

1. Einleitung, Motivation und Vorgehensweise

Diodenlaser zeichnen sich durch ihre sehr kompakte Bauform, die hohe elektro-optische Effizienz, hohe Zuverlässigkeit und niedrige Kosten pro Watt Ausgangsleistung aus. Sie sind daher gängige Strahlquellen für Industriedirektanwendungen mit hoher Leistungsanforderung wie bspw. das Löten von Karosserieteilen in der Serienproduktion, das Schweißen dünner Bleche, das Härten sowie Anwendungen in der Medizintechnik [1].

Die geringe spektrale Brillanz von kommerziell verfügbaren Laserdioden im nahen infraroten Emissionsbereich limitiert allerdings die effiziente Leistungsskalierung mittels spektralen Stapelns und daher ihren Einsatz bei Anwendungen, die eine große Leistung bei gleichzeitig geringer spektraler Emissionsbreite erfordern wie u.a. das Laserpumpen von Festkörperlasern [2]. Ein gängiger Ansatz zur Erhöhung der Brillanz durch Reduzierung der spektralen Emissionsbreite ist die sogenannte Frequenzstabilisierung. Mittels eines zusätzlich im Strahlengang platzierten, optischen Elements erfolgt eine spektral schmalbandige Rückkopplung in den Laserdiodenresonator, wodurch die spektrale Emissionsbandbreite um bis zu eine Größenordnung reduziert wird. Typischerweise werden hierzu diffraktive, optische Elemente wie Volumen-Bragg-Gitter (VBG) oder schmalbandig reflektierende Filter genutzt. Die Frequenzstabilisierung ermöglicht somit die effiziente, spektrale Stapelung mehrerer Laserdioden zur Leistungsskalierung.

Faserlaser sind ebenfalls gängige Strahlquellen für viele industrielle Hochleistungsanwendungen. Eingesetzt werden Faserlaser in einem breiten Spektrum an Anwendungen wie bspw. Kommunikation, Lithographie, Mikro- und Makromaterialbearbeitung, Medizintechnik und der additiven Fertigung. Faserlaser zeichnen sich neben einer großen mittleren Ausgangsleistung durch eine große Strahlqualität und einen großen elektro-optischen Wirkungsgrad aus. Weiterhin ist durch das große Oberflächen-Volumen-Verhältnis der Faser eine gute Wärmeableitung gegeben, wodurch der sonst bei Festkörperlasern oft auftretende Effekt der thermischen Linse bei Faserlasern nicht vorkommt [3].

Faser-Bragg-Gitter (FBG) bestehen aus der periodischen Brechungsindexmodulation eines Faserkerns entlang der Propagationsachse der im Kern geführten Strahlung, welche bei Erfüllung der Bragg-Bedingung am Gitter gebeugt wird. Somit fungieren FBG als faserintegrierte, wellenlängenselektive Spiegel. Im Bereich der monomodigen und Wenig-Moden-Fasern werden sie u.a. als optische Sensoren für Temperatur und Dehnung [4], [5] sowie als faserintegrierte Resonatorspiegel zur Frequenzstabilisierung eingesetzt [6]–[8]. Schreibverfahren für FBG, ihre Charakterisierung und theoretische Beschreibung werden seit vielen Jahren erforscht, und der Einsatz von FBG in monomodigen Fasern entspricht dem Stand der Technik [9]–[16].

Mit hochmodigen Faserlasern besteht die Möglichkeit, mit einem einzigen Resona-

tor sehr hohe mittlere Ausgangsleistungen im Multi-Kilowattbereich zu erzielen [17], [18]. Im Vergleich zum klassischen Faserlaserresonatoraufbau mit externen, dichroitischen Spiegeln vereinfacht die Verwendung eines FBG als faserintegrierter Spiegel das Lasersystem und erhöht somit die mechanische Robustheit und Zuverlässigkeit. Für hochmodige Fasern sind FBG allerdings kommerziell nicht verfügbar und Gegenstand der aktuellen Forschung.

Das Gehäuse kommerzieller Laserdiodenmodule für industrielle Anwendungen umfasst typischerweise eine Faserkopplung für die hochmodige Transportfaser der Laserstrahlung zum Werkstück. Durch die bereits vorgesehene, hochmodige Transportfaser am Modulgehäuse können FBG als Frequenzstabilisierungselement eingesetzt werden. Ebenfalls sind solche FBG prinzipiell geeignet, als Resonatorspiegel bei Faserlasern zu fungieren. Die Herausforderung der Erforschung von FBG in hochmodigen Fasern besteht darin, dass der Kerndurchmesser bei hochmodigen Fasern um den Faktor zehn bis zwanzig größer ist als bei monomodigen Fasern und daher ein geeignetes Schreibverfahren entwickelt werden muss, damit das geschriebene FBG den Kern vollständig transversal überdeckt. Ferner sind der Vielzahl der in großen Fasern propagierenden Moden jeweils eigene Propagationskonstanten zugeordnet, was dazu führt, dass diese jeweils unterschiedlich stark am Fasergitter reflektiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist, Faser-Bragg-Gitter für multimodige Fasern sowohl für die Frequenzstabilisierung von Hochleistungslaserdioden als auch für die Anwendung als gering-reflektierende, faserintegrierte Auskoppelspiegel von Hochleistungsfaserlasern zu entwickeln und so die Defizite im Stand der Technik zu beheben. Die Struktur der Arbeit ist in Abb. 1.1 dargestellt.

Zunächst werden die physikalischen Grundlagen der Funktionsweise und die Erzeugung von FBG in Kap. 3 erarbeitet. Das Grundlagenkapitel ist in drei Teile gegliedert: Zu Beginn werden die theoretischen Grundlagen (Kap. 3.1) zur Berechnung der Rückkoppelwellenlänge, der sog. Bragg-Wellenlänge, und des Reflexionsgrades von Fasergittern hergeleitet. Diese sind relevant im Hinblick auf die Selektion der Wellenlänge der Frequenzstabilisierung von Hochleistungslaserdioden sowie für die Einstellung des Auskoppelgrades bei FBG als Auskoppelspiegel für Hochleistungsfaserlaser. Im zweiten Teil wird die Erzeugung und Klassifizierung von Brechungsindexmodifikationen mittels ultra-kurz gepulster (UKP) Laserstrahlung im Infraroten erarbeitet (Kap. 3.2). Im letzten Teil der physikalischen Grundlagen wird auf Basis einer Gegenüberstellung verschiedener Herstellungsmethoden von FBG das in dieser Arbeit verwendete Verfahren ausgewählt (Kap. 3.3).

Im nächsten Kapitel werden die vorgestellten Grundlagen der FBG, die Erzeugung von Brechungsindexmodifikationen und die bestehenden Herstellungsmethoden von monomodigen FBG zusammengeführt und zur Herstellung von multimodigen Fasergittern erweitert (Kap. 4). Der wesentliche Unterschied zum Stand der Technik besteht darin, dass die dort beschriebenen Herstellungsverfahren auf monomodige Fasern mit Kerndurchmesser $< 10 \mu\text{m}$ beschränkt sind und in dieser Forschungsarbeit hochmodige Fasern mit Kerndurchmesser zwischen $65 \mu\text{m}$ bis $105 \mu\text{m}$ adressiert werden.

In Kapitel 5 werden die Anwendungen der mittels UKP-Laserstrahlung geschriebenen FBG in hochmodigen Fasern erarbeitet. Entsprechend den beiden Einsatzgebieten Frequenzstabilisierung und Resonatorauskoppelspiegel ist das Kapitel in zwei

Teile gegliedert. Kap. 5.1 umfasst die Frequenzstabilisierung von Hochleistungslaserdioden mittels hochmodiger FBG (auch MM-FBG), demonstriert an einem Einzelemittermodul. Darüber hinaus werden die Auswirkungen untersucht, die die spektral schmalbandige Rückkopplung des FBG auf die optische Ausgangsleistung, spektrale Emissionscharakteristik und Polarisation der Laserdiode haben. Im Kontext einer möglichen industriellen Verwendung der Fasergitter für Hochleistungslaserdiodenmodule wird untersucht, welcher Reflexionsgrad eine zuverlässige Frequenzstabilisierung bei möglichst hoher Transmission und gleichzeitig kurzer Herstellungsdauer erzeugt. Für die Leistungsskalierung des Konzepts wird gezeigt, dass ein einzelnes FBG auch die Frequenzstabilisierung eines fasergekoppelten Multi-Emittermoduls ermöglicht. Im zweiten Teil (Kap. 5.2) wird gezeigt, dass ein FBG im aktiven Faserkern eines Faserlaserresonators als gering-reflektierender Auskoppelspiegel eingesetzt werden kann. Auch hier wird untersucht, welchen Einfluss die spektral schmalbandige Rückkopplung des Fasergitters auf die spektrale Emissionscharakteristik, optische Ausgangsleistung und Strahlqualität des Faserlasers hat. Der Abschluss des Anwendungskapitels besteht in der Demonstration der Funktionsfähigkeit von FBG als gering-reflektierende Auskoppelspiegel eines Multi-Kilowatt-Faserlasers, der im Hinblick auf Ausgangsleistung und Zuverlässigkeit für den Einsatz in der Industrie geeignet ist. In diesem Kapitel wird ein Prototyp eines monolithisch aufgebauten Faserlaserresonators vorgestellt, bei dem sowohl der gering-reflektierende Auskoppelspiegel als auch der hoch-reflektierende Resonatorendspiegel mittels FBG realisiert sind (Kap. 5.2.4).

Insgesamt werden in dieser Arbeit die folgenden drei Forschungsschwerpunkte behandelt:

- Entwicklung eines Herstellungsverfahrens von Fasergittern in passiven und aktiven, hochmodigen Faserkernen (Kerndurchmesser 65 μm bis 105 μm)
- Herstellung von Fasergittern in hochmodigen, passiven Fasern zur Frequenzstabilisierung und Verbesserung der spektralen Brillanz von hochmodigen Laserdioden
- Herstellung von Fasergittern in hochmodigen, aktiven Fasern zum Einsatz als Resonatorauskoppelspiegel von Faserlasern im industriellen Einsatz und zur Verbesserung der spektralen Brillanz, sowie Untersuchung der Auswirkung der FBG auf die optische Ausgangsleistung

Stand der Technik in Forschung und Industrie		Kap. 2
Physikalische Grundlagen der Erzeugung von Brechungsindexmodifikation mittels UKP-Laserbearbeitung		Kap. 3
Herstellung von FBG in hochmodigen Fasern (MM-FBG): Phasenmasken-Schreibverfahren, Scan-Strategie, Laserprozessparameter		Kap. 4
<u>Hochleistungsdiodenlaser:</u> MM-FBG als externer Resonatorspiegel zur Frequenzstabilisierung		Kap. 5.1
Konzeptvalidierung: MM-FBG zur Frequenzstabilisierung		Kap. 5.1.1
Untersuchung der FBG-Auswirkungen: Spektrum, optische Ausgangsleitung und Polarisation der Laserdioden Analyse des Nahfelds des FBG-Reflex, Demonstration der Leistungsskalierung anhand eines Multi-Emittermoduls		Kap. 5.1.2
<u>Hochleistungsfaserlaser:</u> MM-FBG als faserintegrierter Auskoppelspiegel		Kap. 5.2
Konzeptvalidierung: MM-FBG in passiver Faser		Kap. 5.2.1
Laboraufbau: MM-FBG in aktiver Faser		Kap. 5.2.2
Demonstration der Industrietauglichkeit von MM-FBG als Auskoppelspiegel		Kap. 5.2.3
Prototyp eines monolithisch aufgebauten Faserlasers mit LR- und HR-FBG		Kap. 5.2.4

Abbildung 1.1.: Struktur dieser Forschungsarbeit.