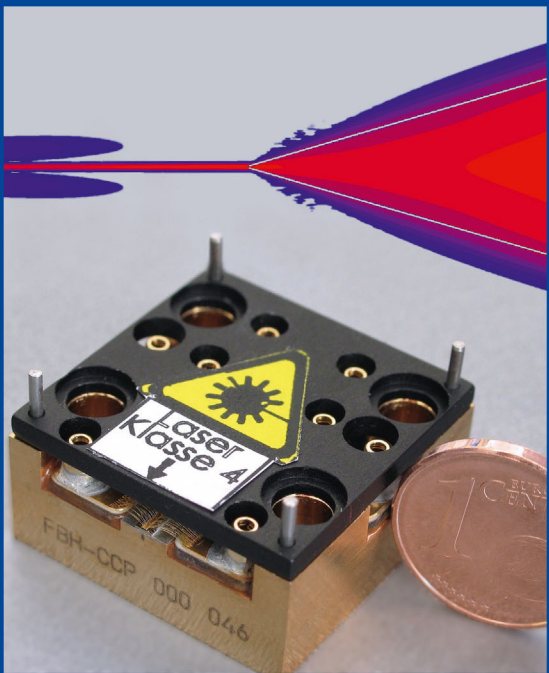


Forschungsberichte aus dem  
Ferdinand-Braun-Institut,  
Leibniz-Institut  
für Höchstfrequenztechnik

## Strahlgüte von brillanten Hochleistungs-Trapezlasern für den Wellenlängenbereich bei 808 nm









aus der Reihe:

## **Innovationen mit Mikrowellen und Licht**

### **Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik**

Band 56

Frank Dittmar

Untersuchung der Strahlgüte von brillanten Hochleistungs-  
Trapezlasern für den Wellenlängenbereich bei 808 nm

**Herausgeber: Prof. Dr. Günther Tränkle, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich**

Ferdinand-Braun-Institut  
Leibniz-Institut  
für Höchstfrequenztechnik (FBH)  
Gustav-Kirchhoff-Straße 4  
12489 Berlin

Tel. +49.30.6392-2600  
Fax +49.30.6392-2602

E-Mail [fbh@fbh-berlin.de](mailto:fbh@fbh-berlin.de)  
Web [www.fbh-berlin.de](http://www.fbh-berlin.de)



## Innovations with Microwaves and Light

### Research Reports from the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

#### Preface of the Editors

Research-based ideas, developments, and concepts are the basis of scientific progress and competitiveness, expanding human knowledge and being expressed technologically as inventions. The resulting innovative products and services eventually find their way into public life.

Accordingly, the *“Research Reports from the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik”* series compiles the institute’s latest research and developments. We would like to make our results broadly accessible and to stimulate further discussions, not least to enable as many of our developments as possible to enhance everyday life.

Today’s high-power diode lasers achieve output powers up to 10 W. For integration into optical systems, they also need to provide first-class beam quality. Tapered lasers offer a promising approach to combine the excellent beam quality of ridge waveguide lasers with the high output power of broad area lasers. This work presents a systematic theoretical and experimental study of tapered lasers emitting at 808 nm – comprising the design of the vertical structure and the way towards an optimized lateral design. Using the optimal design parameters, nearly diffraction limited output power up to 4 W in continuous wave operation was achieved together with reliable operation over 5,000 h at 2 W. In pulsed mode with ns pulses, a peak power in the 10 W range along with a good beam quality was obtained. Hence, these devices demonstrated their suitability for applications like pumping of solid-state lasers and non-linear frequency conversion.

We wish you an informative and inspiring reading.

Prof. Dr. Günther Tränkle  
Director

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich  
Deputy Director

#### The Ferdinand-Braun-Institut

The Ferdinand-Braun-Institut researches electronic and optical components, modules and systems based on compound semiconductors. These devices are key enablers that address the needs of today’s society in fields like communications, energy, health and mobility. Specifically, FBH develops light sources from the visible to the ultra-violet spectral range: high-power diode lasers with excellent beam quality, UV light sources and hybrid laser systems. Applications range from medical technology, high-precision metrology and sensors to optical communications in space and integrated quantum technology. In the field of microwaves, FBH develops high-efficiency multi-functional power amplifiers and millimeter wave frontends targeting energy-efficient mobile communications as well as car safety systems. In addition, compact atmospheric microwave plasma sources that operate with economic low-voltage drivers are fabricated for use in a variety of applications, such as the treatment of skin diseases.

The FBH is a competence center for III-V compound semiconductors and has a strong international reputation. FBH competence covers the full range of capabilities, from design to fabrication to device characterization.

In close cooperation with industry, its research results lead to cutting-edge products. The institute also successfully turns innovative product ideas into spin-off companies. Thus, working in strategic partnerships with industry, FBH assures Germany’s technological excellence in microwave and optoelectronic research.



# **Untersuchung der Strahlgüte von brillanten Hochleistungs-Trapezlasern für den Wellenlängenbereich bei 808 nm**

vorgelegt von

**Dipl.-Phys.  
Frank Dittmar**

aus Essen

von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik –  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften  
– Dr. rer. nat. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Bernd Tillack  
Gutachter: Prof. Dr. Günther Tränkle  
Gutachter: PD Dr. Bernd Sumpf  
Gutachter: Prof. Dr. Martin R. Hofmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19. März 2019

Berlin 2020



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2020

Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2020

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2020

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2020

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7167-7

eISBN 978-3-7369-6167-8

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.  
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

# Kurzfassung

Halbleiterlaser haben neue Anwendungen in der Materialbearbeitung, der Medizintechnik oder dem Pumpen von Festkörperlasern besetzt. Jedoch steht ihren Vorteilen hoher Leistung und Zuverlässigkeit, geringer Kosten und kleiner Baugröße eine vergleichsweise schlechtere Strahlgüte gegenüber. Das Trapezlaserkonzept bietet an dieser Stelle viel Verbesserungspotenzial. Hier setzt die vorliegende Arbeit mit der Untersuchung von Hochleistungs-Trapezlaserdioden an. Deren Ziel ist die Maximierung von Strahlgüte und Brillanz dieser Laser. Zu diesem Zweck wird der Zusammenhang zahlreicher Designparameter mit der optischen Leistung und der Strahlgüte, also der erreichbaren Brillanz, systematisch untersucht und physikalisches Verständnis zur Strahlgüte von Trapezlasern erarbeitet.

Die untersuchten 808 nm Laserdioden verfügen über eine Schichtstruktur, deren weiterentwickelter Wellenleiter eine Reduzierung der Vertikaldivergenz auf nur  $15^\circ$  sowie eine geringere Facettenbelastung ermöglicht, was für die Anwendung der Laserdioden gleichermaßen von Vorteil ist. Darauf aufbauend werden im Rahmen dieser Arbeit sowohl der jeweilige Einfluss der Lateralstrukturen von Rippenwellenleiter und Trapezsektion als auch von optischen Eigenschaften (Frontfacettenreflektivität, effektiver Indexsprung) auf die Strahlgüte analysiert. Als entscheidend hierbei haben sich vor allem die Modenfilterwirkung des Rippenwellenleiters sowie die Homogenität des Brechungsindex im Trapez herausgestellt. Die Modenfilterwirkung wurde durch Implantation neben dem Ridge stabilisiert und gesteigert, was sich positiv auf die gemessene Strahlgüte auswirkte. Ferner konnte das Potenzial für eine hohe Brillanz von Dioden mit längerem Resonator ( $L = 4$  mm) aufgezeigt werden, die zudem noch auf Wärmesenken mit reduziertem thermischem Widerstand gelötet waren. Im Ergebnis der Untersuchungen werden konkrete Aussagen zur Optimierung des instabilen Resonators im Trapezlaser getroffen. Aufgrund dieser Vorgaben konnten die bisherigen Rekordwerte der Brillanz bei 808 nm um den Faktor 2 gesteigert werden. Beispielsweise wurde  $B = 460 \text{ MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$  mit 2.75 mm langen Lasern im CW-Betrieb erzielt, was aus einem Strahlpropagationsfaktor von  $M^2 = 1.3$  bei 3.9 W resultiert. Auch bei noch höheren Leistungen blieb die Strahlgüte noch nahezu beugungsbegrenzt. Im Verlauf der Reduzierung des vertikalen Fernfeldwinkels verbesserte sich die Strahlgüte. Nach zusätzlichen Optimierungsschritten bei der Trapezgeometrie konnte eine optimale Balance zwischen guter Strahlcharakteristik und hoher Konversionseffizienz von über 40% für einen vertikalen Fernfeldwinkel von  $18^\circ$  gefunden werden. Im Pulsbetrieb konnte die Ausgangsleistung auf mehr als 27 W erhöht werden; nahezu beugungsbegrenzte Strahlqualität wurde bei einer hohen Leistung von 9 W erzielt. An einigen Punkten leisteten die neben den Experimenten durchgeführten Simulationsrechnungen einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Vorgänge im Trapezlaser. Langzeittests über 7225 h bei 2 W (CW) werden vorgestellt, die eine hohe Zuverlässigkeit der Laser demonstrieren. Diese Experimente zeigen eine niedrige Degradationsrate von  $1.3 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$  sowie eine hohe MTF von 33400 h. Die Strahlgüte blieb größtenteils nahezu beugungsbegrenzt über der Testdauer. Auch werden Details und Fehlerberechnungen zu den konstruierten oder an die experimentellen Anforderungen angepassten Messplätzen vorgestellt.



# Abstract

Semiconductor lasers have found new applications in medical diagnostics and therapy, material processing as well as pumping of solid state lasers. However, their advantages of high power, reliability, low costs and small packaging are opposed to their comparatively worse beam quality. At this point, the tapered laser concept offers much potential for improvement. This is the background of the thesis presenting the investigation of high-power tapered lasers. Enhancing their beam quality and maximising the brightness is the goal of this work. For this purpose, the correlation of numerous laser parameters with the optical power and the beam quality, i. e. the brightness achievable, is investigated following a systematic approach. In this way, scientific findings on the beam quality of tapered lasers are worked out.

The 808 nm tapered lasers investigated come with layer structures with a vertical divergence reduced down to a value as low as  $15^\circ$  and with a lower facet load, both realised by a more sophisticated waveguide. This yields an advancement for the application of laser diodes. Based on these vertical structures, the influence of the lateral structure of the ridge waveguide and the taper section as well as optical properties (front facet reflectivity, effective index step) on the beam quality is analysed in this thesis. Particularly, the mode filter properties of the ridge waveguide and the homogeneity of the refractive index inside the taper have turned out to be crucial for the beam quality. Mode filtering has been stabilised and enhanced by implantation near the ridge waveguide, showing positive effects on the beam characteristics. Beyond that, the potential of diodes with a longer resonator ( $L = 4$  mm) for high brightness has been demonstrated, especially when they are soldered on heat sinks with reduced thermal resistance. As a result of the investigations presented, concrete statements are made about the optimisation of the instable cavity in the tapered laser. Following these design rules, the previous record values of the brightness at 808 nm had been outreached by a factor of 2. For example,  $B = 460 \text{ Mwcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$  was achieved with 2.75 mm long lasers in CW mode, resulting from a beam propagation ratio of  $M^2 = 1.3$  at 3.9 W. At even higher output power, the beam quality still remained nearly diffraction-limited. In the course of the reduction of the vertical divergence, the beam quality has been improved. After additional optimisation steps focused on the taper geometry, an optimal trade-off between good beam characteristics and high conversion efficiency of more than 40% could be found for a vertical far-field angle of  $18^\circ$ . In pulse mode operation, the output power of these lasers has been increased to more than 27 W; nearly diffraction-limited beam quality still has been achieved at a power as high as 9 W. At some points, simulation calculations which were performed accompanying the experiments made an important contribution to the knowledge of physical interactions inside the tapered laser.

In this work, long-term ageing tests over 7225 h at 2 W (CW) showing high reliability of the lasers are demonstrated. The experiments expose a low degradation rate of  $1.3 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$  as well as a high MTTF of 33400 h. The beam quality mostly remained nearly diffraction-limited over the test time. Furthermore, detailed information on the setups which had been constructed or adapted to the experimental demands are presented as well as the corresponding error calculations.



# Eigene Veröffentlichungen

Teile dieser Arbeit wurden in folgenden Publikationen bereits veröffentlicht:

- F. Dittmar, B. Sumpf, J. Fricke, G. Erbert, and G. Tränkle: „High-power 808 nm tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of  $M^2 = 1.9$  at  $P = 4.4$  W“, *Phot. Techn. Lett.*, Vol. 18, No. 4, pp. 601–603, 2006
- F. Dittmar, A. Klehr, B. Sumpf, A. Knauer, J. Fricke, G. Erbert, and G. Tränkle: „9 W output power from a 808 nm tapered diode laser in pulse mode operation with nearly diffraction-limited beam quality“, *J. Sel. Topics Quantum Electron.*, Vol. 13, No. 5, pp. 1194–1199, 2007
- F. Dittmar, A. Klehr, B. Sumpf, A. Knauer, J. Fricke, G. Erbert, and G. Tränkle: „9 W output power from a 808 nm tapered diode laser in pulsed mode operation with nearly diffraction-limited beam quality“, *IEEE 20th International Semiconductor Laser Conference, September 2006, Hawaii, USA, TuC2*, IEEE Catalog Number: 06CH37738C, ISBN 0-7803-9560-3, Library of Congress: 2005934158
- F. Dittmar, B. Sumpf, G. Erbert, and G. Tränkle: „Long-term reliability studies of high-power 808 nm tapered diode lasers with stable beam quality“, *Semicond. Sci. Technol.* 22, pp. 374–379, 2007
- O.B. Jensen, A. Klehr, F. Dittmar, B. Sumpf, G. Erbert, and P.E. Andersen, P.M. Petersen: „808 nm tapered diode lasers optimised for high output power and nearly diffraction-limited beam quality in pulse mode operation“, *Proceedings of SPIE*, 64560A, 2007
- B. Sumpf, K.-H. Hasler, P. Adamiec, F. Bugge, F. Dittmar, J. Fricke, H. Wenzel, M. Zorn, G. Erbert, and G. Tränkle: „High-brightness quantum well tapered lasers“, *J. Sel. Topics Quantum Electron.*, Vol. 15, No. 3, pp. 1009–1020, 2009
- F. Dittmar, B. Sumpf, H. Wenzel, G. Erbert, and G. Tränkle: „Impact of vertical structure on the beam quality of high-power 808 nm tapered diode lasers“, *European Semiconductor Laser Workshop 2005, September 23-24, Glasgow, UK*





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Hochleistungs-Diodenlaser mit hoher Strahlgüte</b>	<b>6</b>
2.1	Laserdiodentypen	6
2.2	Trapezlaser	9
<b>3</b>	<b>Aufbau der untersuchten Trapezlaser</b>	<b>14</b>
3.1	Schichtstruktur	14
3.2	Resonatorgeometrie	16
3.2.1	RW-Parameter	17
3.2.2	Trapez-Parameter	19
3.2.3	Implantation	20
3.3	Prozesstechnologie und Montage	22
<b>4</b>	<b>Charakterisierung und Messaufbau</b>	<b>24</b>
4.1	Kennlinienmessung	24
4.2	Charakterisierung der Strahlgüte	26
4.2.1	Parameter der Strahlgüte	26
4.2.2	Messverfahren und Aufbau	30
4.2.3	Messgenauigkeit	35
<b>5</b>	<b>Leistung und Strahlgüte in Abhängigkeit der Resonator- und elektro-optischen Parameter</b>	<b>38</b>
5.1	Trapezlaser mit 2.75 mm Resonatorlänge	39
5.1.1	Optische Leistung	39
5.1.2	Variation von RW-Parametern zur Strahlgüteoptimierung	49
5.1.3	Frontfacettenreflektivität	55
5.1.4	Strahlgüte bei zusätzlichen Modenfiltern	58
5.1.5	Optimierung der Brillanz	67



5.2	Trapezlasers mit verlängerterem Resonator	76
5.2.1	Optische Leistung	76
5.2.2	Optimierung von Längs- und Lateralgeometrie	85
5.2.3	Reduzierte vertikale Divergenz	96
5.2.4	Pulsbetrieb	105
5.2.5	Astigmatismus	115
<b>6</b>	<b>Zuverlässigkeitsuntersuchungen</b>	<b>120</b>
6.1	Lebensdauertests	120
6.2	Strahlgüte	124
6.3	Ausfallursachen	126
6.4	Zusätzliche Modenfilter	129
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>131</b>
	<b>Anhang: Simulationsrechnungen</b>	<b>134</b>
A.1	Modellannahmen	134
A.2	Simulationsablauf	136
A.3	Lasers- und Materialparameter	138
	<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>140</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>143</b>

---

# Kapitel 1

## Einleitung

Ein wichtiger Bestandteil des derzeitigen und zukünftigen technologischen Fortschritts im „Jahrhundert des Lichts“ sind optische Technologien, die sich neue Anwendungsfelder insbesondere im industriellen Bereich erschließen [1]. Unternehmen der Optischen Technologien erzielten im Jahr 2005 am Standort Deutschland einen Umsatz von ca. 16,3 Milliarden Euro. Die Leitmärkte in diesem Segment sind Produktion, Gesundheit, Kommunikation, Energie und Umwelt. Deutschland hält bei diesen Technologien einen Marktanteil in Europa von fast 40%, auf dem Weltmarkt von etwa 8%. Bis zum Jahr 2015 erwartet die Branche weltweit ein durchschnittliches Wachstum von 7,6% pro Jahr, das sie in Deutschland noch übertreffen will. Bezeichnend für diesen Ausblick ist nicht zuletzt die hohe F&E-Quote in der deutschen Photonik-Branche von ca. 10%. Die Bedeutung dieser Investitionen zeigt sich in der Position am Markt; bei den Optischen Technologien für die Medizintechnik beispielsweise ist Deutschland weltweit die Nummer zwei, mit einem Marktanteil von 15% und einer Exportquote von knapp 75% [2, 3].

In den letzten Jahren sind zu den Anwendungsfeldern der Materialbearbeitung bzw. Fertigungstechnik und der Medizintechnik weitere Anwendungen zum Beispiel in der Drucktechnik oder in der Sensorik hinzugekommen. In Zukunft wird der Laser auch in neuen Produkten und -feldern, beispielsweise der portablen Display-Technologie und der Umweltanalytik zu finden sein; auch ist der Einsatz von Lasern für eine noch effizientere Motorzündung ein Thema der Forschung [4]. Ferner sei eine gestiegene Nachfrage aus dem militärischen und sicherheitstechnischen Bereich nicht verschwiegen. Abhängig von der jeweiligen Anwendung stehen folgende, charakteristische Eigenschaften des Lasers oder eine Kombination derselben im Vordergrund: hohe optische Leistungsdichte im Fokus (ca. 500 kW/mm<sup>2</sup> [5]), hoher Wirkungsgrad (bis über 70%), gute Strahlformungseigenschaften, schmales Emissionsspektrum (Piko- bis Nanometer FWHM).

Eine zunehmend wichtige Funktion übernehmen in dem Zusammenhang die Diodenlaser, deren Verbreitung gerade in der Materialbearbeitung mit anhaltender Tendenz stark zunimmt. Hierbei sind die derzeit wichtigsten Verfahren das Schneiden, Schweißen und Beschriften mit Laserlicht. Nichtsdestotrotz liegt insbesondere im Bereich der Lasermaterialbearbeitung noch erhebliches Entwicklungs- und Einsatzpotenzial für Diodenlaser, da dort erst ca. 10 bis 20% der photonischen Anwendungen überhaupt erschlossen sind [3]. Diese Entwicklung spiegelt sich in Typ und Aufbau der Laserstrahlquellen wider. Gerade die Materialbearbeitung steht exemplarisch für die Verschiebung des Einsatzes unterschiedlicher Lasertypen: Der „klassische“, verbreitete Kohlendioxid-Laser wurde bei einigen Applikationen schon durch

lampengepumpte Festkörperlaser mit höherer Strahlgüte verdrängt. Anschließend wurden und werden die hierin verwendeten Bogen- oder Blitzlampen als Pumpquelle durch Laserdioden ersetzt. Die diodengepumpten Systeme sind als Stab-, Scheiben-, oder Faserlaser ausgeführt, wobei in dieser Gruppe die Scheiben- und Faserlaser ein besonders starkes Wachstum in der Verbreitung aufweisen [6], nicht zuletzt aufgrund ihrer hohen Strahlgüte bei hoher Leistung. Im nächsten Schritt, der derzeit vorstatten geht, wird die optische Ausgangsleistung von Diodenlasern direkt auf dem Werkstück genutzt. Derartige, kommerziell verfügbare Lasersysteme werden bereits zum partiellen Laserhärten, dem Kunststoffschweißen, der Oberflächenbearbeitung, dem Löten und dem Schweißen dünner Bleche eingesetzt. Gerade in einem solchen Aufbau kann der Halbleiterlaser seine Vorteile hoher potenzieller Zuverlässigkeit bei niedrigen Beschaffungs- und Betriebskosten, langer Lebensdauer, sehr kompakter Bauform und hohem, elektro-optischem Wirkungsgrad von typischerweise über 50% zur Geltung bringen. Die Energieeffizienz diodengepumpter Festkörperlaser liegt immerhin noch bei bis zu 30%, was um eine Größenordnung über der lampengepumpten Bauvariante liegt. Das entsprechende Kostensenkungspotenzial im Produktionsbereich durch die Diodenlaser ist angesichts der hohen und voraussichtlich weiter steigenden Energiekosten signifikant [7]. Hierzu trägt auch das auf die Anregung des Festkörpers abgestimmte, nur Piko- bis Nanometer schmale Emissionsspektrum bei.

In der Vergangenheit resultierte die Verlagerung hin zu Diodenlasern vor allem aus der Steigerung ihrer Ausgangsleistung auf das für die Applikation notwendige Maß einerseits und einer Verlängerung ihrer Lebensdauer andererseits. Für die Materialbearbeitung z. B. werden optische Leistungen oberhalb von 50 W bis in den Kilowattbereich benötigt; als Lebensdauer wird im industriellen Umfeld typischerweise eine MTTF von 10.000...30.000 h (mean time to failure) spezifiziert. In dem Zusammenhang kann auf einen erfolgreichen Langzeittest von über 13 Jahren Dauer verwiesen werden, der an 980 nm Lasern bei vergleichsweise geringer Leistung durchgeführt wurde [8]. Bei 650 nm und 1,1 W ist ein zuverlässiger Betrieb über 20.000 h erzielt worden [9]. Die für die Applikationen erforderlichen Leistungen kamen sowohl durch eine Leistungssteigerung bei den einzelnen Emittern als auch durch den monolithischen Aufbau von Laserbarren à 200 W und mehr zustande, die aus typischerweise 19, mitunter bis zu 60 Einzelemitern bestehen. Die höheren Leistungsklassen im Kilowattbereich werden durch das Zusammenfassen von Barren zu Diodenstacks erreicht. Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind hingegen Einzelemitter.

Ein limitierender Faktor im Einsatz von Diodenlasern ist derzeit noch ihre gegenüber Gas- und Festkörperlasern schlechtere Strahlgüte; diese beschreibt die Ausbreitungscharakteristik des Laserlichts im Raum und bestimmt z. B. die Fokussierbarkeit der Lichtleistung auf einem möglichst kleinen Volumen oder Flächenelement. Aus dem Grund stellt die Strahlgüte einen wichtigen Punkt in der weiteren Entwicklung von Halbleiterlasern dar. Hier kommt einem speziellen Typ von Diodenlasern, den Trapezlasern, eine besondere Bedeutung zu, da sie das bislang am erfolgreichsten realisierte Konzept zur Strahlgüteverbesserung von Hochleistungs-Laserdioden darstellen. Das Konzept kombiniert Elemente bewährter Hochleistungs-Laserdioden (Breitstreifenlasern) mit Halbleiterlasern hoher Strahlgüte (Rippenwellenleiterlasern), um eine hohe Strahlgüte bei hoher Leistung zu erzielen. Letzteres wird durch die Definition der Brillanz quantifiziert. Diese liegt beim Trapezlaser typischerweise um eine Größenordnung höher als bei konventionellen Halbleiterlasern und eröffnet gegenüber diesen neue, bedeutende Marktpotenziale in den o. g. Anwendungsfeldern. Auch bei der in zahlreichen Anwendungen bedeutsamen Frequenzkonversion (z. B. in der Display-Technologie) kommen angesichts der geforderten Strahlgüte bei hoher Ausgangsleistung derzeit nur Trapezlaser zum Einsatz [10]. Die für verschiedene Applikationen geforderte hohe Brillanz von Trapezlasern stellt auch den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar.

Auch wenn die Realisierung und Anwendung von Halbleiterlasern insbesondere im kürzerwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums fortschreitet, liegt der Schwerpunkt der kommerziell eingesetzten Wellenlängen derzeit aber noch im nahen Infrarotbereich (NIR) zwischen ca. 800 und 1600 nm. Die Emission bei 808 nm ist insbesondere für das Pumpen von Festkörperlaseren und die direkte Materialbearbeitung sowie die Medizintechnik relevant. Daher ist die Strahlgüte bzw. Brillanz von Trapezlasern bei 808 nm Hauptgegenstand dieser Arbeit. Sie beinhaltet systematische Untersuchungen zu den wichtigsten Parametern der Trapezlaser und deren Auswirkung auf die Strahlcharakteristik. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Messungen. Zielstellung war, die Strahlgüte bei gleichzeitig hoher Ausgangsleistung zu optimieren bzw. die Brillanz  $B$  bzw.  $B'$  gegenüber dem Status Quo zu verbessern. Im Zentrum der Parametervariationen standen die Charakteristika des instabilen Trapezlaserresonators, ihr jeweiliger Einfluss auf die Brillanz und die diesen Wechselwirkungen zugrunde liegenden Effekte. Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Laserparametern und der Strahlgüte wurden Simulationsrechnungen parallel zu den Experimenten durchgeführt. Auf dieser Basis konnten in der vorliegenden Arbeit einige experimentelle Befunde theoretisch bestätigt und interpretiert werden. Im Ergebnis der systematischen Korrelation von Laserparametern und Strahlgüte wurden – über die bisherigen, punktuellen und prinzipiellen Aussagen hinaus – konkrete Optimierungsaussagen speziell zur Geometrie der Trapezlaser bei 808 nm getroffen. Diese resultierten in neuen Bestwerten für die Brillanz, bei zum Teil verbesserter Abstrahlcharakteristik aufgrund eines reduzierten Fernfeldwinkels.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: Am Beginn stehen in Kapitel 2 eine kurze Übersicht über wichtige Hochleistungs-Diodenlasertypen sowie den Trapezlaser hinsichtlich seines Konzepts, gefolgt von einem Überblick zum „state-of-the-art“. Details des Trapezlaseraufbaus, dessen Realisierung und die Einführung in das untersuchte Parameterfeld folgen in Kapitel 3. In Kapitel 4 wird neben einigen Definitionen der Strahlgüte vor allem die Messtechnik zur Strahlgütecharakterisierung beschrieben, die im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen an die Messobjekte und die relevanten Strahlgütekriterien angepasst wurde. Kapitel 5 bildet den Kern der Arbeit mit der systematischen Analyse der Korrelation zwischen den Laserparametern und der Strahlgüte; diese mündet in Optimierungsaussagen für das Trapezlaser-Design und der signifikanten Brillanzsteigerung der Bauelemente. Die für die praktische Anwendung der Laser ebenfalls essenziellen Resultate der Zuverlässigkeitsuntersuchungen sind Gegenstand von Kapitel 6. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird in Kapitel 7 gegeben. Der Anhang enthält Informationen zum Simulationsprogramm, mithilfe dessen die experimentellen Befunde qualitativ oder in Teilen auch quantitativ bestätigt und erklärt werden konnten.



## Kapitel 2

# Hochleistungs-Diodenlaser mit hoher Strahlgüte

### 2.1 Laserdiodentypen

Die für Hochleistungs-Diodenlaser sehr typische Bauform ist der Breitstreifenlaser („broad area“, BA) [11] aus der Gruppe der Kantenemitter („edge-emitting laser“, EEL), wie in Abbildung 2.1 als Einzelemitter gezeigt. Typische Werte der Abmessungen zum Erzielen hoher Leistungen liegen bei  $W = 50 \dots 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 1 \dots 4 \text{ mm}$ ,  $H = 120 \mu\text{m}$ .

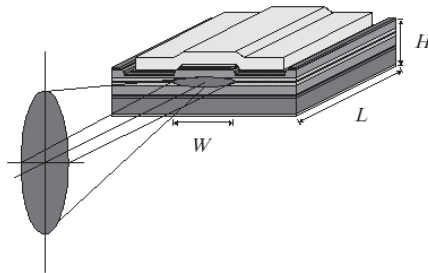


Abb. 2.1) Prinzipdarstellung eines Breitstreifenlasers (BA) und seiner Abstrahlcharakteristik.

Die Wellenführung in vertikaler Richtung erfolgt mittels des Wellenleiters innerhalb der ihn umgebenden Mantelschichten, die Strahlungsverstärkung in der aktiven Zone (dem sog. Quantenfilm oder, englisch, quantum well, QW) zwischen der p- und der n-Schicht des Wellenleiters. Dieser Grundaufbau trifft auch auf alle anderen, im Folgenden beschriebenen Halbleiterlaser zu. In der lateralen Dimension, also längs der Austrittsapertur, wird die Breite des Strahlungsfelds in einem BA-Laser durch den elektrisch gepumpten Bereich mit der Verstärkung bestimmt; dieses wird als Gewinnführung bezeichnet. In Längsrichtung ist der Laserresonator durch die Front- und Rückfacette definiert; die Facettenreflektivitäten nach der Beschichtung betragen 0.1% ... 10% an der Austrittsseite und über 90% an der Rückseite. Mit einem einzelnen, derartigen Breitstreifenlaser wurde beispielsweise im Langzeit-CW-Betrieb bei 980 nm eine optische Leistung von 20 W erzielt [12]. Die Zuverlässigkeit von BA-Lasern über mehr als 10.000 h Betriebsdauer wurde schon mehrfach demonstriert. Aufgrund ihres vergleichsweise einfachen Aufbaus in Kombination mit hoher Nutzleistung und einer Effizienz bis zu 75% bei Zimmertemperatur [13, 14] stellen Breitstreifenlaser für Hochleistungsanwendungen die größte Gruppe der Halbleiterlaser. Für die meisten Anwen-

dungen werden zur Leistungssteigerung mehrere der skizzierten Einzelemittler nebeneinander, optisch und elektrisch isoliert, auf einem Halbleiterkristall zu sog. Laserbarren prozessiert; die Nutzleistung solcher Barren liegt dann im Bereich von 100 ... 200 W, Spitzenwerte darüber.

In erster Näherung sind für Hochleistungs-Halbleiterlaser zwei Parameter entscheidend, welche bei gegebenem Halbleiter-Materialsystem und Schichtaufbau die maximale Leistung limitieren: die Breite der Austrittsapertur  $W$  und die Laserfläche. Die Apertur bestimmt vor allem die optische Leistungsdichte in lateraler Richtung; diese ist begrenzt, da die an der Facette auftretende Restabsorption Facettenschäden begünstigt. Bei einem typischen BA-Laser trägt die optische Leistungsdichte an der Austrittsfacette unter Berücksichtigung der vertikalen Emissionsbreite ca.  $5 \text{ MW/cm}^2$  und liegt damit beispielsweise drei Größenordnungen über der auf der Sonnenoberfläche. Infolgedessen ist die Facettentechnologie bei Hochleistungs-Diodenlasern entscheidend für eine hohe Ausgangsleistung und eine ebensolche Diodenlebensdauer. Im Zuge dessen ist vor allem die Generierung von Absorptionszentren für optische Strahlung auf den Facetten zu unterbinden, die als Ausgangspunkte thermischer Zerstörung der Facetten (COMD, „catastrophical optical mirror damage“) wirken [11]. Bezüglich der Laserfläche spielt v. a. der maximal mögliche Fluss von thermischer Verlustleistung in die Wärmesenke eine Rolle. In einem BA-Laser entsteht bei 10 W Ausgangsleistung, einer Geometrie von  $100 \times 2000 \mu\text{m}$  und einer angenommenen Effizienz von 60% eine Verlustleistungsdichte von typischerweise  $2 \text{ kW/cm}^2$ , die sich zudem in der Vertikalen auf die wenige Nanometer dicke aktive Zone konzentriert. Für die limitierenden Faktoren der Facettenbelastung und der Verlustleistungsdichte existieren jedoch Kompensationsstrategien. Im Bereich der Facetten sind hier z. B. die Facettenpassivierung, das Unterdrücken lokaler Emissionsmaxima sowie ein entsprechend optimiertes Design der Halbleiterschichtstruktur zu nennen; dem Einfluss der Verlustleistung kann durch eine Wärmesenke mit minimiertem thermischen Widerstand sowie einer ebensolchen Montage der Dioden entgegen gewirkt werden.

Für die Facettenproblematik ist ein weiterer Mechanismus von Bedeutung: Aufgrund des Fehlens einer lateralen Modenführung im breiten Resonator bilden sich mit zunehmender Leistung lokale Maxima der Strahlungsverteilung im Laser und an der Facette aus („filamentartige Strukturen“ oder „Multimoden“), welche die Wahrscheinlichkeit von Facettenschäden insbesondere im Langzeitbetrieb stark erhöhen. Ursache sind die stark nichtlinearen, gekoppelten Prozesse im Lasermedium und -resonator, insbesondere jene durch lokale Verstärkungssättigung und der Abhängigkeit des Brechungsindex von der Ladungsträgerdichte bzw. Verstärkung [15]. In vielen numerischen Modellen zur Beschreibung der Strukturen wird dieser Zusammenhang auf den sog. Henry-Faktor bzw. „linewidth enhancement factor“

$$\alpha_H = - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\delta n_N}{\delta g_N} \quad (2.1)$$

als Schlüsselparameter konzentriert, der in erster Näherung für einen typischen Betriebsparameterbereich als konstant angesetzt wird [16]. Die Intensitätsmaxima bzw. „Filamente“ können in der Modellvorstellung als Orte verstärkter Selbstfokussierung interpretiert werden. Neben der Facettenproblematik wirken sich die filamentartigen Strukturen auch negativ auf die Strahlqualität aus, insbesondere dann, wenn Inhomogenitäten in der emittierten Phasenfront damit einhergehen.

Generell ist die Strahlgüte von Breitstreifenlasern in lateraler Richtung nicht optimal bzw. in keiner Weise beugungsbegrenzt; dieses folgt vor allem aus der vergleichsweise breiten Austrittsapertur bei gegebenem Divergenzwinkel der Emission. BA-Laser mit einem ähnlichen Schichtaufbau wie die in dieser Arbeit untersuchten Trapezlaser wiesen in Messungen eine Strahlgüte auf, die um mehr als den Faktor 10 schlechter war als das beugungsbegrenzte Optimum des Gaußschen Strahls [17].