

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen

von Dr.-Ing. Thomas Rataj
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Alois Herkommmer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2018

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2018

ISBN 978-3-8316-4733-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Liste der verwendeten Symbole	9
Kurzfassung	13
Extended Abstract	17
1 Einleitung	21
1.1 Zielsetzung der Arbeit	21
1.2 Aufbau der Arbeit	23
2 Stand der Technik	24
2.1 Freistrahlbasierte Strahlweichen	24
2.2 Faserbasierte Strahlweichen	29
2.3 Zusammenfassung und Motivation	33
3 Dielektrische Wellenleiter	35
3.1 Grundlagen der Optik	35
3.2 Strahlenoptisches Modell	37
3.3 Wellenoptisches Modell	38
3.4 Strahlausbreitung in SI- und GRIN-Fasern	41
3.5 Grundlegende Effekte in Wellenleiter	44
3.6 Zusammenfassung	47
4 GRIN-Linsen für optische Strahlweichen	48
4.1 Unterschiedlich hergestellte GRIN-Linsen	48
4.2 Optische Charakterisierung von GRIN-Linsen	53
4.2.1 Charakteristik nach Kollimation	53
4.2.2 Messung der Wellenfrontdeformationen	54
4.2.3 Messung der Abbildungseigenschaften	56
4.2.4 Hochleistungstauglichkeit der Na ⁺ /Li ⁺ GRIN-Linsen	57
4.3 Zusammenfassung	60

5	Monolithische Strahlweiche auf Basis von drei GRIN-Linsen	62
5.1	Optische Eigenschaften	63
5.2	Mechanische Eigenschaften	68
5.2.1	Beanspruchungsgrenzen von Fasern	68
5.2.2	Beanspruchung eines konischen SPE	69
5.3	Zusammenfassung	72
6	Monolithische Strahlweiche auf Basis von zwei GRIN-Linsen.....	73
6.1	Optische Eigenschaften	73
6.1.1	Beanspruchung des faserbasierten SPE	75
6.2	Mechanische Eigenschaften	76
6.2.1	Experimentelle Biegeuntersuchung an faserbasierten SPE	77
6.2.2	Reduktion der Beanspruchung	79
6.3	Experimentelle Umsetzung.....	80
6.3.1	Optische Charakterisierung	81
6.4	Zusammenfassung	85
7	Monolithische Strahlweiche auf Basis von einer GRIN-Linse	87
7.1	Optische Eigenschaften	87
7.2	Mechanische Eigenschaften	91
7.2.1	Einflüsse der Biegemethoden.....	92
7.2.2	Gestaltungsmöglichkeiten	95
7.3	Experimentelle Untersuchungen.....	97
7.3.1	Monolithische Faser-Faser-Kopplung.....	97
7.3.2	Biegeinduzierter Fokusversatz	99
7.4	Zusammenfassung	102
8	Ausblick.....	104
Anhang.....		106
A.1.	Abscheidungsverfahren und der Ziehprozess	106
A.2.	Der Strahlanalyse Aufbau	109
A.3.	Statische Beanspruchung des SPE.....	111
	Ablauf der statischen Versuchsdurchführung und Auswertung	113
A.4.	Dynamische Beanspruchung des SPE	116
	Ablauf der dynamischen Versuchsdurchführung und Auswertung	117

A.5. Fügeverfahren für die monolithische Strahlweiche	119
Das Spleißen der Na ⁺ /Li ⁺ -basierten GRIN-Linsen.....	119
Kleben der Na ⁺ /Li ⁺ -basierten GRIN-Linsen.....	121
Literaturverzeichnis.....	124
Danksagung	132

Kurzfassung

Hochleistungslaser finden heutzutage immer häufiger immer vielseitigere Anwendungen in der industriellen Fertigungstechnik. Ein wesentlicher Grund für diese Entwicklung ist die Senkung der Produktionskosten durch gesteigerte Prozessgeschwindigkeit und zugleich höhere Qualität bei der Teilefertigung. Eine Steigerung der Auslastung von Laserstrahlquellen in modernen Fertigungslinien kann mithilfe der Lasernetzwerktechnologie [1] erreicht werden. Durch ein Lasernetzwerk wird die Anlassverfügbarkeit der Laserstrahlquellen in Bearbeitungsstationen erhöht. Zudem kann durch Änderung der Strahlparameter eine Erweiterung möglicher Bearbeitungsprozesse von Bearbeitungsstationen erreicht werden, so dass ihre Produktivität maßgeblich gesteigert wird.

Der Schlüssel dazu ist die aus dem Telekombereich stammende Fasertechnologie, die zunehmend auf den Bereich der Hochleistungslaser übergeht. Als wichtigste Komponenten eines optischen Netzwerks sind Faserkoppler und Strahlweichen zu nennen [2]. Im Grunde handelt sich dabei um faserbasierte Bausteine mit UND- bzw. ODER-Funktionalitäten, die in analoger Weise auch auf den Bereich der Hochleistungslaser (mit Leistungen > 1 kW) übertragen werden können.

Während Faserkoppler, als Komponenten, welche die Strahlung aus mehreren Eingangsfasern in eine Ausgangsfaser leiten, erfolgreich in Faserlasern eingesetzt werden [3], ist eine faserbasierte Strahlweiche für den Bereich der Hochleistungslaser bislang nicht bekannt. Stattdessen wird die optische Schaltung heutzutage anhand einer variablen Kopplung vom Freistrahl realisiert [1] [4]. Diese Lösungen sind in der Regel mit hohen Herstellungskosten und mit grundlegenden optischen Limitierungen [5] verbunden, die eine deutliche Verschlechterung der Strahlqualität sowie deutliche Leistungsgrenze aufzeigen.

Durch einen monolithischen Ansatz, bei dem die Strahlführung mithilfe von faserbasierten Elementen durchgehend im Glasmaterial stattfindet, können die heutigen Grenzen in der Leistungsskalierung sowie auch der Strahlqualitätserhaltung potenziell verschoben werden. Aus dieser Überlegung heraus werden in dieser Arbeit verschiedene Ausführungsformen von monolithischen Strahlweichen auf Basis von Gradienten-Index-Linsen (GRIN-Linsen) erarbeitet. Mit geeigneten Simulationsprogrammen

wurden dazu sowohl optische als auch mechanische Eigenschaften berechnet und das Potenzial jener Strahlweichen bewertet. Eigenschaften wie Hochleistungstauglichkeit, Erhaltung der Strahlqualität sowie Stabilität für ca. 1 Mio. Schaltvorgänge werden für ihre Funktionalität vorausgesetzt.

Die Abbildungseigenschaften der verfügbaren Komponenten für eine monolithische Strahlweiche stehen im Vordergrund der vorliegenden Arbeit. Insbesondere werden unterschiedliche Fertigungsverfahren von GRIN-Linsen bzw. GRIN-Fasern herangezogen. GRIN-Vorformen, die mit gängigen Abscheidungsverfahren (MCVD, PCVD und VAD) hergestellt wurden, zeigten eine relativ starke Abweichungen sowie charakteristische Schwankungen ihrer Brechungsindexprofile. Lediglich kommerziell erhältliche GRIN-Linsen aus dem Ionenaustausch-Verfahren (mit Na^+/Li^+ -Ionen), zeigten ein glattes, parabolisches Brechungsindexprofil. Messungen von Phasenfronten mithilfe eines angepassten Interferometers belegten lediglich für die Na^+/Li^+ -basierten GRIN-Linse eine beugungsbegrenzte Abbildungsqualität. Auch im Hochleistungstest bei 1 kW bewirkte eine gekühlte Na^+/Li^+ -basierte GRIN-Linse eine geringe Fokuslagen-Verschiebung von nur 9 %.

Eine untersuchte monolithische Strahlweiche basiert auf zwei GRIN-Linsen und ein dazwischen angefügtes, kernloses Faserelement aus reinem Quarzglas. Mit einen Durchmesser von 1 mm und der Gesamtlänge von < 25 mm weist die monolithische Strahlweiche deutlich kleinere Abmessungen als eine kommerzielle, freistrahlbasierte Strahlweiche auf [4]. Die Schaltung zwischen zwei dicht aneinander angefügten Ausgangfasern wurde durch eine Drehung der ausgangsseitigen GRIN-Linse um ± 1 Grad erreicht. Aus entsprechenden Simulationen ließen sich sowohl unterkritische Materialspannungen, als auch eine Verschlechterung der Strahlqualität von < 20 % ableiten. Auf Basis von experimentellen Biegeuntersuchungen jener kernlosen Faserelemente wurde ihre maximale Beanspruchung statistisch bestimmt und mit der Griffithschen Sprödbruchtheorie in Übereinstimmung gebracht. Mit dieser Ausführungsform wurde schließlich erstes Funktionsmuster experimentell umgesetzt sowie bei niedrigen Leistungen charakterisiert. Neben dem experimentell nachgewiesenen Schaltvorgang zwischen zwei Ausgangfasern wurden optische Einbußen in jener Ausführungsform deutlich, die vorwiegend auf Abweichungen von engen Toleranzen beim Fügen ihrer Komponenten zurückgeführt wurden.

Als Alternative wurde eine Ausführungsform erarbeitet, die den Schaltvorgang auf Basis einer einzelnen gebogenen GRIN-Linse ausführt. Im Gegensatz zu der freien Propagation im kernlosen Faserelement wird die Strahlung nun durchgehend durch das parabolische Brechungsindexprofil geführt. Zugleich wird die Anzahl der Komponenten

auf ein Minimum reduziert, so dass Abweichungen von Toleranzen geringeren Einfluss auf optische Effizienz haben. Diese Ausführungsform erlaubt sowohl eine vollständige Erhaltung der Strahlqualität, so wie auch weit freiere Dimensionierbarkeit. Theoretische Betrachtungen belegen unter anderem, dass eine Schaltung zwischen zwei dicht aneinander gefügten Ausgangfasern mit Durchmessern von 125 µm bereits mit einer 250 µm dünnen GRIN-Linse bei Biegeradien von ± 3 cm möglich ist. Für eine reine Biegung (d.h. Biegemoment und Biegeradius sind konstant) ergeben sich dabei unkritische maximale Spannungen von < 300 MPa. Im Idealfall wird diese monolithische Strahlweiche durchgehend beschichtet, so dass Luft-Korrosion [6] vermieden und ihre mechanische Stabilität dauerhaft erhalten bleibt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Ausführungsform auf Basis einer gebogenen GRIN-Linse ebenfalls experimentell untersucht. Sowohl die Erhaltung der Strahlqualität als auch laterale Fokusversätze konnten nachgewiesen und mit der Theorie in Übereinstimmung gebracht werden. Insbesondere diese Lösung wurde schließlich für den Einsatz im Bereich der Hochleistungslaser favorisiert. Offengebliebene Anforderungen an benötigte GRIN-Linsen werden letztlich im Ausblick diskutiert.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Märangoni-effekt beim Laserstrahlieforschweißen von Stahl
2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign
2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung
2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik
2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen
2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen
2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit
2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung
2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen
2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung
2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze
2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahtei-genschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen
2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser
2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen
2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente
2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers
2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen
2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung
2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breitling

Gaspaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung
2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung
2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weerpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen
2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyert

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse
2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Sven-Simon Beyert

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

Stefan Piehler

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

Felix Abt

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

Volker Rominger

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brilanz
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

Thomas Rataj

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0