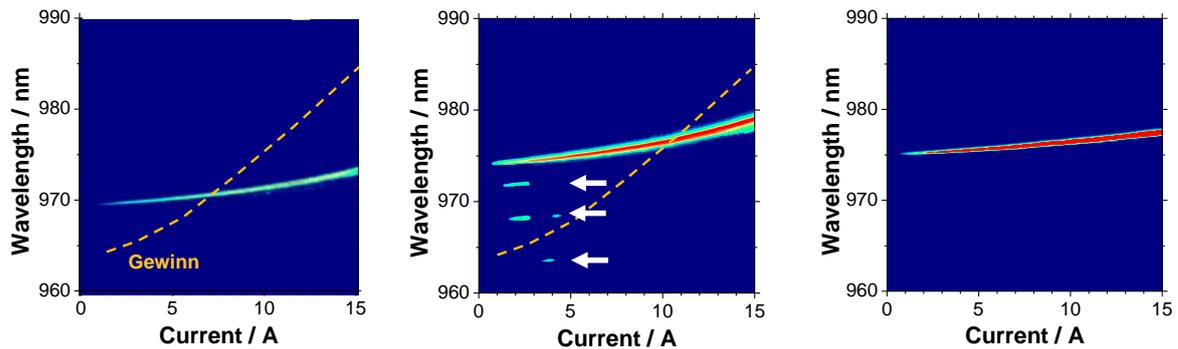
**Abb. 13** zeigt die elektrooptischen Eigenschaften der DFB-Laser. Die Referenzstruktur erreicht eine maximale Leistung um 4W, mit einer maximalen Effizienz um weniger als 40%. Der neu entwickelte DFB BA Laser aus It. 1 erreicht eine maximale Leistung um 11W und eine Spitzeneffizienz um 58%. Die weiter optimierte DFB BA Struktur von It. 2 erreicht eine maximale Leistung von > 12W, hat eine Spitzeneffizienz > 60%, und zeigt eine Effizienz beim angestrebten Arbeitspunkt 10W von 58%. Diese Ergebnisse sind momentan weltweit die Spitzenwerte für DFB-BA-Laser.

Ein exemplarisches Spektrum bei einer Ausgangsleistung von 10W ist in **Abb. 13** dargestellt. Es zeigt eine Spektralbreite um 0.7nm (95% Leistungseinschluss).



**Abb. 13:** Charakteristika von DFB-Lasern (It1 schwarz, mit 3mm Resonatorlänge, It. 2 rot, mit 3mm Resonatorlänge) im Vergleich mit einer FBH-Referenzstruktur von 2008 (dunkelgelb, mit 2mm Resonatorlänge)  
**Links:** Optische Ausgangsleistung, Flussspannung und Effizienz als Funktion des Stromes.  
**Rechts:** Optische Intensität als Funktion der Wellenlänge  
 (relativen Abstand von Wellenlänge Schwerpunkt,  $\lambda_{50\%} = 975\text{nm}$ , ist dargestellt).

Obwohl Effizienz und Leistung bereits durch die It. 1 und 2 stark verbessert und die Projektziele quasi erreicht wurden, gab es noch Optimierungsbedarf in Bezug auf die spektralen Eigenschaften im gesamten Betriebsbereich zwischen 1W und 10W, wie in **Abb. 14** dargestellt ist. Im Bereich kleiner Ausgangsleistungen traten spektrale Nebenmoden auf, die für einige industrielle Anwendungen störend sein können. Da diese ebenfalls spektral sehr schmalbandig waren, konnten sie den Gitterresonanzen vertikaler Obermoden zugeordnet werden. Das Anschwingen dieser Obermoden wurde ermöglicht durch den Unterschied in der spektralen Lage zwischen dem maximalen optischen Gewinn und der Lage der Gitterresonanz für die Grundmode. Der höhere Koppelkoeffizient für die vertikalen Obermoden kompensiert dabei deren deutlich höheren optischen Verluste durch die Substratkopplung. Bei größeren Leistungen wird der Halbleiterchip wärmer und der maximale optische Gewinn verschiebt sich in den langwelligeren Bereich, so dass diese Nebenmoden dann keinen ausreichenden optischen Gewinn für den Laserbetrieb mehr haben. Um die Laser über einen größeren Temperaturbereich spektral stabilisieren zu können, wurde die Schichtstruktur für die dritte Iteration dahingehend geändert, dass nur eine vertikale Mode möglich war. Dazu wurde der Wellenleiter dünner gemacht und die Brechzahldifferenz zwischen Wellenleiter und n-Mantelschicht verringert (siehe Abb. 6 in Abschnitt 2.1.2). Durch diese Änderungen wurde allerdings auch das vertikale Fernfeld vergrößert, auf  $54^\circ$  für Strukturen ohne Gitter und auf  $47^\circ$  für Strukturen mit Gitter. Diese Vergrößerungen, insbesondere die für die DFB Laser, stellen jedoch laut Aussage der Projektpartner noch kein Problem für die Anwendungen dar.



**Abb. 14.** Emissionswellenlänge als Funktion des Betriebsstromes von exemplarischen DFB BA Lasern. Die räumlich integrierte Intensität ist in einer Falschfarbskala dargestellt, linear skaliert. Die Gewinnwellenlänge ist schematisch mit einer gestrichelte Linie gezeigt

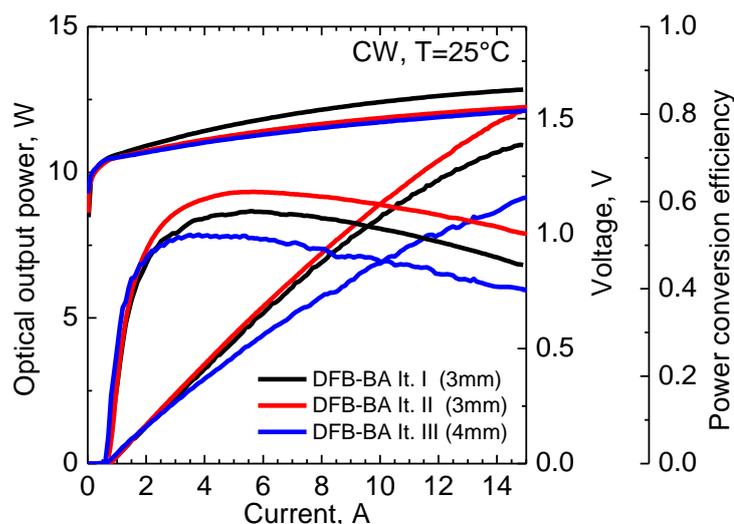
**Links:** DFB BA Laser aus It. 2 mit Gewinn- und Gitterwellenlänge für 7A zeigen saubere Spektren.

**Mitte:** DFB BA aus It. 2 mit Gewinn- und Gitterwellenlänge für 11A entwickelt → zusätzliche Struktur bei kleineren Ströme.

**Rechts:** DFB BA Laser aus It. 3, basierend auf einer Änderung in der vertikalen Struktur.

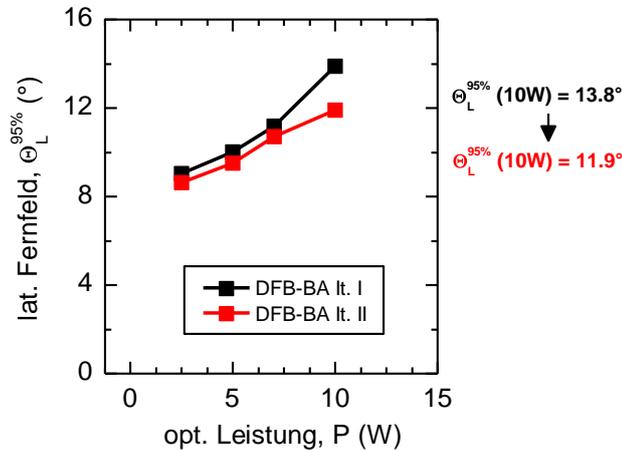
Während der kostenneutralen Verlängerung wurde eine weitere Iteration von DFB Lasern hergestellt, basierend auf dieser neuen vertikalen Struktur. Die Resonatorlänge wurde von 3mm auf 4mm verlängert, und die Gitterstärke bleibt um  $\kappa L \sim 0.2$ . Die geänderte vertikale Struktur zeigt das erwartete verbesserte Spektrum, völlig ohne Zusatzstruktur, wie in **Abb. 14** zu sehen ist.

Die Kennlinien der DFB-Laser aus den drei Iterationen sind in **Abb. 15** dargestellt. Leider konnte mit der It. 3 zwar die spektrale Verbesserung demonstriert werden, aber durch einen Prozessfehler, der zu einer Sauerstoffkonzentration an der Grenzfläche zwischen erster und zweiter Epitaxie führte, erreichte die Spitzeneffizienz nur um 50%. Hierin zeigt sich dass die Durchführung der Zwischrittepitaxie für hocheffiziente Bauelemente einen erheblichen Aufwand für das Erreichen einer stabilen Reproduzierbarkeit benötigt.



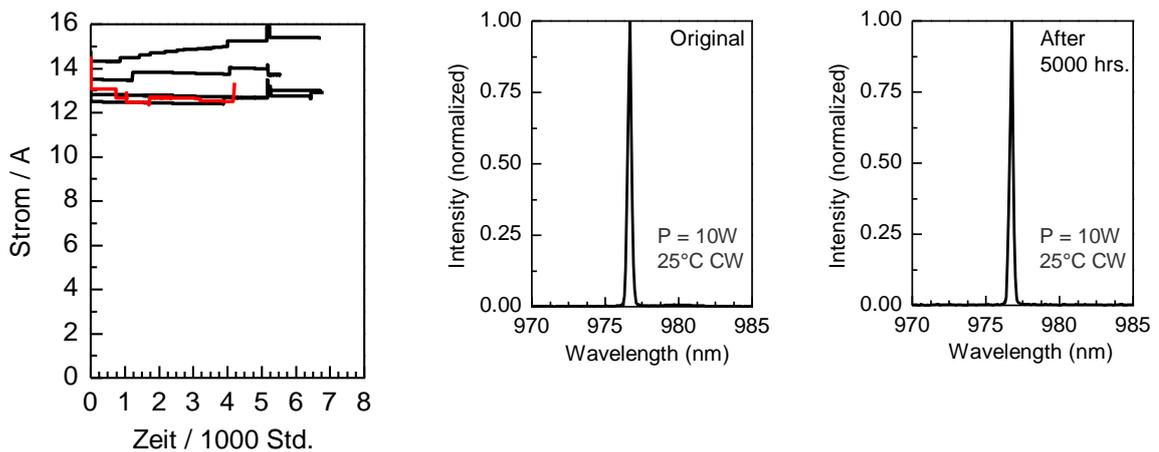
**Abb. 15:** Charakteristika von DFB-Laser Vergleich der Iterationen  
It. 1 (schwarz, mit 3mm Resonatorlänge),  
It. 2 (rot, mit 3mm Resonatorlänge),  
It. 3 (blau, mit 4mm Resonatorlänge)

Die lateralen Fernfelder wurden auch für die DFB Laser untersucht. **Abb. 16** zeigt die Fernfeldwinkel als Funktion der optischen Ausgangsleistung. Ein laterales Fernfeld um 10W wurde von 14° (It. 1) bis auf 12° (It. 2) reduziert (Werte mit 95% Leistungseinschluss). Die Verbesserung basiert hauptsächlich auf der erhöhten Effizienz. Die Reduktion ist vielversprechend, aber die 7° Spezifikation konnte nicht erreicht werden.



**Abb. 16:** Lateraler Fernfeldwinkel (95% Leistungseinschluss,  $\Theta_V^{95\%}$ ) als Funktion der optischen Leistung für DFB-Laser It. 1 (schwarz, mit 3mm Resonatorlänge) It. 2 (rot, mit 3mm Resonatorlänge)

Fünf exemplarische DFB Laser von It. 2 wurden bei 10W gealtert. In **Abb. 17** ist der Betriebsstrom für 10W optische Leistung über der Zeit dargestellt. Nach 4000 h ist ein Laser ausgefallen. Ein weiterer Laser zeigt eine relativ starke Degradation über die ersten 5000h mit nachfolgend konstantem Betriebsstrom. Die anderen DFB-Laser zeigten keine Degradation. Nach einer Alterungszeit von 5000h wurden die spektrale Charakterisierung der DFB Laser wiederholt. Exemplarische Spektren für einen der DFB BA Laser bei einer Ausgangsleistung von 10W sind ebenfalls in **Abb. 17** dargestellt. Es sind keine Änderungen zu erkennen.



**Abb. 17:** Alterungsversuch von fünf DFB Lasern It. 2.

**Links:** Betriebsstrom als Funktion der Alterungszeit.

**Mitte:** Exemplarische Spektren um 10W Ausgangsleistung vor Alterung.

**Rechts:** Exemplarische Spektren um 10W Ausgangsleistung nach 5000 Std. Alterungszeit.

### 2.1.4 Lieferungen

Während des Projektes wurden Halbleiterchips in Form von Barren und als Einzelemitter sowie auf Submounts montierte Diodenlaser an die Projektpartner geliefert. Die Anzahl ist in **Tabellen 3** und **4** präsentiert. Insgesamt wurden 386 Barren, 35 montierte Einzelemitter und 138 unmontierte Einzelemittern geliefert.

**Tabelle 3:** Barrenlieferungen

Partner	ELoD Barren	HE Barren	DFB-BA Barren
DiLAS	41	47	34
Jenoptik	36	16	29
ILT	38	54	91
Summe	386		

**Tabelle 4:** Einzelemitter Lieferungen

Partner	ELoD Einzelemitter	HE Einzelemitter	DFB-BA Einzelemitter
ILT	14x montierte 108x unmontierte	7x montierte	30x unmontierte
GRINTECH	5x montierte	5x montierte	
INGENERIC	2x montierte	2x montierte	
Summe	35x montierte, 138x unmontierte		

## 2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Erfolgt in einem getrennten Bericht.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten wurden in Übereinstimmung mit den Arbeitspakten und der Finanzplanung der Vorhabensbeschreibung durchgeführt.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit

Während der Laufzeit des Vorhabens zeigten verschiedene Firmen (z.B. Jenoptik, Trumpf, nLight, Teradiode) ein starkes Interesse an den drei Typen der entwickelten Diodenlaser, der ELoD-, den HE- und den DFB- Diodenlasern. Hier sind weiterführende Forschungsaufträge an das FBH möglich.

Das ELoD Design wird eine Basis im Rahmen eines im September 2012 gestarteten europäischen Vorhabens, BRIDLE („**BR**illiant **I**ndustrial **D**iode **L**as**ER**“) <sup>1</sup> bilden. In diesem Vorhaben werden brillante Laserquellen für das Metallschneiden entwickelt. Projektpartner sind unter anderen die Firma Dilas und das FhG ILT Aachen, die bereits Partner in diesem Verbundprojekt waren.

Die Ergebnisse der Technologie der DFB-Laser werden für ein von der Leibniz-Gemeinschaft gefördertes Vorhaben genutzt. In dem Vorhaben werden optimierte Diodenlaser als Pumpquellen für Großlaseranlagen<sup>2</sup> entwickelt. Monolithisch

<sup>1</sup> BRIDLE Projekt: [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/104564\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/104564_en.html) , FKZ. 314719

<sup>2</sup> Cryolaser Projekt: <http://www.fbh-berlin.de/sondervorhaben/cryolaser>

wellenlängenstabilisierte Diodenlaser sind dafür besonders vorteilhaft, da sie die schmalen Absorptionslinien von gekühlten Festkörperlaser effizient pumpen können, um einen maximalen Systemwirkungsgrad zu erreichen.

## 2.5 Fortschritt bei anderen Stellen

- Die Firma Alfalight berichtet in Jahr 2009, dass sie eine Effizienz um 61% in eine DFB BA Laser um 975nm erreicht hat. Die Leistung ist aber mit maximal 7W pro 100µm Streifenbreite<sup>3</sup> deutlich unter dem im Projekt erreichten Ergebnissen..
- Die Firma JDSU präsentierte in Jahr 2012 optimierte DFB Diodenlaser mit In-Situ gereinigten Gittern basiert auf Zweischrittepitaxie<sup>4</sup>. Diese haben eine erhöhte Effizienz als Referenzdioden. Das Veröffentlichungsdatum ist später als die FBH Patentanmeldung, so wird die industrielle Anwendung von der FBH Technik nicht eingeschränkt.

## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

### 2.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Während des Vorhabens sind 7x referierte Artikeln, 9x Konferenzartikeln, 4x eingeladene Vorträge und 2x Patentanmeldungen entstanden. Details davon sind unten zu finden.

#### 2009 (1 x referierte Artikel, 2x Konferenzartikeln):

C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, O. Brox, F. Bugge, and G. Erbert "Narrow Vertical Far-Field 975-nm Broad-Area DFB Lasers for Wide Temperature Range Operation" IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 21, no. 9, pp. 593-595 (2009).

C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, O. Brox, F. Bugge and G. Erbert "Wide Temperature Range High Power Broad Area 975nm DFB Lasers" Conf. on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conf. (CLEO/IQEC), Baltimore, MD, Jun. 1-6, paper CWF6 (2009).

P. Crump, H. Wenzel, G. Erbert, and G. Tränkle "Advances in spatial and spectral brightness in 800-1100 nm GaAs-based high power broad area lasers" Proc. SPIE, vol. 7483, no. 74830B (2009).

#### 2010 (2 x referierte Artikeln, 3x Konferenzartikeln, 1 x Patentanmeldung):

ELoD-Patent: P. Crump, G. Erbert, A. Pietrzak, H. Wenzel, F. Bugge und M. Zorn „Optoelektronisches Halbleiterbauelement und Verfahren zu dessen Herstellung“, Deutsches Patent- und Markenamt, Aktenzeichen 10 2009 024 945,1-54 (10.06.2009). Nachfolgende Anmeldung an dem europäischen Patentamt, Aktenzeichen 10 165 590.0 (06.06.2010).

C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, O. Brox, A. Maaßdorf, G. Erbert, G. Tränkle "11W broad area 976 nm DFB lasers with 58% power conversion efficiency" Electron. Lett., vol. 46, no. 8, pp. 580-581 (2010).

P. Crump, C.M. Schultz, A. Pietrzak, S. Knigge, O. Brox, A. Maaßdorf, F. Bugge, H. Wenzel and G. Erbert "975-nm high-power broad area diode lasers optimized for narrow spectral linewidth applications" Proc. SPIE, vol. 7583, no. 75830N (2010).

P. Crump, A. Pietrzak, F. Bugge, H. Wenzel, G. Erbert, and G. Tränkle "975 nm high power diode lasers with high efficiency and narrow vertical far field enabled by low index quantum barriers" Appl. Phys. Lett., vol. 96, no. 131110 (2010).

<sup>3</sup> M. Kanskar, H. An, J. Cai, C. Galstad, T. Klos, D. Olson, E. Stiers, Y. He, D. Zhou and S. H. Macomber, "Spectrally Narrowed, Wavelength-Stabilized, High-Efficiency and High-Brightness Diodes for Precision Pumping", Proc. 21<sup>st</sup> Solid State and Diode Laser Technology Review, Albuquerque, NM, USA, Paper "Diode Lasers 2" (2008)

<sup>4</sup> P. Doussiere, M. Tashima, H. Djie, K. W. Lee, V. Wong, D. Venables, V. Rossin and E. Zucker, "830nm high power single mode DFB laser for high volume applications" Proc. SPIE 8277, 82770A (2012)

Pietrzak, P. Crump, H. Wenzel, F. Bugge, G. Erbert, and G. Tränkle "High Power 1060 nm Ridge Waveguide Lasers with Low-Index Quantum Barriers for Narrow Divergence Angle" Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO/QELS), San Jose, CA, May 16-21, paper CWE2 (2010).

C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, O. Brox, A. Maaßdorf, G. Erbert and G. Tränkle "11W Broad Area 976nm DFB Lasers with 58% Efficiency" Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO/QELS), San Jose, CA, May 16-21, paper CWE1 (2010).

**2011 (1 x referierte Artikel, 2x Konferenzartikeln, 2 x engladener Vorträge, 1 x Patentanmeldung):**

P. Crump, C.M. Schultz, H. Wenzel, S. Knigge, O. Brox, A. Maaßdorf, F. Bugge and G. Erbert "Reliable operation of 976nm High Power DFB Broad Area Diode Lasers with over 60% Power Conversion Efficiency" Proc. SPIE, vol. 7953, no. 79531G (2011). **(Invited)**

C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, S. Knigge, O. Brox, A. Maaßdorf, F. Bugge and G. Erbert "Efficiency-optimized 973nm high power broad area DFB lasers with overgrown aluminium-free gratings for peak power conversion of 63%" European Conf. on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conf. (CLEO Europe - EQEC 2011), Munich, Germany, May 22-26, paper CB7.3-WED (2011).

P. Crump, C.M. Schultz, H. Ekhteraei, H. Wenzel and G. Erbert "The Modal Content of High Power Broad Area Diode Lasers with Integrated Distributed Feedback Gratings" IEEE Photonics 2011 Conference (IPC11) Arlington, USA, Oct 9-13, pp. 581-582 (2011).

A. Pietrzak, P. Crump, H. Wenzel F. Bugge, J. Fricke, and G. Erbert "High Power Diode Lasers with Very Narrow Vertical Beam Divergence" Photonex 2011, Coventry, UK, Oct. 18-19 (2011). **(Invited)**

Pietrzak, P. Crump, H. Wenzel, G. Erbert, F. Bugge, and G. Tränkle "Combination of Low-Index Quantum Barrier and Super Large Optical Cavity Designs for Ultranarrow Vertical Far-Fields From High-Power Broad-Area Lasers" IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 17, no. 6, pp. 1715-1722 (2011).

DFB-Patent: O. Brox, F. Bugge, P. Crump, G. Erbert, A. Maaßdorf, C.M. Schultz, H. Wenzel and M.Weyers, "Diodenlaser und Verfahren zur Herstellung eines Diodenlasers mit hoher Effizienz", Deutsches Patent- und Markenamt, Aktenzeichen 102011086744.9 (21.11.2011).

**2012 (4 x referierte Artikel, 2x Konferenzartikeln, 2 x engladene Vorträge):**

C.M. Schultz, P. Crump, A. Maaßdorf, O. Brox, F. Bugge, A. Mogilatenko, H. Wenzel, S. Knigge, B. Sumpf, M. Weyers, G. Erbert, and G. Tränkle "In situ etched gratings embedded in AlGaAs for efficient high power 970nm distributed feedback broad-area lasers" Appl. Phys. Lett., vol. 100, no. 201115 (2012).

P. Crump, S. Böldicke, C.M. Schultz, H. Ekhteraei, H. Wenzel and G. Erbert "Experimental and theoretical analysis of the dominant lateral waveguiding mechanism in 975 nm high power broad area diode lasers" Semicond. Sci. Technol., vol. 27, no. 045001 (2012).

P. Crump, O. Brox, F. Bugge, J. Fricke, C. Schultz, M. Spreemann, B. Sumpf, H. Wenzel, and G. Erbert "High Power, High Efficiency Monolithic Edge-Emitting GaAs-Based Lasers with Narrow Spectral Widths" J. J Coleman, A. C. Bryce, C. Jagadish, Editors: Semiconductors and Semimetals, vol. 86, SEMSEM, Advances in Semiconductor Lasers, Burlington, UK: Academic Press, ISBN-13: 978-0-12-391066-0, pp. 49-91 (2012). **(Invited)**

P. Crump, S. Hengesbach, U. Witte, H.D. Hoffmann, G. Erbert, G. Tränkle "High Power Diode Lasers Optimized for Low Loss Smile-insensitive External Spectral Stabilization" IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 24, no. 8, pp. 703-705 (2012).

P. Crump, J. Fricke, C.M. Schultz, H. Wenzel, S. Knigge, O. Brox, A. Maaßdorf, F. Bugge and G. Erbert "10W-reliable 90µm-wide broad area lasers with internal grating stabilization" Proc. SPIE, vol. 8241, no. 82410N (2012).

J. Pomplun, H. Wenzel, S. Burger, L. Zschiedrich, M. Rozova, F. Schmidt, P. Crump, H. Ekhteraei, C.M. Schultz, G. Erbert "Thermo-optical simulation of high-power diode lasers" Proc. SPIE, vol. 8255, no. 825510 (2012).

C.M. Schultz, P. Crump, A. Maaßdorf, O. Brox, F. Bugge, A. Mogilatenko, H. Wenzel, S. Knigge, B. Sumpf, M. Weyers and G. Erbert "Buried DFB gratings floating in AlGaAs with low oxygen contamination enable high power and efficiency DFB lasers" IEEE Summer Topical - High-Power Semiconductor Laser, Seattle, USA, Jul 9-11, WA4.1 (2012). **(Invited)**

P. Crump, S. Böldicke, C.M. Schultz, H. Ekhteraei, H. Wenzel and G. Erbert "Diagnosing and addressing the limitations to lateral far field angle in high power broad-area diode lasers" IEEE Summer Topical - High-Power Semiconductor Laser, Seattle, USA, Jul 9-11, WA4.3 (2012). **(Invited)**

**2.6.2 geplante Veröffentlichungen**

In Arbeit sind zwei eingeladene Artikel, eine Dissertation und ein weiterer Konferenzbeitrag.

Details sind unten zu finden.

P. Crump, S. Knigge, A. Maaßdorf, F. Bugge, S. Hengesbach, U. Witte, H.D. Hoffmann, G. Erbert, and G. Tränkle. „Low-loss, smile-insensitive external frequency-stabilization of high power diode lasers enabled by vertical designs with extremely low divergence angle and high efficiency“ eingereicht bei SPIE Photonics West 2013 (Entscheidung um 01.10.2012)

P. Crump, C. M. Schultz, H. Wenzel, G. Erbert and G. Tränkle “Efficiency-optimized monolithic frequency stabilization of high power diode lasers”, angenommen für J Phys D, mit kleine Änderungen (**Invited**)

P. Crump „Efficient High-Power Laser Diodes“ IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. (**Invited**, Termin = 01.11.2012)

C. M. Schultz „Analysis and mitigation of the factors limiting the efficiency of high power distributed feedback diode lasers“ Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. Nat (Technischen Universität Berlin, Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik). Eingereicht, wartet auf Gutachten.