1 Einleitung

Seit dem Altertum werden optische Signale in Form von Rauch und Feuer als Kommunikationsmittel über große Distanzen verwendet. Bereits im 5. Jh.v. Chr. wurde beispielsweise die Nachricht vom Fall Trojas von Kleinasien bis nach Argos in Griechenland durch Feuersignale über acht Relaisstationen derart übermittelt, dass man heute von der vermutlich ersten digitalen optischen Übertragungsstrecke sprechen kann. Auch im Europa des 19. Jahrhunderts wurden Nachrichten noch auf optischem Weg übertragen. So war zum Beispiel zwischen Berlin und Koblenz eine aus 61 Signalmasten bestehende Übertragungsstrecke aufgebaut, bei der jeder Signalmast über sechs „Arme“ verfügte. Jeder Arm wiederum konnte vier verschiedene Stellungen einnehmen, so dass insgesamt $4^6 = 4096$ Zeichen in Form von Winksignalen übermittelt werden konnten. Schnell erkannte man jedoch, dass Luft als Übertragungsmedium für optische Signale denkbar ungeeignet war. Starkes Schneetreiben oder dichter Nebel beeinträchtigte die Sicht von Mast zu Mast derart, dass keine fehlerfreie Übertragung der Information mehr möglich war. Folgerichtig verdrängte die aufkommende elektrische Telegraphie in der Mitte des 19. Jahr-hunderts die optische Kommunikation zunächst von ihrem historisch angestammten Platz.

Doch die Idee, Informationen auf optischem Wege und nahezu unabhängig von den äußeren Umgebungsbedingungen zu übertragen, wurde im Jahre 1966 von Charles K. Kao [1] wieder aufgegriffen. In seiner Theorie über die monomodige Ausbreitung optischer Wellen in Glasfasern erwähnte Kao die Möglichkeit, derartige Lichtwellenleiter als Übertragungsmedium für optische Signale einzusetzen. Bedingt durch die hohe Dämpfung der zur damaligen Zeit verfügbaren Glasfasern von über 1000 dB/km war diese Informationsübertragung zunächst jedoch nicht praktikabel. Als dann aber Mitte der 70er Jahre dem amerikanischen Unternehmen „Corning Glass Works“ die Herstellung optischer Fasern mit einer Dämpfung von nur noch 2 dB/km [2] gelang und etwa zeitgleich der erste Halbleiterlaser mit der Möglichkeit zum Dauerbetrieb bei Raumtemperatur [3] verfügbar wurde, war der Grundstein für die moderne optische Datenübertragung gelegt.

Japanischen Ingenieuren gelang es 1979 schließlich, die Dämpfung ihrer Glasfasern mit 0,2 dB/km [2] auf einen Wert zu reduzieren, der bis heute nahezu unverändert geblieben ist. Seither hat die optische Kommunikation einen enormen Aufschwung genommen. Die im Zuge dieser rasanten Entwicklung entstandenen optischen Fasern finden heute weitreichende technische Einsatzmöglichkeiten auch in anderen Branchen wie der Beleuchtungstechnik, der Nachrichtenübermittlung und der optischen Sensorik [4-7]. Die wesentlichen Vorteile der heutigen optischen Glasfasern im Bereich der Nachrichtenübermittlung sind die enorme Übertragungskapazität, die nahezu vollständige Immunität gegenüber elektromagnetischen Feldern sowie die weitestgehend wechselwirkungsfreie Lichtausbreitung. Aufgrund ihrer geringen Dispersion ermöglichen Glasfasern darüber hinaus eine extrem hochbitratige Datenübertragung.

Zeitgleich mit der Entwicklung dämpfungsarmer Glasfasern etablierte sich als Bindeglied zwischen Optik und Elektronik ein neues Forschungsgebiet, das 1969 von S. E. Miller erstmalig als integrierte Optik bezeichnet wurde [8]. Die integrierte Optik beschäftigt sich mit der monolithischen Integration von optischen und elektronischen Komponenten auf einem gemeinsamen Substrat. In Anlehnung an die integrierte Mikroelektronik werden derartige Schaltkreise als OEIC (engl. für **o**pto**e**lectronic **i**ntegrated **c**ircuit) bezeichnet. Neben der Integration verschiedener optoelektronischer Bauelemente wie beispielsweise Laserdioden, Modulatoren und Photodetektoren auf einem OEIC werden zum Aufbau optoelektronischer Systeme Schaltkreise mit unterschiedlichen Funktionen benötigt. Während die elektrische Verbindung der einzelnen Bauelemente auf dem OEIC sowie der verschiedenen Schaltkreise untereinander heutzutage Dank modernster Fertigungsmethoden vollautomatisch erfolgt, stellt die entsprechende optische Verbindungstechnik nach wie vor ein Schlüsselproblem bei der Herstellung optoelektronischer Systeme dar. Mit dem Begriff der Faser-Chip-Kopplung wird unabhängig davon, ob die optische Leistung von der Faser in das Bauelement oder aus dem Bauelement in die Faser gekoppelt werden soll das gesamte Arbeitsgebiet der optischen Verbindungstechnik bezeichnet. Kann aus dem Kontext nicht zweifelsfrei entnommen werden, welche der genannten Koppelrichtungen gemeint ist, so wird im Rahmen dieser Arbeit der allgemeine

Begriff „Faser-Chip-Kopplung“ durch den Zusatz „Einkopplung“ beziehungsweise „Auskopplung“ präzisiert.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Durchmesser und geometrischen Form des in der Glasfaser geführten Modus (etwa 10µm, zirkular) sowie des im Bauelement geführten Modus (etwa 1-3 µm, elliptisch) stellt die effiziente Verbindung der optoelektronischen Bauelemente mit dem Übertragungsmedium Glasfaser ein grundsätzliches Problem der integrierten Optik dar. Aus diesem als Modenfehlanpassung bezeichneten Verlust-Mechanismus resultieren bei einer direkten Kopplung beider Komponenten je nach Koppelrichtung optische Verluste zwischen 7 und 10 dB. Aufgrund dieser enormen optischen Verluste kann das Potenzial der hochentwickelten und bezüglich ihrer Funktion optimierten optoelektronischen Bauelemente in vielen Fällen nur durch eine kostenintensive Erhöhung der Sendeleistung in vollem Umfang genutzt werden. Die Reduzierung der Modenfehlanpassung durch eine möglichst verlustarme Transformation der Faser- und/oder der Bauelement-Moden stellt folglich die größte Herausforderung der Faser-Chip-Kopplung dar. Neben den aus der Modenfehlanpassung resultierenden optischen Verlusten ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Materialien der optischen Faser (Siliziumdioxyd) und des optoelektronischen Bauelements (z.B. Si, GaAs oder InP) Verluste aufgrund der unterschiedlichen numerischen Aperturen der Koppelpartner sowie durch Reflexionen an den jeweiligen Grenzflächen.

Während die Herstellung optoelektronischer Bauelemente Dank modernster Fertigungsmethoden mittlerweile vielfach mit Methoden der Massenfertigung möglich ist, gilt dies trotz weltweiter Anstrengungen bisher nicht für die Faser-Chip-Kopplung. Der Grund hierfür wird bei der Analyse der zur Zeit verfolgten Ansätze zur Reduzierung der Modenfehlanpassung deutlich. Diese Ansätze können letztlich alle einer der folgenden Gruppen zugeordnet werden:

Ein Ansatz ist, die Modenfehlanpassung durch Anpassung des Bauelement-Modus an den Faser-Modus mittels sogenannter integrierter Modenfeld-Transformatoren oder Wellenleiter-Taper [9-12] zu verringern. Neben der Reduzierung der optischen Verluste liegt der Vorteil dieser Komponenten in der hohen Toleranz hinsichtlich der Positionier-Genauigkeit. Ein entscheidender Nachteil re-

sultiert jedoch aus der zur Herstellung dieser Komponenten erforderlichen aufwendigen Prozess-Technologie. Aus diesem Grund ist dieser Ansatz nach heutigem Stand der Technik nicht für eine Massenfertigung geeignet.

Aufgrund der genannten Problematik hat sich ein zweites Verfahren etabliert, bei dem die Modenfeldanpassung durch Fokussierung des Faser-Modus mit Hilfe eines Linsensystems zwischen dem Bauelement und der Glasfaser erfolgt [13-16]. Vorteilhaft wirkt sich hierbei aus, dass das Bauelement weiterhin mit Methoden der Massenfertigung hergestellt werden kann. Ein entscheidender Nachteil resultiert jedoch aus der ebenfalls aufwendigen und damit kostenintensiven Ausrichtung der Linsen, so dass auch dieses Verfahren zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht für eine Massenfertigung geeignet ist. Zusätzlich ist zu bemerken, dass sich diese Technik zwar grundsätzlich für den Aufbau eines optoelektronischen Moduls eignet, aufgrund des Platzbedarfs aber nicht für die Faser-Chip-Kopplung auf einem OEIC eingesetzt werden kann.

Ein dritter Weg zur Reduzierung der Modenfehlanpassung besteht somit in der Änderung des Faser-Modenprofils durch eine entsprechende Transformation. Eine Möglichkeit hierzu stellt die sukzessive Reduzierung des Faser-Durchmessers durch Erhitzen und Ziehen der Faser sowie durch nasschemisches Ätzen dar [17-22]. Der hierbei entstehende Übergang wird auch im deutschen Sprachgebrauch als Taper (engl. für Verjüngung, Zuspitzung) bezeichnet. Als weitere Verfahren zur Transformation des Faser-Modenfeldes werden die Fokussierung des Faser-Modus durch das Anschmelzen einer Mikrolinse an die Glasfaser [23-26], die Kombination aus Faser-Taper und Mikrolinse [27-30] sowie die Verwendung spezieller Faser-Spitzen [31] angewandt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird jedoch keines der genannten Verfahren zur Realisierung einer effizienten Faser-Chip-Kopplung in großen Stückzahlen eingesetzt. Der Grund liegt darin, das keine der genannten Komponenten gleichzeitig die wichtige Voraussetzung eines sehr geringen Modenfelddurchmessers, eines geringen Transformationsverlustes sowie einer einfachen und reproduzierbaren Prozesstechnologie erfüllt. Darüber hinaus ist die anschließende Verbindung zwischen dem Bauelement und dem Taper bisher nicht zufriedenstellend gelöst worden.

Aus dem Gesagten kann somit die Forderung abgeleitet werden, dass zur Realisierung einer hinsichtlich der optischen Verluste effizienten und gleichzeitig kostengünstigen Faser-Chip-Kopplung ein Verfahren zur Reduzierung der optischen Verluste benötigt wird, dessen technologische Realisierung mittels Methoden der Massenfertigung durchführbar ist. Weiterhin muss der anschließende Aufwand, der zur Durchführung der Faser-Chip-Kopplung notwendig ist, deutlich reduziert werden, so dass die optische Verbindung weitestgehend automatisiert erfolgen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher am Beispiel eines InGaAsP/InP-Elektroabsorptions(EA)-Modulators für eine Betriebswellenlänge von 1,55 µm ein neuartiges Konzept zur Kopplung optoelektronischer Wellenleiter-Bauelemente mit optischen Einmodenfasern entwickelt werden. Im Vordergrund steht hierbei die kostengünstige Realisierbarkeit des Konzepts mit Standardverfahren der Halbleitertechnologie. Diese Forderung ist nach dem bisher Gesagten eine wichtige Voraussetzung für die spätere Umsetzung des Verfahrens mit Methoden der Massenfertigung. Weitere Zielsetzungen sind ein Einkoppelverlust von weniger als 3 dB, die Möglichkeit, das Konzept sowohl auf andere optoelektronische Wellenleiter-Bauelemente, wie zum Beispiel Photodetektoren und optische Verstärker, als auch auf andere Materialsysteme, wie etwa Si und GaAs, übertragen zu können, sowie neben der aktiven Ausrichtung der Glasfaser auch eine passive Ausrichtung zu ermöglichen. Als letzte Zielsetzung soll die Realisierung der Faser-Chip-Kopplung ohne eine Veränderung der optischen Eigenschaften des Bauelementes möglich sein. Hierdurch wird erreicht, dass das entwickelte Verfahren grundsätzlich auf andere Bauelemente übertragen werden kann. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der effizienten Kopplung optischer Leistung von der Faser in das Wellenleiter-Bauelement (Einkopplung) liegt. Für Lösungen zur Realisierung einer effizienten Auskopplung sei auf die zitierte Literatur verwiesen [32-34].

Nach dieser Einleitung werden in Kapitel 2 dieser Arbeit zunächst die zum Verständnis notwendigen Grundlagen der Wellenführung in optischen Wellenleitern sowie die bei der Faser-Chip-Kopplung auftretenden optischen Verlust-Mechanismen behandelt. Anschließend erfolgt eine theoretische Betrachtung der Mo-

denfeld-Transformation mit den in dieser Arbeit entwickelten faseroptischen Modenfeld-Transformatoren sowie mittels Faserlinsen.

In Kapitel 3 werden alle für die Faser-Chip-Kopplung entwickelten technologischen Verfahren behandelt. Hierbei wird zunächst in den ersten beiden Kapiteln die Realisierung verlustarmer faseroptischer Modenfeld-Transformatoren sowie die Herstellung von Faserlinsen behandelt. Hieran schließt sich die Vorstellung eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepts zur Positionierung und mechanischen Fixierung der faseroptischen Modenfeld-Transformatoren beziehungsweise der Faserlinsen mit den Wellenleiter-Modulatoren über InP-V-Gruben an. Anschließend wird die Herstellung koppelfähiger EA-Modulatoren von der Charakterisierung der Schichstruktur über die Zusammensetzung der benötigten Ätzlösungen bis hin zu den einzelnen technologischen Prozessschritten beschrieben. Zum Abschluß des 3. Kapitels wird ein neuartiges Verfahren zur Fixierung der faseroptischen Modenfeld-Transformatoren an den Wellenleiter-Modulator durch Dosierung geringster Klebstoff-Mengen vorgestellt.

Im Anschluß an die Darstellung der entwickelten Messanordnungen in Kapitel 4 werden im 5. Kapitel zunächst die experimentellen Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Komponenten zur verlustarmen Modenfeld-Transformation präsentiert. Hieran schließt sich die Bestimmung der optischen Verluste an, die bei der Kopplung der entwickelten Komponenten mit dem verwendeten EA-Modulator auftreten. Zum Abschluss dieses Kapitels werden neben den Ergebnissen zur Einkopplung optischer Leistung in das Bauelement, die den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet noch die Ergebnisse einer ersten Optimierung der entsprechenden Auskopplung vorgestellt.

Im 6. Kapitel werden schließlich die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.