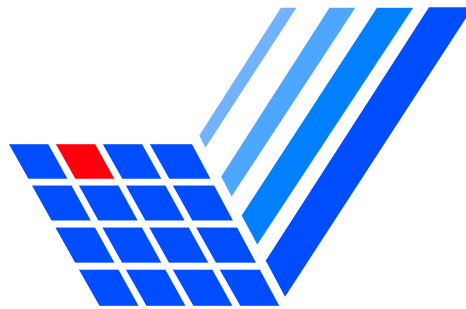


Automatisierte Präzisionsmontage faseroptischer Komponenten



Genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund

von
Dipl.-Ing. Roland B. Gentemann, MSc.

Februar 2008

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Martin Hoffmann
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Horst Fiedler
Ort und Tag der Einreichung: Dortmund, 22. Mai 2007
Tag der mündlichen Prüfung: 20. Dezember 2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Optische Aufbau- und Verbindungstechnik	4
2.1	Technologien & Koppeltechniken	5
2.1.1	Integriert optische Wellenleiter	7
2.2	Kopplungseffizienz	8
3	Aufbautechnik mit Silicium	14
3.1	Materialeigenschaften einkristallinen Siliciums	14
3.2	Strukturierung von Silicium	16
3.2.1	Lithographie	16
3.2.2	Nasschemische Strukturierung mit Kalilauge	17
3.2.3	Eckenkompensation	20
3.2.4	Deep Reactive Ion Etching (DRIE)	22
4	Silicium Führungsstrukturen	24
4.1	Passive Kopplungstechnik mit V-Gruben	25
4.1.1	Herstellung & Montage	25
4.1.2	Führungsgenauigkeit	26
4.2	Passive Kopplungstechnik mit Rautenstrukturen	29
4.2.1	Herstellung & Montage	29
4.2.2	Führungsgenauigkeit	31
4.3	Mikro-Durchgangslöcher in Silicium Wafern	31
4.3.1	Laserablation	33
4.3.2	DRIE-Ätzung	35

4.3.3	Hochspannungsdurchschläge	36
4.3.4	Thermomigration & elektrochemisches Ätzen	42
5	Verkleben von Glasfasern	45
5.1	Randbedingungen	46
5.1.1	Glasfasern in Führungsstrukturen	47
5.1.2	Glasfasern an integriert-optische Wellenleiter	47
5.2	Notwendiges Klebstoffvolumen	47
5.3	Dosierverfahren	49
5.3.1	Eintauch-Dosierverfahren	49
5.3.2	Druckluft- und Kolbendosierer	50
5.3.3	Dosieren mittels Elektrospray-Verfahren	54
6	Faser - Wellenleiter Kopplung	56
6.1	Wellenleiter-Taperstrukturen	56
6.2	Verklebemessplatz	58
6.3	Faser- Wellenleiterkopplung mit Dünnkern-Fasern	58
6.4	Messungen und Ergebnisse	61
6.5	Zusammenfassung & Auswertung	63
7	Glasfaser Greifwerkzeuge	64
7.1	Vakuumgreifer	66
7.1.1	Greiferkonzepte	68
7.1.2	Horizontaler <100>-Silicium Greifer	70
7.1.3	Vertikaler <110>-Silicium Greifer	73
7.2	Wiederholgenauigkeit	77
7.3	Vakuum-Haltekraft	78
7.4	Vergleich der Greifer	79
7.5	Kombinierter Zangen- und Vakuumgreifer	80

8	Automatisierte Glasfaser-Montage	83
8.1	Mikromechanischer Faserschalter in Silicium	85
8.1.1	Fertigungsgerechter Entwurf	87
8.2	Montageanlage	88
8.2.1	Anforderungen und Zielsetzung	88
8.2.2	Automatisierungsgrad & Flexibilität	89
8.2.3	Aufbau-Konzepte	89
8.2.4	Realisierung	92
8.3	Komponenten	95
8.3.1	Antrieb	95
8.3.2	Bildgebende Systeme	96
8.3.3	Magazinierung & Zuführung der Glasfasern	101
8.4	Software-Architektur	104
8.4.1	Konzepte	105
8.4.2	Schnittstellen	106
8.5	Wiederholgenauigkeit der Montageanlage	106
8.5.1	Spindelmotoren	107
8.5.2	Montageplattform	108
8.5.3	Gesamtsystem	109
9	Bildverarbeitung	113
9.1	Montageablauf	114
9.2	Positionserfassung von Magazin & Faserchip	115
9.2.1	Vorlagensuche & Kantendetektion	118
9.2.2	Laterale Winkelkorrektur	120
9.3	Glasfaser Detektion	121
9.3.1	Faserendflächen Vermessung	123
9.3.2	Vertikale Positionsbestimmung	124
9.3.3	Laterale Positionsbestimmung	126
9.4	Klebstoff-Detektion	128
9.4.1	Kalibrierung der Dosierkanüle	130

10 Zusammenfassung & Ausblick	131
A Formelzeichen und Abkürzungen	133

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Dortmund bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Voges in der Zeit von August 2003 bis Mai 2007. Die Arbeit wurde von der Stiftung Industrieforschung mit dem Projekt „Werkzeugintegration einer visuellen Positionierung und Prozesskontrolle für die flexible Montage von optischen Mikrosystemen“ und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit dem Projekt „Plasmaabgeschiedene Siliciumoxinitrid-Wellenleiter auf Silicium, Verbundprojekt Compact OptoHybrids (CoOp)“ unterstützt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Voges für die herausfordernden und interessanten Projekte sowie die überaus gute Unterstützung in allen fachlichen Belangen.

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Hoffmann, Dr.-Ing. Peter Kopka, Dr.-Ing. Dirk Nüsse und Dr.-Ing. Maxim Fadel, da sie die Basis für diese Arbeit geschaffen haben. Zudem trugen sie durch fachliche Diskussionen und guten Rat zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich bei.

Für die Unterstützung in allen Belangen des Maschinenbaus und die gute Zusammenarbeit möchte ich Herrn Dr.-Ing. Karsten Gayk danken.

Den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt möchte ich sehr für die vielen erstellten Bauteile, insbesondere für den Beitrag zur automatisierten Montageanlage, danken. Im Bereich der Technologie wurde ich von Hans-Georg Scholz und Uwe Tepe in höchstem Maße unterstützt. Petra Sauerland möchte ich für die schönen Zeichnungen und Graphiken danken, die diese Arbeit anschaulicher machen. Für fotografische Tätigkeiten danke ich Dorothee Lunte. Für die geduldige Unterstützung im Bereich der Verwaltung gilt mein Dank Iris Spengler.

Den Technologen am Lehrstuhl Hochfrequenztechnik, Maxim Fadel, Thomas Falkenhagen, Dirk Nüsse, Robert Stonies möchte ich hiermit für die immer gute Zusammenarbeit, Hilfsbereitschaft und Freundschaft danken.

Den übrigen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik und am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik möchte ich auf diese Weise herzlich für die gute Zusammenarbeit danken. Einen großen Teil dieser Arbeit haben Studenten durch Aushilfs-, Studien- und Diplomarbeiten sowie Projektgruppen unterstützt. Die Betreuung dieser Arbeiten hat mir viel Freude bereitet. Mein aufrichtiger Dank geht an: Nora Aust, Nicolas Boos, Christian Bott, Thomas Fingerhut, Dirk Hentschel, Murali Mohan, Matthias Niemand, Magnus Pähler, Tobias Pampel, Thorsten Rettig, Max Schwade, Daniel Teufer, Hongyan Wang, Björn Wohlgemuth und Kaining Zhao.

Schließlich möchte ich noch meiner lieben Frau Christina für Ihren Beistand und das Verständnis für die oft langen Abende voller Arbeit danken.

Roland B. Gentemann

Kapitel 1

Einleitung

Bis zur Entwicklung des World Wide Web (WWW) im Jahre 1989 von Sir Timothy John Berners-Lee, waren digitale Datentransfers auf einen begrenzten Personenkreis beschränkt. Das Internet wurde von Wissenschaftlern und Instituten, jedoch nicht privat genutzt. Im privaten Sektor machten Telefongespräche den Hauptteil des digitalen Datenaufkommens aus. Mit der Kommerzialisierung des Internets und der Einführung des ersten graphischen Web-Browsers (Mosaic) erreichte das Internet eine breite Masse von Menschen. Das damalige Datenaufkommen war jedoch im Vergleich zu dem der Telefongespräche noch relativ gering. Um die digitalen Daten über weite Strecken übertragen zu können, werden schon seit den 80er Jahren optische Fasern eingesetzt. Die Einmodenfasern hat sich hierbei aufgrund des erreichbaren Datenvolumens zu einem Standard entwickelt. Durch die Einführung von ADSL, welches derzeit die Übertragung von bis zu 17 MBit/s ermöglicht, war es zwischenzeitlich nicht notwendig Glasfasern bis zum Endkunden zu legen. Da die Übertragungskapazität der Kupferleitung technologisch begrenzt ist und neue Dienste im Internet das Datenvolumen ansteigen lassen, wird es notwendig werden, Glasfasern immer näher zum Kunden zu bringen (Fibre to the Home). Mittelfristig wird durch die Übertragung von Video- und Ton-Daten eine Übertragungsrate von 100 MBit/s und mehr benötigt.

Für die Bereitstellung eines solchen Netzes werden eine Reihe von optischen Komponenten benötigt (Laser, Modulatoren, Multiplexer, Schalter, Verstärker, etc.). Die Technologien zur Realisierung eines Glasfasernetzes bis zum Endkunden sind weitestgehend vorhanden. Die Problemstellung basiert häufig auf wirtschaftlichen Gründen. Ziel derzeitiger Entwicklungen ist die kostengünstige Realisierung der Einzelkomponenten und Reduktion der Kosten im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT), damit die Technologien den Massenmarkt erreichen können. In der Halbleitertechnik wird eine Kostenreduktion allerdings auch durch eine Reduzierung der Größe eines Bauelements erreicht. Hierfür müssen neue Technologien eingeführt werden.

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Kostenreduktion in der photonischen AVT geleistet werden. Die folgenden Kapitel beleuchten hauptsächlich drei Bereiche:

- die Herstellung von präzisen Faserführungsstrukturen in Silicium zur passiven Kopplung von Fasern und integriert optischen Komponenten (Positionierung ohne optische Dämpfungsmessung)
- das Positionieren und Fügen von Glasfasern und Glasfaser-Chips an integriert optische Komponenten in SiON-Technik
- die automatisierte Montage von Glasfaser-Komponenten (Konzepte, Greifwerkzeuge, automatisierte Qualitätskontrolle).

Um das Ziel der Kostenreduktion erreichen zu können, müssen massenproduktionstaugliche Herstellungsverfahren eingesetzt werden. Durch die Verwendung von Herstellungsverfahren aus der Halbleitertechnik besteht die Möglichkeit große Stückzahlen wirtschaftlich zu fertigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden SiON-basierte Wellenleiter abgedeckt auf Silicium verwendet.

Da der Preis pro Chip stark von seiner einnehmenden Fläche abhängt, werden Wellenleiter mit möglichst geringen Biegeradien benötigt. Die SiON Technologie ermöglicht die Herstellung von Wellenleitern mit geringem Modenfelddurchmesser. In [1] wurde durch die Verwendung kleinerer Modenfelder die Biegeradien von 30 mm auf weniger als 1 mm bei geringen Dämpfungswerten reduziert. Ziel ist es zum einen, die Kopplung an Wellenleiter mit geringem Modenfelddurchmesser, mit geringen Koppelverlusten zu ermöglichen und durch die Kopplung von mehreren Fasern gleichzeitig an einen integriert-optischen Chip die Montagekosten zu reduzieren.

Im Bereich der Montage von Glasfasern in Führungsstrukturen sind eine ganze Reihe von Maßnahmen notwendig, um Kosten zu reduzieren. Hier geht es um die Erhöhung des Automatisierungsgrades bei gleichzeitiger Wahrung der Flexibilität. Zudem können Kosten durch eine geeignete Qualitätskontrolle und -sicherung reduziert werden. Um den Schritt von geringen Stückzahlen zur Massenfertigung für kleine und mittelständische Firmen zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit eine automatisierte Kleinanlage vorgestellt, welche auch für verschiedene Produkte und Produktvarianten eingesetzt werden kann.

Zur Verbesserung der Übersicht sollen an dieser Stelle die einzelnen Kapitel kurz vorgestellt werden.

- **Kapitel 2** erläutert den Begriff der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und führt die verwendeten Technologien sowie die Anforderungen an die Präzision der Fasermontage ein.
- **Kapitel 3** stellt die gängigen Bearbeitungsverfahren der Silicium-Technologie vor.
- In **Kapitel 4** wird die Herstellung verschiedener Faserführungsstrukturen beschrieben. Die Genauigkeit und Qualität der Strukturen wird mit Hilfe von Rauigkeits-

und Öffnungsbreitenmessungen untersucht. Schließlich werden Glasfasern mit kleinem Modenfelddurchmesser in Führungsstrukturen montiert und die Positionsabweichung der Fasern durch optische Dämpfungsmessungen nachgewiesen.

- Das **Kapitel 5** stellt Randbedingungen für die Fügung von Fasern in V-Gruben auf. Zusätzlich werden die derzeit häufig eingesetzten Klebstoff Dosierverfahren in Bezug auf die Reproduzierbarkeit und Flexibilität untersucht. Ein neues Verfahren, welches sich aus dem Elektrospray-Verfahren von Analysegeräten ableitet, wird vorgestellt.
- Die Kopplung von Glasfasern an integriert optische Wellenleiter wird in **Kapitel 6** behandelt. Hier werden die technologischen Möglichkeiten wie integrierte Taper-Strukturen, Faser-Taper und Spezialfasern gespleißt an Standardfasern gegenübergestellt. Einzelne Faser-Wellenleiter Verbindungen und zweikanalige Faser-Chip Verbindungen wurden realisiert.
- In **Kapitel 7** wird die Thematik der Glasfaser-Greifwerkzeuge behandelt. Zur präzisen Handhabung der Fasern werden Silicium basierte Vakuumgreifer mit mechanischen Zangengreifern kombiniert.
- In **Kapitel 8** werden zunächst die notwendigen Eigenschaften einer automatisierten Fasermontageanlage eingeführt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Anlage sollte ursprünglich nur für die in Abschnitt 8.1 vorgestellten Glasfaserschalter und deren Varianten verwendet werden. Später wurde sie jedoch auch für die Montage von Glasfaserchips für die Faser-Wellenleiter Kopplung verwendet. Das Kapitel stellt alternative Konzepte vor, beschreibt Randbedingungen der Montage und stellt die realisierte Anlage vor. Es wird deutlich gemacht, dass ein fertigungsge-rechter Entwurf der zu montierenden Komponenten eine zwingende Voraussetzung zur effizienten Montage ist.
- Die hohen Anforderungen an die Präzision der Fasermontage und das Ziel der Verminderung des Ausschusses erfordern die in **Kapitel 9** beschriebenen Maßnahmen zur visuellen Überwachung und Dokumentation des Fügevorgangs. In diesem Kapitel werden technologische Möglichkeiten der Vermessung und Überwachung durch eine Mikroskop-Optik untersucht und realisierte Bildverarbeitungsfunktionen vorgestellt.
- Im abschließenden Kapitel **Zusammenfassung und Ausblick** werden die Ergebnisse noch einmal zusammenfassend aufbereitet und erforderliche Weiterentwicklungen aufgezeigt.

Kapitel 2

Optische Aufbau- und Verbindungstechnik

Der Begriff „Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)“ *umfasst als ein Bereich der Mikrosystemtechnik die Gesamtheit der Technologien und Entwurfswerkzeuge, die zur Integration mikroelektronischer Komponenten auf engstem Raum benötigt werden [2].* Der englische Begriff „Packaging“ spielt auf die ursprünglichen Bereiche der AVT, elektrische Kontaktierung und Häusung von Mikrochips an.

Heute muss der Begriff allgemeiner gefasst werden. Mit der Verschmelzung optischer und elektronischer Anwendungen und dem damit häufig verbundenen hybriden Aufbau des Gesamtsystems, steigt die Anzahl der Aufgaben im Bereich der AVT an. Die AVT beinhaltet folglich das Verbinden von Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem. Dabei umfasst sie nicht nur die Technologien und Verfahrenstechniken zur Erstellung des Gesamtsystems sondern ebenso die Entwicklungsphase zur Definition der Schnittstellen zwischen den Einzelkomponenten und Erstellung eines fertigungsgerechten Entwurfs. Die AVT trägt somit zu einem großen Teil zu Funktionalität, Qualität und Wirtschaftlichkeit des Systems bei [3].

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Fügeprozess von Einmoden Glasfasern mit dem standardisierten Durchmesser von $125\ \mu\text{m}$. Die Fasern unterscheiden sich nur durch die Größe des Kerns und Modenfelddurchmessers. Hieraus resultieren unterschiedliche Anforderungen an die Justagegenauigkeit. Die unterschiedlichen Technologien zur Positionierung und Kopplung von Fasern werden vorgestellt. Für die verwendeten Fasertypen, Standard- und Dünnkernfasern (High NA), werden die zu erwartenden Verlustleistungen der Kopplungsstellen im Folgenden berechnet.

2.1 Technologien & Koppeltechniken

Glasfasern werden häufig in Führungsstrukturen montiert, damit eine kostengünstige und präzise Justage ermöglicht wird (siehe Abbildung 2.1). Je nach geforderter Genauigkeit sowie technologischer und wirtschaftlicher Aspekte kommen unterschiedliche Materialien (Silicium, Stahl, Polymere) und Herstellungsmethoden zum Einsatz. Meistens werden V-förmige Gruben eingesetzt, da diese mit Hilfe vieler Methoden herstellbar sind.

Faser-Führungen werden, wenn möglich, direkt in dem optischen Modul integriert. Auf diese Weise kann eine aufwändige aktive Justage (mit Hilfe optischer Dämpfungsmessungen) vermieden werden. V-förmige Führungen werden zum Beispiel bei MEMS Faserschaltern [4] und Lasermodulen eingesetzt [5].

Sprechen technologische Gründe gegen eine Integration der Führungsstrukturen, so können separate Bauteile mit Führungsstrukturen verwendet werden, um die Fasern zu ordnen, bevor sie an die eigentliche Komponente stoßgekoppelt werden (siehe Abbildung 2.1 c).

Zur Kopplung an planar hergestellte Wellenleiter werden eindimensionale Faserverbünde eingesetzt. Diese sind zumindest für Standard Einmoden Fasern (SSMF) kommerziell erhältlich [6, 7, 8]. Auch zweidimensionale Führungsstrukturen wurden bereits vorgestellt (siehe Abschnitt 4.3 und Abbildung 2.1 a). Diese werden vor allem bei Mesa-förmigen Vertical Cavity Surface Emitting Lasern (VCSEL) eingesetzt. Die Fasern müssen hierbei senkrecht zur Chip-Oberfläche an ein $n \times n$ großes Mesa-Feld stoßgekoppelt werden.

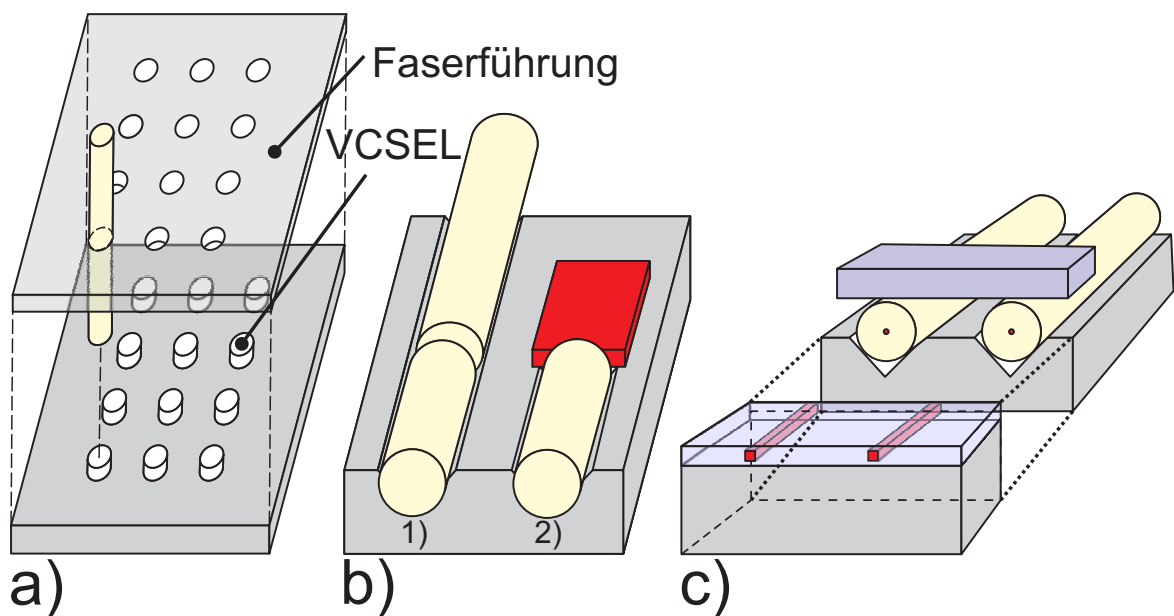


Abbildung 2.1: *Kopplungstechniken für Glasfasern; Faserfeld an VCSEL (a), Kopplungsbereich in einer Führungsstruktur (b.1), Kopplung von Faser vor hybrid montiertem Modul (b.2), Faserfeld vor integriert optischen Wellenleitern (c)*

Die Faserenden werden bei einzelnen Kopplungen durch einen so genannten Diamant-Cleaver in einem Winkel von 0° oder 5° (um Reflexionen zu unterbinden) gespalten. So entsteht eine saubere, glatte Facette. Bei eindimensionalen Faserverbänden kann mit

Hilfe eines Sägeschnittes und anschließender Politur eine glatte Fläche zur Stoßkopplung hergestellt werden. Einen Sonderfall stellen so genannte gelinste Fasern dar, welche am Faserende zu einer Linse verjüngt sind (siehe Abbildung: 2.2). Diese werden derzeit vor allem zur Ankopplung an Laser-Module verwendet [9][10], um den im Vergleich zur symmetrisch aufgebauten Glasfaser stark abweichenden Öffnungswinkel des Lasers auszugleichen und somit die Kopplungseffizienz zu erhöhen. Für die in dieser Arbeit verwendeten integriert optischen Wellenleiter (siehe Abbildungen 2.2 und 2.3) können gelinste Fasern ebenfalls verwendet werden.

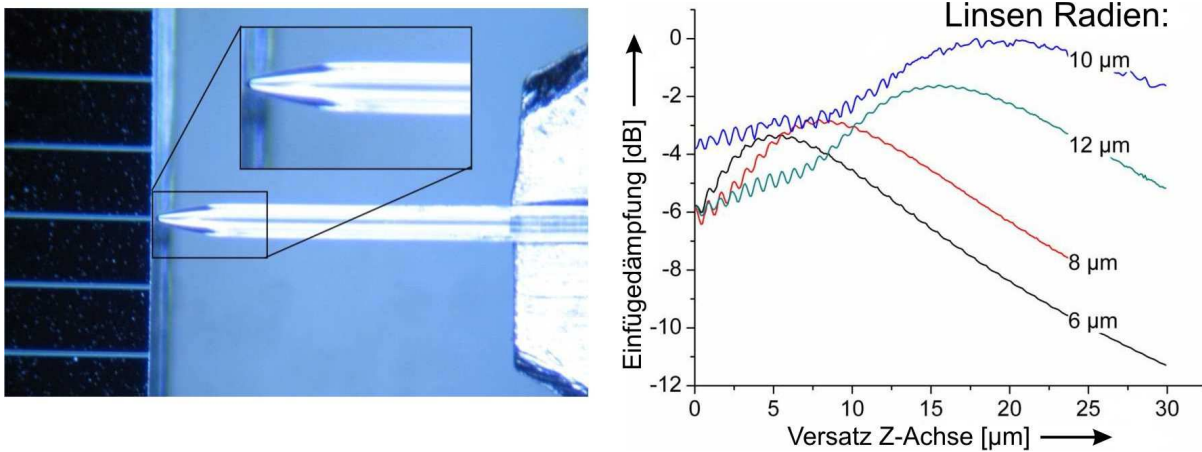


Abbildung 2.2: Foto von Glasfaser mit Linse gekoppelt an integriert optischen Wellenleiter; Messungen der Einfügedämpfungen mit unterschiedlichen Linsenradien und Variation des Abstands zur Stirnfläche des integrierten Wellenleiters (aus [11])

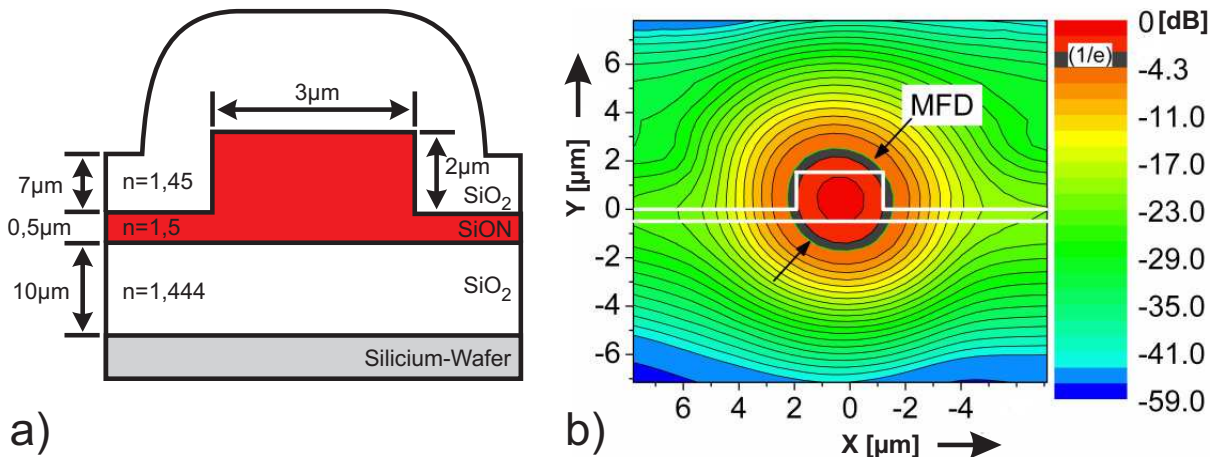


Abbildung 2.3: Dimensionen und Daten des SiON-basierten Wellenleiters (a) und zugehörige normierte Leistungsverteilung der Verschiebungsmessung mit einer UHNA₄ Faser von Nufern (b) (Messung aus: [1]); MFD: Modenfeld-durchmesser

Eine weitere Anwendung liegt in der Messtechnik. Dadurch, dass die gelinste Faser einen Fokus hat, wird ein integriert-optischer Chip ohne die Verwendung von Immersionsöl

vermessen. Ein automatisiertes Heranfahren an den Chip wird ermöglicht durch die an- und absteigende Flanke des Dämpfungssignals um den Fokuspunkt (siehe Abbildung: 2.5) [1]. Im Bereich der Faser-Chip Kopplung bietet die gelinste Faser den Vorteil, dass eine Abstandsvariation von bis zu $10\ \mu\text{m}$ möglich ist, ohne die Verluste größer als $0,5\ \text{dB}$ werden zu lassen. In radialer Richtung ergeben sich jedoch keine Vorteile gegenüber einer Faser ohne Linse mit gleichem Modenfelddurchmesser [9].

2.1.1 Integriert optische Wellenleiter

Integriert optische Wellenleiter lassen sich mit Hilfe einer Vielzahl von Technologien herstellen. Die Hauptziele der derzeitigen Forschung und Entwicklung sind:

- geringe Wellenleiterdämpfung
- kleine Krümmungsradien
- CMOS Kompatibilität
- gute Kopplung zu Standard Einmodenfasern
- Integration aktiver Sende- und Empfangskomponenten

Kleine Krümmungsradien sind erforderlich, damit die Komponenten eine geringe Fläche beanspruchen und somit günstig werden. Zur Realisierung sind kleine Modenfelddurchmesser und somit relativ hohe Kern/Mantel Brechzahlunterschiede erforderlich.

Bei der Silicon-On-Insulator (SOI) Technologie wird Silicium als Kernmaterial und SiO_2 als Mantelmaterial verwendet. Der sehr hohe Brechzahlkontrast von $\Delta n = 2$ und der geringe Modenfelddurchmesser ($MFD < 1\ \mu\text{m}$) verhindern jedoch eine effektive Kopplung an Standardfasern. Um das Koppelproblem zu lösen, können integrierte Modenfeld-Anpassungsstrukturen verwendet werden. Diese ermöglichen jedoch nur eine Aufweitung auf einen Modenfelddurchmesser von $MFD = 4\ \mu\text{m}$. Somit muss zusätzlich eine Spezialfaser mit kleinem Modenfelddurchmesser an eine Standardfaser gespleißt werden (Faserspleiß) [12][13].

In [14] und [15] werden fokussierende Gitterstrukturen, auch holographische Linsen genannt, eingesetzt, um eine verlustarme Kopplung zwischen SOI-Wellenleiter und Standardfaser zu ermöglichen. Hierbei wurde bislang eine Kopplungseffizienz von 69% erreicht.

Für diese Arbeit werden SiON-basierte Wellenleiter verwendet. Diese wurden im Rahmen der Dissertation von M. Fadel hergestellt und charakterisiert [1]. Das Kernmaterial besteht aus SiON und der Mantelbereich aus SiO_2 (siehe Abbildung 2.3). Der Brechzahlhub ist mit $\Delta n = 0,05$ deutlich geringer als bei SOI-Wellenleitern. Somit werden keine so kleinen Biegeradien wie bei SOI-Wellenleitern erreicht. Die SiON-Wellenleiter ($MFD = 4\ \mu\text{m}$) stellen einen Kompromiss zwischen geringen Biegeradien (minimal $1\ \text{mm}$) und der Koppeleffizienz zu Standardfasern dar. Statt einer zusätzlich integrierten Anpassungsstruktur, wie bei SOI-Wellenleitern, können Fasern mit kleinem Modenfelddurchmesser direkt ohne große Verluste stoßgekoppelt werden. Der Nachteil der SiON-Technologie

liegt in der fehlenden CMOS-Kompatibilität, da die abgeschiedenen Schichten bei hohen Temperaturen getempert werden müssen.

Im Folgenden werden die Eigenschaften der Kopplung an diese Wellenleiter beschrieben.

2.2 Kopplungseffizienz

Die theoretischen Grundlagen zur Führung von elektromagnetischen Wellen optischer Frequenzen in geeigneten Wellenleitern soll an dieser Stelle vorausgesetzt werden, da dies in der Literatur detailliert beschrieben ist [16, 17]. Zum Verständnis des Begriffs Kopplungseffizienz und die möglichen Fehlerquellen soll hier kurz auf die Eigenschaften von Faser-Wellenleiter Kopplungen für Einmoden Wellenleiter eingegangen werden. Die aus einer Glasfaser austretende Welle kann in guter Näherung als Gaußscher Strahl beschrieben werden (siehe Abbildung 2.4). Das heißt, das transversale Profil der Feldverteilung entspricht einer Gaußschen Glockenkurve.

Die axiale Intensität des Gaußstrahls folgt der Gleichung:

$$I(r) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 e^{-\frac{2r^2}{w^2(z)}}, \quad (2.1)$$

mit w_0 : Fleckradius, r : radialer Abstand von der Mitte des Strahls, $w(z)$: Weite des Gaußschen Strahls, I_0 : Intensität in der Strahlmitte.

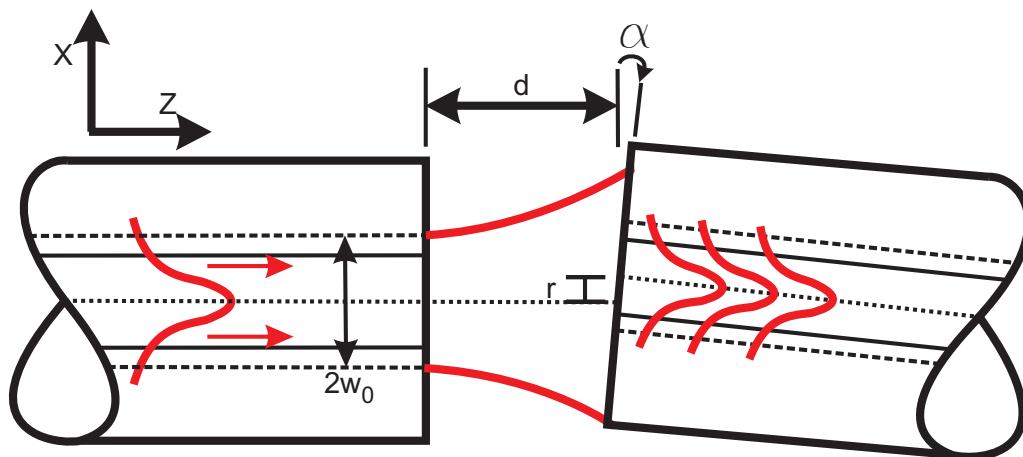


Abbildung 2.4: Kopplung zwischen zwei Glasfasern

Die Strahlmitte (Minimum des Fleckradius) wird üblicherweise an die Austrittsstelle des Strahls aus dem Wellenleiter gelegt.

Im geringen Abstand zur Austrittsstelle hat sich der Gaußsche Strahl noch nicht sehr weit geöffnet und man kann in guter Näherung die klassische Strahlenoptik und Wellenoptik anwenden. Die Gaußsche Strahlentheorie ermöglicht die exakte Berechnung aller Effekte an der Koppelstelle und verbindet die Strahlen- mit der Wellenoptik. Effekte, welche durch den Öffnungswinkel des Gaußstrahls beeinflusst sind, können nur mit Hilfe der Gaußschen Strahlen korrekt beschrieben werden. Im allgemeinen wird mit Näherungsformeln

gerechnet, da die Fehler gering sind [18]. Im Folgenden wird das Übertragungsverhalten zweier stoßgekoppelter Fasern mit Luftspalt mit Hilfe der Näherungen für planare Wellen berechnet. Die Kopplungseffizienz wird als das Verhältnis der optischen Leistungen vor und nach der Koppelstelle eingeführt (P_1 und P_2) [19]. Die Angabe der Koppeffizienz in Dezibel folgt der Gleichung:

$$\eta = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2.2)$$

Die Anforderungen an die Genauigkeit der Faserpositionierung resultieren aus den jeweiligen Modenfelddurchmessern ($2 \cdot \text{Fleckradius } w_0$) bzw. Rayleighlängen der verwendeten Glasfaser und Wellenleiter.

Der Fleckradius w_0 bezeichnet den Wert der Feldverteilung, bei welchem die Intensität des Feldes auf $1/e^2$ abgefallen ist. Der Rayleighabstand z_0 ergibt sich bei einer Faser, die in ein Material mit der Brechzahl n hinein strahlt, wie folgt aus dem Fleckradius [17]:

$$z_0 = k_0 n \frac{w_0^2}{2} = \frac{n w_0^2 \pi}{\lambda} \quad (2.3)$$

mit $k_0 = 2\pi/\lambda$ und λ : Wellenlänge. An der Position z_0 ist der Fleckradius auf das $\sqrt{2}$ -fache angestiegen und somit die Amplitude des Feldes auf das $1/\sqrt{2}$ -fache gesunken. Im Bereich des Rayleigh Abstands (Nahfeld) verhält sich der Radius des Gaußstrahls in Abhängigkeit von z gemäß:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}}. \quad (2.4)$$

Im Fernfeld ist eine lineare Abhängigkeit zwischen z und $w(z)$ gegeben. Für $z \gg z_0$ gilt dort:

$$w(z) \approx \frac{w_0 z}{z_0} \quad (2.5)$$

Im Folgenden werden nur Berechnungen für Stufenprofil-Fasern mit näherungsweise gaußförmigem Modenprofil durchgeführt, da diese zumeist zur Ankopplung an Komponenten verwendet werden [18]. Die Ankopplung von Fasern an Wellenleiter, Dioden oder andere Fasern unterscheidet sich aus Sicht der Montagetechnik nur im Hinblick auf die erforderliche Positioniergenauigkeit durch die veränderten optischen Parameter der Komponenten. In Tabelle 2.1 sind die Parameter von zwei für die Fasertechnik charakteristischen Glasfasertypen exemplarisch dargestellt.

	SSMF Corning SMF-28e	High-NA PWG1XP	High-NA UHNA4
Kerndurchmesser [μm]	8,2.	k.A.	k.A.
Manteldurchmesser [μm]	$125 \pm 0,3$	$125 \pm 0,5$	$125 \pm 1,5$
Numerische Apertur NA	0,15	0,26	0,35
Modenfelddurchmesser [μm]	$10,4 \pm 0,5$	$4,8 \pm 0,5$	$4,0 \pm 0,3$
Kern/Mantel Konzentritizität [μm]	$< 0,3$	$< 0,3$	$< 0,5$
Rayleigh-Länge [μm]	54,8	11,7	8,1
Radiale Toleranz (1dB Fall) Δr	2,5	1,15	0,96
Axiale Toleranz (1dB Fall) Δz	55,8	11,9	8,3
Winkel Toleranz (1dB Fall) $\Delta \alpha$	$1,74^\circ$	$3,77^\circ$	$4,6^\circ$

Tabelle 2.1: Typische Glasfaserkennaten für Standard Einmoden Fasern und Fasern mit hohem Indexkontrast (bei $\lambda = 1550 nm$) [20] [21]. Die Toleranzangaben sind einzeln berechnete Werte, ohne Kombination der Fehlergrößen. Zur Berechnung wurden die Formeln aus Tabelle 2.2 verwendet.

Durch den sehr unterschiedlichen Modenfelddurchmesser der Fasern ergeben sich deutliche Unterschiede in den Positioniertoleranzen. Zu beachten ist, dass die verschiedenen Koppelfehler abhängig voneinander sind. Die Berechnung der einzelnen Fehlerbeiträge erfolgt nach Tabelle 2.2 (aus [17]).

Fehlerart	Kopplungsfaktor
Radialer Versatz r	$\eta_r = \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right)$
Axialer Versatz z	$\eta_z = \frac{1}{1+(z/2z_0)^2}$
Winkelfehler α	$\eta_\alpha = \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha_d}\right)^2$
Modenfehlanpassung w_e/w_a	$\eta_m = \left(\frac{2w_e w_a}{w_e^2 + w_a^2}\right)^2$

Tabelle 2.2: Kopplungsfaktor für Faser-Faser-Kopplung bei unterschiedlichen Fehlergrößen

Ein großer Modenfelddurchmesser führt zu einer großen Toleranz für den radialen und axialen Versatz. Der einzuhaltende Kopplungswinkel muss jedoch im Vergleich zu Fasern mit kleinem Modenfelddurchmesser klein sein, da der Brechzahlhub geringer ist und folglich der kritische Winkel der Totalreflexion gemessen zur axialen Faserrichtung klein ist. Werden Führungsstrukturen verwendet, spielt der einzuhaltende Winkel eine eher untergeordnete Rolle, da dieser beispielsweise mit Hilfe von Silicium V-Gruben sehr gut eingehalten werden kann [22]. Am kritischsten ist dann der radiale Versatz der Modenfelder und der axiale Abstand der zu koppelnden Komponenten. Aus den berechneten

Kopplungsverlusten für eine Dämpfung von 1 dB (siehe Tab. 2.2) wird deutlich, dass für Standard Einmodenfasern (SSMF) hohe Anforderungen an die Einhaltung des radialen Versatzes gestellt werden. Der Versatz sollte hier deutlich unter $2,5 \mu m$ liegen. Häufig werden Werte um $\pm 0,5 \mu m$ gefordert (siehe [23]). Werden Glasfasern mit einem hohen Indexkontrast (High-NA) für Faser-Wellenleiterkopplungen verwendet, muss noch genauer positioniert werden. Der Kopplungsfaktor η_{mfw} für Verluste aufgrund einer Modenfehl-anpassung für Faser-Wellenleiterkopplungen ist wie folgt definiert:

$$\eta_{mfw} = \frac{4}{\left(\frac{w_x}{w_0} + \frac{w_0}{w_x}\right) \left(\frac{w_y}{w_0} + \frac{w_0}{w_y}\right)}. \quad (2.6)$$

Wobei w_x und w_y den Kernabmessungen des integriert optischen Wellenleiters entsprechen und w_0 dem Modenfelddurchmesser der Glasfaser [17]. Für die in dieser Arbeit verwendeten Fasern der Firma Nufern (PWG1-XP und UHNA4) sind die Verluste durch Modenfehl-anpassung in Tabelle 2.3 angegeben.

Fasertyp	Dämpfung
Corning SSMF-28e	4,7 dB
Nufern UHNA4	0,2 dB
Nufern PWG1-XP	0,6 dB

Tabelle 2.3: Theoretische Verluste durch Modenfehl-anpassung zwischen integriert optischem Wellenleiter und SSM-, UHNA4- sowie PWG1-XP- Faser

Neben dem radialen Versatz spielt nun auch der axiale Abstand der Faser eine große Rolle. Schräg polierte oder gesägte Wellenleiter- und Faserführungs-Chips können zu einer deutlich höheren Kopplungsdämpfung führen, da die Fasern nicht in direkten Kontakt mit dem Chip gebracht werden können. In den Abbildungen 2.5 und 2.6 sind Dämpfungsmessungen von Faser-Wellenleiter-Kopplungen mit axialem und radialem Versatz vom Dämpfungsminimum angegeben.

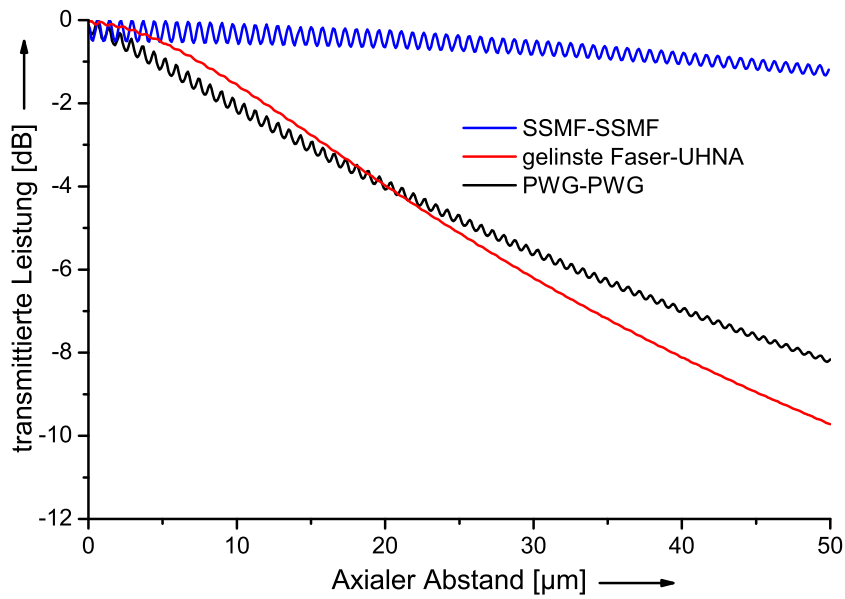


Abbildung 2.5: Messung der axialen Verschiebung zwischen Faser und integriert optischen Wellenleiter von 0 bis 50 μm für SSMF, PWG1-XP und gelinste Faser (10 μm Linsenradius); Rasterung mit 0,1 μm Schritten

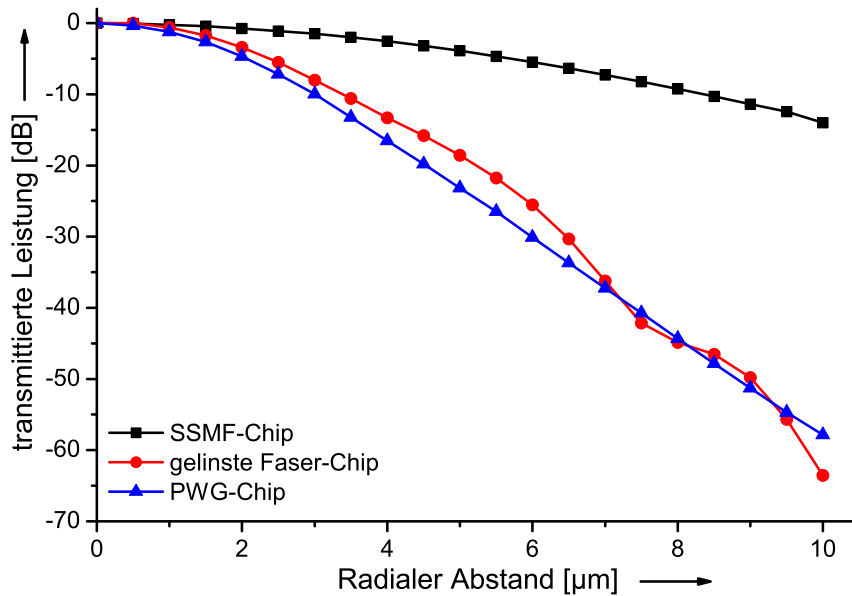


Abbildung 2.6: Messung der radialen Verschiebung zwischen Faser und integriert optischen Wellenleiter von 0 bis 10 μm für SSMF, PWG1-XP und gelinste Faser (10 μm Linsenradius); Rasterung mit 0,5 μm Schritten; Maxima normiert auf 0 dB Dämpfung

	High-NA Nufern PWG1XP	Hign-NA Nufern UHNA4
Faserkonzentrität	$0,3 \mu m$	$0,5 \mu m$
Var. Durchmesser	$0,5 \mu m$	$1,5 \mu m$
Var. MF-Durchm.	$0,5 \mu m$	$0,3 \mu m$
Σ Abweichungen (ohne Var. MF-Durchm.)	$0,55 \mu m \equiv -0,23 dB$	$1,25 \mu m \equiv -1,7 dB$
Dämpfung (Var. MF-Durchm.)	$0,5 \mu m \equiv -0,33 dB$	$0,3 \mu m \equiv -0,13 dB$

Tabelle 2.4: Herstellungstoleranzen von UHNA4 und PWG1-XP-Fasern und die resultierenden maximalen Verlustbeiträge für eine Kopplung der Fasern an die verwendeten SiON Wellenleiter

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit von SSMF und UHNA-Fasern werden diese aktiv, das heißt mit Hilfe von Dämpfungsmessungen, oder mit Hilfe passiver Führungsstrukturen positioniert. Die aktive Justage ist aufwendig, in manchen Fällen sogar unmöglich, da kein durchgehender optischer Pfad existiert. So müsste bei einem Faserschalter der entsprechende Pfad während der Montage durchgeschaltet werden [22].

Passive Führungsstrukturen sind sehr genau herstellbar. Besonders gut eignen sich V- oder rautenförmige Gruben, die mittels anisotroper, naßchemischer Verfahren in Silicium geätzt werden [24]. Die Genauigkeit von V-Gruben oder rautenförmigen Führungsstrukturen wird in Abschnitt 4 untersucht. Zu den Herstellungsungenauigkeiten addieren sich die Herstellungstoleranzen der Faser (Konzentrität des Faserkerns, Variation des Manteldurchmessers, Variation Modenfelddurchmesser). In der Praxis kommt noch die Genauigkeit der Montage hinzu. Aus der Summe der Führungsstrukturtoleranz, Lage des Faserkerns und der Variation des Manteldurchmessers ergeben sich für die Fasern die in Tabelle 2.4 dargestellten radialen Verluste. Die Verluste, hervorgerufen durch die Variation des Modenfelddurchmessers, sind dort separat aufgelistet, da diese nicht durch die Aufbautechnik beeinflusst sind. Winkelfehler und Abstandsfehler werden bei dieser Berechnung vernachlässigt. Die Berechnung umfasst Verluste für eine Faser-Wellenleiter Koppelstelle. In Tabelle 2.4 sind die Verluste durch Herstellungstoleranzen für SSM, UHNA4 und PWG1-XP-Fasern aufgelistet. Die berechneten Verluste, stellen maximal zu erwartende Werte dar. In der Praxis sind bessere Werte möglich. Die PWG1-XP-Faser ist deutlich besser geeignet zur Verwendung in Führungsstrukturen. Die UHNA4 Faser hat vor allem einen zu stark variierenden Faserdurchmesser. Durch eine fehlerhafte Positionierung der Fasern in den Führungsstrukturen und eines axialen Abstandes wird die Dämpfung weiter erhöht (siehe hierzu Kapitel 6).

Kapitel 3

Aufbautechnik mit Silicium

Silicium wird seit Jahrzehnten in der Halbleitertechnologie, Mikrosystemtechnik und der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik eingesetzt [22]. Durch die breite Verwendung von Silicium und die konsequente Weiterentwicklung der Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren in der Halbleiterindustrie, ist Silicium heute ein sehr vielseitig einsetzbares, kostengünstiges Material. Vor allem so genannte Batch-Prozesse, bei denen einer oder mehrere Wafer gleichzeitig prozessiert werden können, ermöglichen die Fertigung vieler Bauteile gleichzeitig. Diese Verfahren umfassen die Bereiche Photolithographie, plasma-gestützte Ätz- und Abscheideverfahren (z.B. Reaktives Ionen Ätzen RIE, Plasma Enhanced chemical Vapor Deposition PECVD). Der Preis pro Bauteil wird dabei vor allem durch das Verhältnis von Bauteilgröße zu Wafergröße bestimmt. Die in der Halbleiterindustrie gängigen Bauelementgrößen führen zu sehr kostengünstigen Produkten. Die Volumen-Mikromechanik benötigt jedoch häufig größere Chip-Abmessungen, da hier die mechanischen Eigenschaften des Siliciums ausgenutzt werden. Statt Zehntausender von Komponenten pro Wafer können oft nur weniger als 100 auf einem Wafer realisiert werden. Dies steigert die Herstellungskosten folglich von ein paar Cent auf einige 10 Euro pro Komponente.

Die herausragenden mechanischen Eigenschaften von einkristallinem Silicium, gepaart mit den Möglichkeiten der Halbleiterfertigung machen es zum idealen Material für die (optische) Aufbau- und Verbindungstechnik ([25], S. 299).

3.1 Materialeigenschaften einkristallinen Siliciums

Silicium ist ein Halbleitermaterial, welches durch Wachstum in der Schmelze einkristallin hergestellt werden kann (siehe [26] Seite 1-40). Das Siliciumgitter entsteht aus zwei kubisch flächenzentrierten Kristallgittern, die um $1/4$ der Raumdiagonalen gegeneinander verschoben sind. Somit ist ein Siliciumatom jeweils von vier anderen Siliciumatomen umgeben und es ergibt sich eine tetraederförmige Struktur. Die Kristallebenen werden anhand der Millerschen Indizes definiert (z.B.: $\{100\}$). Für die Mikromechanik sind vor

allein die niedrigen Indizes $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ und $\langle 111 \rangle$ von Bedeutung, da diese die Haupt-Ätzrichtungen darstellen [22]. Für mikromechanische Systeme werden meistens

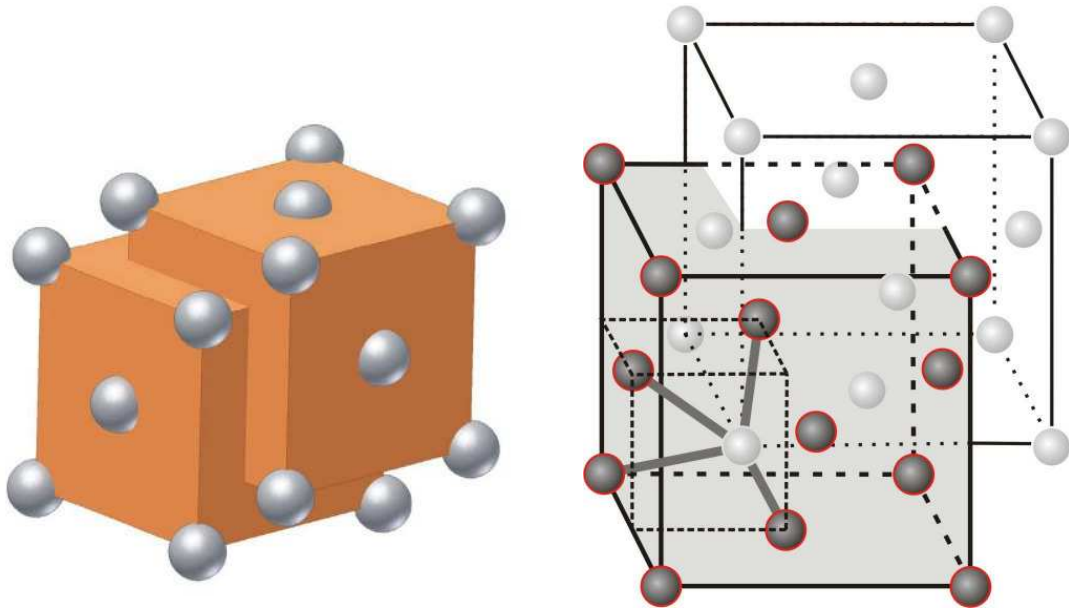


Abbildung 3.1: Aufbau des Silicium Kristallgitters

Wafer mit den Orientierungen $\{100\}$ und $\{110\}$ verwendet. Die Kristallorientierung relativ zum Wafer-Flat kann mit Genauigkeiten von $< 0,1^\circ$ eingekauft werden, so dass nur im Falle sehr hoher erforderlicher Genauigkeiten Probeätzungen vorgenommen werden müssen ([27], S.17).

Neben den physikalischen Halbleiter Eigenschaften, die im Fall der Mikromechanik keine wesentliche Rolle spielen, sind vor allem die mechanischen Eigenschaften hervorzuheben. Die Besonderheit von Silicium liegt darin, dass bis zum Bruchpunkt eine mechanische Verbiegung des Materials vollständig reversibel ist. Dieser abrupte Übergang ermöglicht die Herstellung von extrem biegsamen Strukturen mit großer Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Im Vergleich zu anderen Materialien, wie Stahl oder Quarz, wird deutlich, dass Silicium für die Aufbautechnik gerade bei kleinen Strukturgrößen ($< 100 \mu m$) große Vorteile aufweist. Die große Härte, das hohe Elastizitätsmodul und die sehr hohe Zugfestigkeit sind Eigenschaften die es ermöglichen kleinste, belastbare Strukturen herzustellen (siehe Tab. 3.1).

Material	Härte [g/cm ²]	Dichte [GPa]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [GPa]
Quarz	2,20	8,2	0,07	0,5-0,7
Silicium	2,32	8,5-11	130-190	2,8-6,8
Edelstahl	7,9-8,2	5,5-9	206-235	0,5-1,5

Tabelle 3.1: Vergleich der Materialeigenschaften von Silicium mit Quarz und Edelstahl (aus [27], S. 14).

3.2 Strukturierung von Silicium

Wie bereits in Abschnitt 3 erwähnt, liegen die Vorteile von Silicium in der Möglichkeit der Bearbeitung mit Verfahren, die in der Halbleiterindustrie zum Standard gehören. In den folgenden Abschnitten werden die eingesetzten Verfahren erläutert. Für die Herstellung der in Kapitel 7 beschriebenen Fasergreifer wurde das Silicium nasschemisch mittels Kaliumhydroxid Lösung (KOH) strukturiert. Das Deep Reactive Ion Etching Verfahren (DRIE) und das Laserbohren wurde zur Vorschädigung der Silicium Kristallstruktur für Durchgangslöcher eingesetzt (siehe Abschnitt 4.3).

Es werden bei den Ätzverfahren anisotrope und isotrope Verfahren unterschieden. Isotrope Verfahren ätzen jede Kristallrichtung gleichermaßen. Es bildet sich ein rundes Ätzprofil aus (siehe Abbildung 3.2). Anisotrope Verfahren zeigen eine deutliche Richtungsabhängigkeit beim Ätzen. Dies wird bei trockenchemischen Prozessen z.B. durch die Beschleunigungsrichtung der ätzenden Radikale und eine Seitenwandpassivierung durch Polymere erreicht. Nasschemische Prozesse, wie zum Beispiel KOH-Ätze sind chemisch gesteuert und es ergeben sich somit Strukturen, die durch die Silicium Kristallstruktur vorgegeben sind (siehe Abbildung 3.2). Elektrochemische Verfahren nutzen zusätzlich eine elektrische Feldkomponente, um eine Vorzugsrichtung zu definieren (siehe Abschnitt 4.3.4).

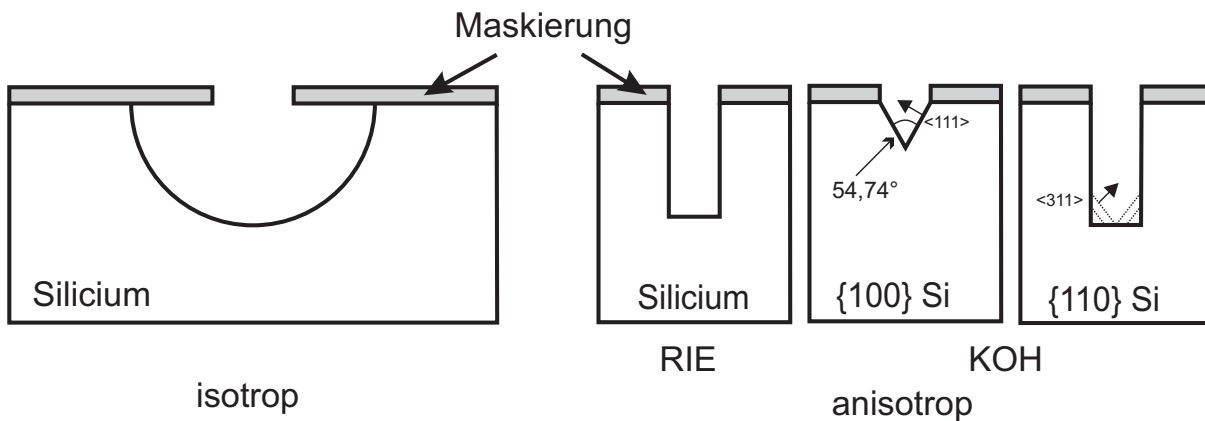


Abbildung 3.2: *Anisotrope und isotrope Strukturierung von Silicium; RIE: Reactive Ion Etching, KOH: Kaliumhydroxid*

3.2.1 Lithographie

Zur Festlegung der geometrischen Struktur der hergestellten Komponenten wurde die standard UV-Fotolithographie eingesetzt. Es wurden Elektronenstrahl geschriebene Masken verwendet. Zur Strukturierung von SiO_2 oder Si_3N_4 wurde der Fotolack ARU-4040 der Firma Allresist [28] als Maskierung eingesetzt (Positiv-Belichtung). Zur Maskierung mittels DRIE hergestellter Strukturen wurde der Lack AZ-1518 der Firma Micro Chemicals GmbH [29] verwendet.

3.2.2 Nasschemische Strukturierung mit Kalilauge

Kalilauge (KOH) wird in der Volumenmikromechanik sehr häufig verwendet, da der Prozess relativ einfach, stabil, nicht toxisch und kostengünstig ist [22]. Alle KOH geätzten Komponenten wurden mit der in Abbildung 3.3 dargestellten Anlage hergestellt. Die KOH

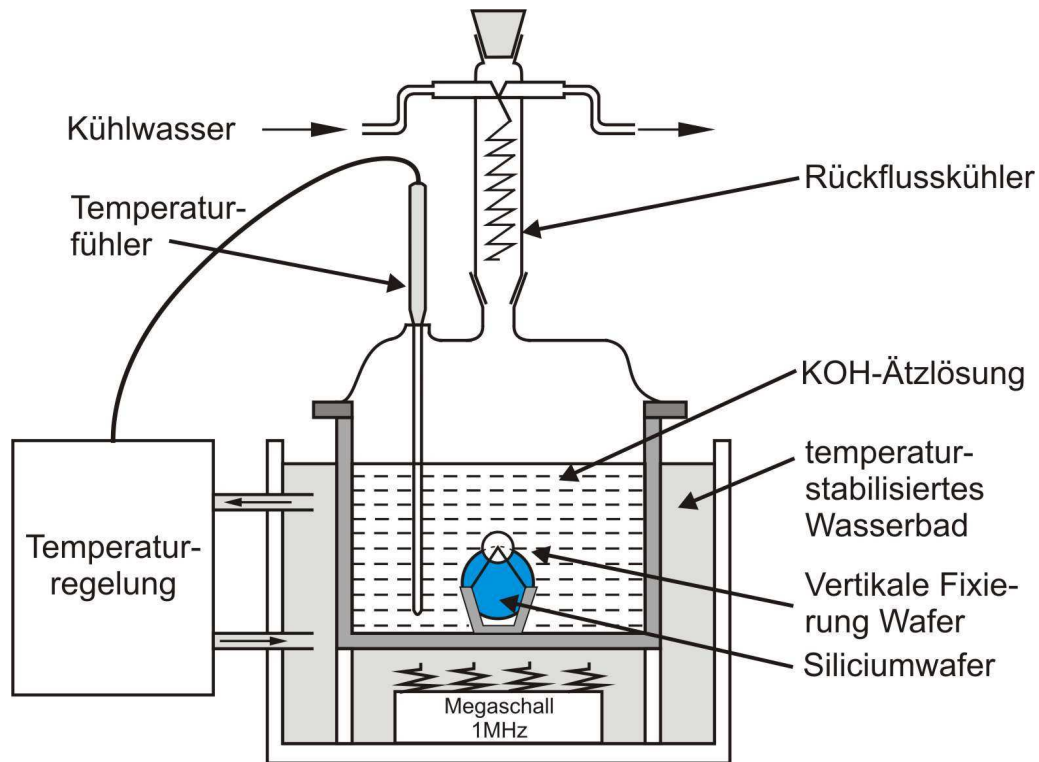


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der KOH Ätzanlage (vergl. [22], S.79)

Lösung befindet sich in einem KOH beständigen Kolben aus Duranglas, welcher durch ein Wasserbad auf Temperatur gehalten wird. Zur Temperierung wurde ein Umwälzthermostat eingesetzt (Julabo MH-26). Im Unterschied zu der in [22] beschriebenen Anlage, bei welcher ein Magnetrührer eingesetzt wird, kann ein unter dem Kolben befindlicher Megaschall-Schwinger ($f=1\text{MHz}$) genutzt werden. Dieser ermöglicht das Ätzen von Strukturen mit großen Aspektverhältnissen, verbessert die Homogenität, da entstehender Wasserstoff sich in einem geringeren Maße an Oberflächen anlagert [30]. Ein Rückflusskühler kondensiert den entstehenden Wasserdampf, um die Zunahme der KOH Konzentration zu verhindern. Der beim Ätzen entstehende Wasserstoff kann durch den Kühler entweichen. Das beste Ergebnis wird erreicht, indem die Siliciumwafer senkrecht zur Wasseroberfläche in den Kolben positioniert werden, da der beim Ätztvorgang entstehende Wasserstoff so besser entweichen kann (bei beidseitig zu ätzenden Strukturen). Durch die Bildung von Wasserstoff kann es zudem zum Aufschwimmen der Wafer kommen. Aus diesem Grund wird ein Waferhalter eingesetzt, der über einen Bügel verfügt, welcher die Wafer herunter drückt.

Für die KOH-Ätzungen wurde eine 20% KOH Lösung (in H_2O) bei Temperaturen zwischen 40 und 70°C verwendet. Die 20% Lösung wurde verwendet, da bei dieser Konzentration die Ätzrate maximal ist und durch Verdünnung der Lösung (z.B. beim Abspülen

der Wafer) sofort eine Abschwächung der Ätzrate erfolgt. Eine Übersicht der Silicium-Ätzraten für unterschiedliche Kristallorientierungen befindet sich in [30] und [31]. Auf eine ausführliche Beschreibung des Ätzvorgangs soll an dieser Stelle verzichtet werden, da dies in der Literatur beschrieben ist. Eine Übersicht bieten die Dissertationsschriften von Peter Kopka und Dirk Nüsse und die Habilitationsschrift von Martin Hoffmann [22] [30] [18].

Durch die unterschiedlichen Ätzratenverhältnisse der Silicium Kristallebenen können diverse Grundstrukturen erzeugt werden. Diese sind in Abbildung 3.4 für $\{100\}$ -Wafer und in Abbildung 3.5 für $\{110\}$ -Wafer dargestellt. Als Ätzstopp-Ebene wird vor allem die $\{111\}$ -Ebene verwendet, da die Ätzrate bis zu 400 mal geringer als bei den anderen Ebenen ist. Somit ergibt sich im Fall von $\{100\}$ -Siliciumwafern bei einer rechtwinkligen Öffnung der Maskierung eine gestreckte pyramidenförmige Grube (siehe Abbildung 3.4 a). Häufig wird von V-Gruben gesprochen, was sich jedoch auf Strukturen mit abgetrennten Endstücken bezieht. Ist die Öffnung quadratisch, so ergibt sich eine pyramidenförmige Grube (siehe Abbildung 3.4 b). Die $\{111\}$ -Ebene schneidet die Waferoberfläche in einem Winkel von $54,74^\circ$ (siehe Abbildung 3.2). Senkrechte Seitenwände können nur zeitgesteuert hergestellt werden und bieten folglich keine hohe Genauigkeit, wie sie zum Beispiel für die Fasermontage notwendig ist. Wird über den Zeitpunkt der Bildung von senkrechten Wänden hinaus geätzt, so bilden sich V-förmige Gruben in vertikaler Richtung (siehe Abbildung 3.4 d).

$\{110\}$ -Siliciumwafer lassen sich rautenförmig maskieren. In den Ecken mit spitzen Winkeln bilden sich schräge Ätzstopp-Ebenen aus ($\{111\}$) [18]. Diese schneiden die Waferoberfläche in einem Winkel von $35,26^\circ$ (siehe Abbildung 3.2). Wie bei $\{100\}$ -Wafern werden von der Grundstruktur abweichende Maskierungen durch starkes Unterätzen auf eine Rautenform zurückgeführt. Durch die begrenzenden $\{111\}$ -Ebenen können nicht beliebig große Aspektverhältnisse erreicht werden. Bei $\{100\}$ -Material begrenzt immer die kleinere Kantenlänge der rechteckförmigen Maskierung die zu erreichende Tiefe. Bei $\{110\}$ -Wafern muss lediglich eine Kantenlänge groß genug sein, um durch den ganzen Wafer ätzen zu können. Somit lassen sich sehr enge, dafür aber lange Kanäle ausbilden. Es konnten Aspektverhältnisse von bis zu 1:75 erreicht werden [18]. Die senkrechten Seitenwände sind wie die V-förmigen Flächen bei $\{100\}$ -Wafern ideal zur passiven Positionierung geeignet, da die Oberflächenrauigkeit im Nanometerbereich liegt und die Genauigkeit der Strukturen von der Lithographie und der Kristallorientierung abhängig ist. Es sind lediglich Ungenauigkeiten durch Unterätzung vorhanden. Die Ausbildung des Grubenbodens hängt von den Ätzparametern (Temperatur, KOH-Konzentration) ab. Realisierbar sind flache Böden mit relativ hoher Rauigkeit und V-förmige Abschlüsse. Zur Maskierung der Wafer wurde Siliciumnitrid oder SiO_2 eingesetzt. Siliciumnitrid (LP-CVD abgeschieden) hat eine vernachlässigbar kleine Ätzrate und kann somit sehr dünn verwendet werden ($\approx 100\text{ nm}$). Die relativ hohe Ätzrate von SiO_2 hat zur Folge, dass die Maskierung oft dicker als $1\ \mu\text{m}$ sein muss. Da unterätzte Bereiche abbrechen können, kann eine SiO_2 Maskierung zu Verunreinigungen führen. Zudem kann es bei einer inhomogenen Ätzrate zu Schichtdicke Schwankungen kommen, welche sich negativ auf eine robuste Bildverarbeitung auswirken können (siehe Kapitel 9).

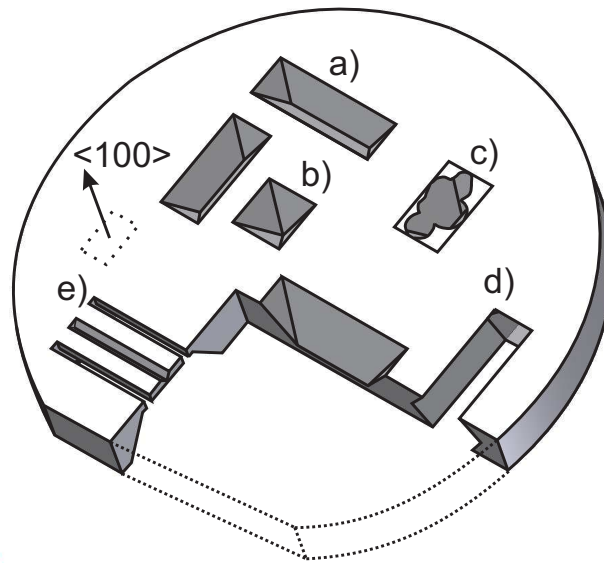


Abbildung 3.4: Grundstrukturen für in KOH geätzte $\{100\}$ -Siliciumwafer; a) V-Grube b) Pyramide c) starke Unterätzung, da Maskierung nicht rechtwinklig d) Ätzen vertikaler Seitenwände e) rückseitig ausgedünnte Struktur

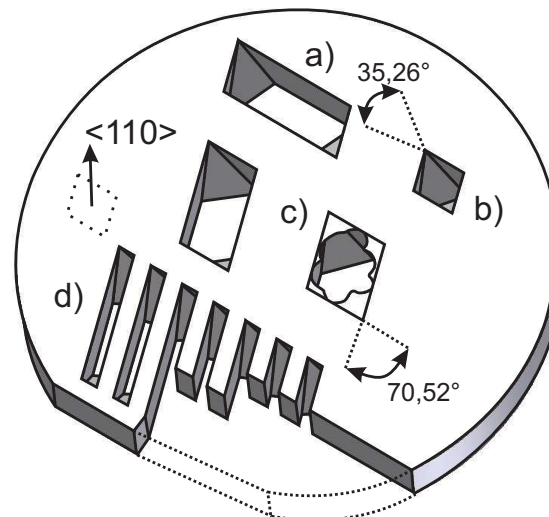


Abbildung 3.5: Grundstrukturen für in KOH geätzte $\{110\}$ -Siliciumwafer; a) Raute mit begrenzenden Ebenen b) kleine Raute c) starke Unterätzung, da keine rautenförmige Maskierung d) schmale Gräben

3.2.3 Eckenkompensation

Häufig werden komplexere Strukturen benötigt, als in den Abbildungen 3.4 und 3.5 angedeutet. Wie in Abbildung 3.4 c dargestellt, werden beliebige geometrische Anordnungen durch den Abtrag schnell ätzender, konvexer Ecken auf die Grundstrukturen zurückgeführt. Sollen konvexe Ecken vor dem Angriff der KOH-Lauge geschützt werden, so müssen Kompensationsstrukturen verwendet werden. Diese werden beim Ätzzvorgang statt der konvexen Ecken abgetragen. Die Kompensationsstrukturen müssen an die jeweiligen Ätzzratenverhältnisse angepasst werden, welche je nach Temperatur und Konzentration der KOH-Lösung variieren.

Richtung	Ätzzrate [$\mu\text{m}/\text{h}$]
$\langle 100 \rangle$	20
$\langle 110 \rangle$	25
$\langle 111 \rangle$	$< 0,2$
$\langle 771 \rangle$	21,65
$\langle 311 \rangle$	23,3

Tabelle 3.2: Ätzzraten der wichtigsten Silicium Richtungen für eine KOH-Konzentration von 20% und eine Ätzztemperatur von 55°C

Eckenkompensation in $\{100\}$ -Silicium

Zur Herstellung von Greifwerkzeugen mit $\{100\}$ -Silicium wurde eine in [22] S. 86 beschriebene Kompensationsstruktur verwendet (siehe Abbildung: 3.6). Die Abmessungen der

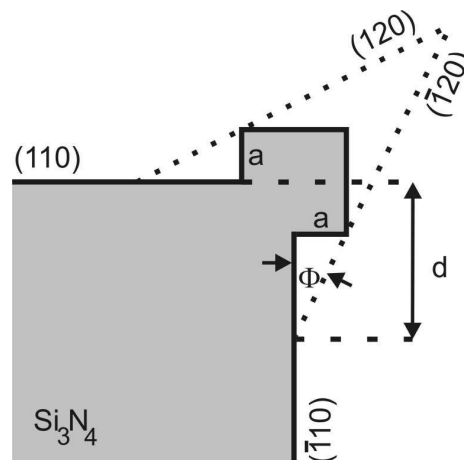


Abbildung 3.6: Struktur zur Kompensation konvexer Ecken für $\{100\}$ -Siliciumwafer [22] [32]

Struktur lassen sich wie folgt berechnen:

$$d = 5,7 + 3,72 \cdot D_{\text{ätz}} \quad (3.1)$$

$$a = d \cdot \frac{\tan \Phi}{1 + \tan \Phi} \quad (3.2)$$

$$\Phi = 26,25^\circ. \quad (3.3)$$

Bei der Berechnung wird lediglich die Ätztiefe $D_{\text{ätz}}$ benötigt, um die Kompensationsstruktur berechnen zu können.

Eckenkompensation in $\{110\}$ -Silicium

Zur Herstellung von $\{110\}$ -Siliciumgreifern wurde eine in [22] S. 90 beschriebene Kompensationsstruktur verwendet (siehe Abbildung: 3.7).

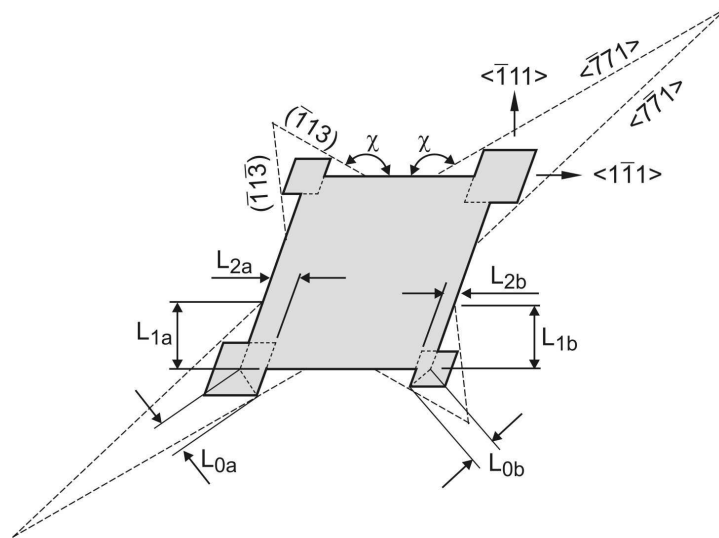


Abbildung 3.7: Struktur zur Kompensation konvexer Ecken für $\{110\}$ -Siliciumwafer [33] [22]

$$L_{0a} = R_{\langle \bar{7}71 \rangle} \cdot t_{\text{ätz}} \quad (3.4)$$

$$L_{0b} = R_{\langle 311 \rangle} \cdot t_{\text{ätz}} \quad (3.5)$$

$$L_{1a} = \frac{L_{0a}}{\sin \beta} \quad (3.6)$$

$$L_{1b} = \frac{L_{0b}}{\sin \beta} \quad (3.7)$$

$$L_{2a} = \frac{L_{1a} \cdot \tan \beta}{\tan \beta (1 - \cos \delta) + \sin \delta} \quad (3.8)$$

$$L_{2b} = \frac{L_{1b} \cdot \tan \beta}{\tan \beta (1 + \cos \delta) + \sin \delta} \quad (3.9)$$

Zur Berechnung der Struktur werden die Ätzraten der $\{771\}$ - und der $\{311\}$ -Ebene benötigt. Diese sind für eine Lösungskonzentration von 20% und einer Temperatur von

$T = 55^\circ\text{C}$ in Tabelle 3.2 angegeben.

Mit den vorgestellten Grundstrukturen und den möglichen Eckenkompensationsstrukturen [18] lassen sich viele für die Mikromechanik erforderlichen Geometrien realisieren. Im Vergleich zu dem im folgenden Abschnitt vorgestellten Trocken-Ätzverfahren können sehr hohe Genauigkeiten erreicht werden und die Herstellung ist einfach und kostengünstig, da es sich um einen Batch-Prozess handelt. Um die Vorteile der KOH-Technologie nutzen zu können kann ein höherer konstruktiver Aufwand erforderlich sein als bei einer trockenchemischen Strukturierung.

3.2.4 Deep Reactive Ion Etching (DRIE)

Um Silicium anisotrop trockenchemisch zu ätzen, wird häufig das Gas CF_4 oder SF_6 eingesetzt. Molekulares CF_4/SF_6 Gas ätzt kein Silicium und muss in Folge dessen mit Hilfe eines hochfrequenten Feldes in ein reaktives Plasma (reaktive Produkte sind F , CF_3^+ und CF_3) zerlegt werden. Fluor reagiert mit der höchsten Geschwindigkeit mit dem Siliciumsubstrat [18][34]. Die Wirkung der Reaktion des Plasmas mit der Oberfläche ist jedoch isotroper Art. Eine anisotrope Ätzcharakteristik wird durch die Zugabe von C_4F_8 erreicht. Durch das Abwechseln von isotroper Ätzung und Passivierung vertikaler Wände mittels entstehender Polymere, wird eine quasi anisotrope Ätzung erreicht. Dieser Prozess ist unter dem Begriff „Chopping“ Mode von Tsuji-Moto et al. 1986 eingeführt und von Rangelow weiterentwickelt worden [34][35].

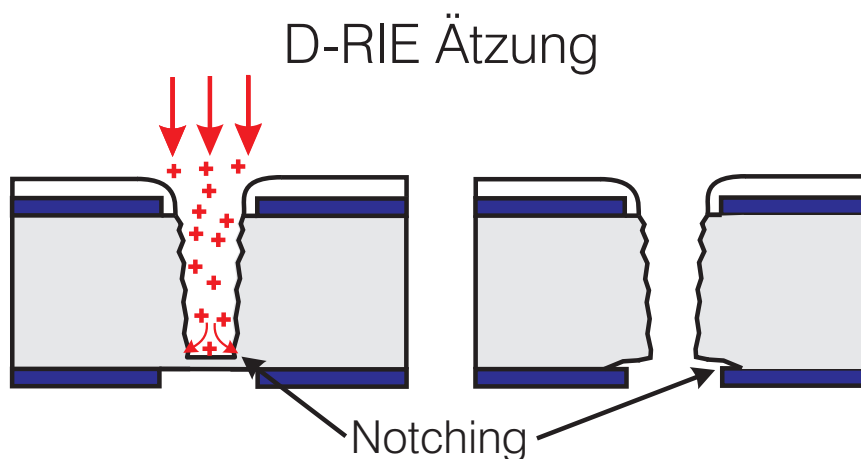


Abbildung 3.8: DRIE Ätzvorgang mit Notching Effekt

Vorteile gegenüber dem Ätzen mit KOH liegen darin, dass beliebige Maskierungsöffnungen möglich sind, da der Ätzvorgang weitestgehend unabhängig von den Kristallorientierungen ist. Der Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass durch den Wechsel zwischen isotropem Ätzen und Passivierung der Seitenwände, relativ raue oder zickzackförmige Seitenwände entstehen. Ein weiterer negativer Effekt kann entstehen, wenn eine dielektrische Schicht als Ätzstopp verwendet wird. Der so genannte Notching-Effekt führt dazu, dass die positiv geladenen Gasionen die dielektrische Schicht aufladen. Ätzt man weiter über

diesen Zeitpunkt hinaus, so werden die Ionen von der dielektrischen Schicht seitlich abgelenkt (siehe Abbildung 3.8). Dies führt zu einer Verbreiterung des Ätzbereichs in der Nähe des Dielektrikums. In Abschnitt 4.3 wird detailliert auf den angewandten Prozess eingegangen.

Kapitel 4

Silicium Führungsstrukturen

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, müssen Einmoden Fasern sehr präzise stoßgekoppelt werden, um Kopplungsverluste gering zu halten.

Bei der Montage von Einmoden Glasfasern sind hohe Genauigkeiten von weniger als $0,5\ \mu\text{m}$ einzuhalten. Diese Genauigkeit wird bei der passiven Justage durch das hineinpressen der Fasern in Führungsstrukturen (z.B. V-Gruben, Rauten oder U-Gruben) auf dem Chip erreicht. Die Führungsstrukturen mindern die Anforderungen an das Montagesystem, da Positioniergenauigkeiten ausgeglichen werden können. Die erfolgreiche Fasermontage ist von der korrekten Positionierung der Faser zum Chip in den drei Raumrichtungen und zwei Winkeln abhängig (da die Faser rotations-symmetrisch ist).

In dieser Arbeit werden vor allem aufgrund ihrer sehr guten Genauigkeit anisotrop geätzte V-Gruben und Rautenkanäle aus Silicium verwendet. Diese Technologien sind bereits aus der Literatur bekannt, jedoch wurde die Genauigkeit der Strukturen noch nicht umfassend und vorwiegend mit Standard Einmoden Fasern (SMF28-Fasern) untersucht. Durch die Verwendung von Fasern mit geringem Modenfelddurchmesser ergeben sich hohe Anforderungen an die Führungsstrukturen. Aus diesem Grund soll hier erarbeitet werden, wie die Führungsstrukturen optimal herzustellen sind und welche Genauigkeiten und Verluste zu erwarten sind.

Die Rauigkeit der Strukturen liegt unterhalb von $100\ \text{nm}$, so dass im Falle des optischen Faserschalters (siehe Kapitel 8.1) die Ungenauigkeit der V-Gruben als vernachlässigbar klein angesehen werden kann, da die Fasern an der Koppelstelle in der gleichen Grube platziert werden. Bei der Ankopplung eines Faserfeldes an eine integriert optische Komponente muss zusätzlich der Rasterabstand der Fasern zueinander den Anforderungen an die maximal zulässige radiale Abweichung der Fasern genügen (SSMF: $< 0,5\ \mu\text{m}$). Dies ist durch die lithographische Festlegung des Rasters gewährleistet. Der einzige Parameter, welcher nicht gut kontrolliert werden kann, ist die absolute Breite der Maskierungsöffnungen. Die Grubenbreite kann durch Schwankungen der lithographischen Parameter und aufgrund der Unterätzung der Maskierung beim Ätzen variieren [36].

Somit ist die absolute vertikale Lage des Faserkerns nicht genau einstellbar. Lediglich die Strukturen eines Wafers und vor allem eines begrenzten Bereichs auf einem Wafer bieten eine gute vertikale Positioniergenauigkeit.

In Abschnitt 6 werden die vorgestellten Führungsstrukturen zur Ankopplung integriert

optischer Komponenten an Glasfasern verwendet. Neben der in diesem Kapitel beschriebenen Koppeldämpfung durch Faser- und Chip-Toleranzen, kommen noch Verluste durch Modenfehlpassung und montagebedingte Aspekte hinzu.

4.1 Passive Kopplungstechnik mit V-Gruben

Eine Einführung in die Silicium und V-Gruben Technologie wurde bereits in Abschnitt 3 gegeben. In Abbildung 4.1 ist ein Foto einer gesägten und polierten V-Gruben-Stirnfläche, bestückt mit Glasfasern, dargestellt. Die hergestellten V-Gruben werden bezüglich ihrer Flankenrauigkeit und Variation der Öffnungsbreite untersucht. Die so selektierten V-Gruben werden für die Kopplung von Glasfasern an integriert optische Wellenleiter verwendet (Kapitel 6).

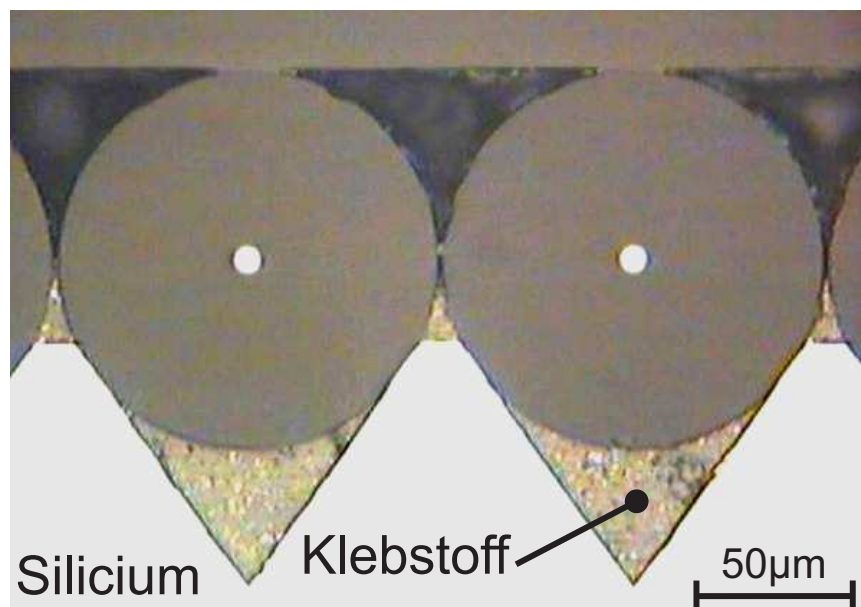


Abbildung 4.1: *Stirnfläche einer V-Gruben Faserführung*

4.1.1 Herstellung & Montage

Die Abfolge der Technologieschritte zur Herstellung von V-Gruben ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Ein beidseitig mit Si_3N_4 beschichteter Silicium-Wafer wird mit Photolack (ARU-4040, Dicke: $1,8 \mu m$) beschichtet. Als Maske wird eine Elektronenstrahl geschriebene Chrom-Maske verwendet. Die Belichtung erfolgt mit Hilfe einer UV-Kontaktbelichtung. Nach der Entwicklung des Fotolacks wird die Siliciumnitrid-Maskierung an den geöffneten Bereichen unter Einwirkung eines CHF_3 -Plasmas in einer RIE-Anlage geätzt. Der Fotolack wird entfernt und anschließend wird der Wafer bei einer Temperatur von $40^\circ C$ für 9 Stunden in KOH geätzt. Der Einsatz von Megashall unterstützt die Entfer-

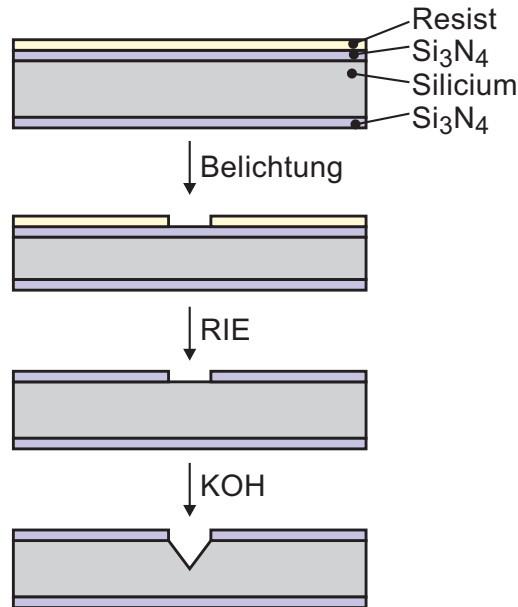


Abbildung 4.2: Technologiesteps zur Herstellung von V-Gruben in $\{100\}$ -Silicium

nung von Wasserstoffblasen beim Ätzzvorgang (siehe auch Abschnitt 3.2). Um V-Gruben mit geringen Rauigkeitswerten herzustellen, werden Wafer mit niedrigem Sauerstoffgehalt verwendet ($< 14 \text{ ppm}$, [37]). Bei der Lithographie muss auf eine parallele Ausrichtung zum Flat des Wafers geachtet werden, welches die Kristallorientierung kennzeichnet. Mit Hilfe geeigneter Teststrukturen kann die richtige Kristallausrichtung kontrolliert werden [30]. Die parallele Ausrichtung anhand des Wafer-Flats ist bei der V-Gruben-Herstellung in der Regel ausreichend. Eine Stufenbildung, welche eine Fehlorientierung indizieren würde, trat nicht auf. Die Breite der V-Gruben variiert von Wafer zu Wafer aufgrund von Belichtungs- und Ätzwchwankungen in geringem Maße. Auf einem Wafer sind sehr geringe Schwankungen der Breite zu erwarten.

Zur Kontrolle der Faserführungsgenauigkeit wurden PWG1-XP-Fasern der Firma Nufern [21] verwendet, da sie eine bessere Maßhaltigkeit als die UHNA4 Fasern bieten. Die Fasern wurden zur Optimierung der Montagegenauigkeit in lange V-Gruben eingelegt (Länge: 18 mm). Die Fasermontageanlage wurde in ersten Versuchen direkt verwendet. Das heißt die Fasern wurden mit Hilfe des $\{100\}$ -Silicium Greifers montiert (siehe Abschnitt 7.1.2). Mit Hilfe der Bildverarbeitung wurde die laterale Lage der Faser in der V-Grube überprüft (siehe hierzu 9.3.3). Zur Verbesserung der Genauigkeit wurden in einem weiteren Versuch die Fasern durch den Siliciumgreifer an einem Ende der V-Grube exakt vorpositioniert und anschließend mit Hilfe eines Glasdeckels in das andere Ende der V-Grube gepresst.

4.1.2 Führungsgenauigkeit

Zur Qualifizierung der V-Gruben wurden Messungen zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit und Grubenbreite durchgeführt.

Oberflächenrauigkeit

Die Rauigkeit der V-Grubenflanken wurde durch ein Weißlichtinterferometer NT1000 der Firma Veeco [38] bestimmt.

Abbildung 4.3 zeigt die Messung der Rauigkeit einer V-Grubenflanke. Die V-Grube

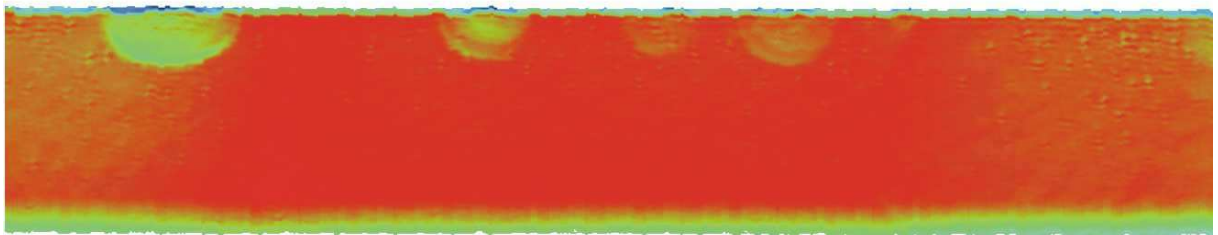


Abbildung 4.3: *Messung der Rauigkeit einer V-Grubenflanke mit Veeco Weißlichtinterferometer; deutlich sichtbar Fehler durch Unterätzung der Maskierung; Tiefe der unterätzten Bereiche 100 – 300 nm*

wurde unter Verwendung von Megaschall bei niedriger Temperatur ($T = 55^\circ\text{C}$) in KOH geätzt. Beim Ätzen kommt es zu einer Unterätzung der Siliciumnitrid Maskierung. Der Megaschall greift die dünne Maskierungsschicht an und bricht Teile ab. An diesen Stellen kommt es zu stärkeren Unterätzungen (Tiefe: 100 – 300 nm). In den glatten Bereichen wurde eine Rauigkeit von 126 nm (Maximum - Minimum) und 24 nm (Standardabweichung) gemessen. Ohne eine Verwendung von Megaschall und bei kürzerer Ätzzeit konnte die Rauigkeit zu 92 nm (Maximum - Minimum) und 15 nm (Standardabweichung) verringert werden [39]. Die Ätzzeit wurde verkürzt, indem Wannenstrukturen, die an die V-Gruben angrenzen, nicht tiefer als die V-Gruben geätzt wurden.

Öffnungsbreite

Zur Kontrolle der Öffnungsbreite der Gruben wurden Messungen mit Hilfe eines laser-gestützten Linienbreiten-Messgerätes durchgeführt. Die Messungen wurden nur für Gruben eines Wafers und einer Ätzdauer bestimmt. Die Siliciumnitrid Maskierung wurde vor den Messungen entfernt. Die Messungen ergaben eine maximale Variation von $0,85\ \mu\text{m}$, was einer vertikalen Fehlpositionierung von $0,6\ \mu\text{m}$ entspricht. Die Standardabweichung lag bei $0,17\ \mu\text{m}$. Dies entspricht einer theoretischen vertikalen Fehlpositionierung der Fasern von $0,12\ \mu\text{m}$. Die maximale Abweichung der Grubenbreite hat unter Verwendung der PWG1-XP-Faser eine Dämpfung von $0,27\ \text{dB}$ zur Folge.

Zusammenfassung Rauigkeit & Öffnungsbreite

Die Rauigkeit (Standardabweichung) der V-Gruben ist gering. Da die Glasfasern sich nicht abrupt verbiegen können und somit auf den höchsten Stellen der Grubenoberfläche zu liegen kommen, ist nur ein geringer Fehler durch die Rauigkeit zu erwarten. Die Variation der Grubenbreite ist größer, jedoch unterliegt auch sie lokalen Schwankungen, welche sich, wie im folgendem Abschnitt beschrieben, nicht vollständig auf die Faserpositionierung auswirken.

Genauigkeit Faserpositionierung

Bei der direkten Montage der Glasfasern in die V-Gruben wurden Abweichungen von 0,25 bis 0,6 μm pro Chip gemessen. Die größeren Abweichungen kamen bei etwa jeder zehnten Faser vor und sind auf den Federmechanismus des Greifers zurück zu führen. Durch zu tiefes Absetzen der Faser schiebt sich der Greifer nach vorne, so dass die Faser aus der V-Grube des Chips rutschen kann. Zur Vermeidung dieses Problems müsste der Greifer symmetrisch aufgebaut werden. Das heißt eine einseitige Einspannung müsste durch eine beidseitige ersetzt werden (siehe Kapitel 7).

Zur Verbesserung der Genauigkeit wurden die Fasern zusätzlich am Ende des Chips mit Hilfe eines Glasdeckels in die Gruben gepresst. Da die Fasern exakt vorpositioniert werden und dann sehr genau in die Gruben gepresst werden, treten keine Fehlpositionierungen größer als 0,4 μm für zwei stoßgekoppelte Chips auf. In Tabelle 4.1 sind die Messwerte für zwei stoßgekoppelte V-Grubenchips mit jeweils vier Fasern aufgetragen. Da nicht gegen einen integriert optischen Chip gemessen wurde und folglich keine absolute Referenz existiert, ist es notwendig alle Kombinationen der Abweichungen zwischen den Fasern zu vermessen.

Faser Nr. a gegen b	X-Abweichung [μm]	Y-Abweichung [μm]
1-2	0,3	0,2
1-3	0,4	0
1-4	0	0,25
2-3	0,4	0,2
2-4	0,25	0,3
3-4	0	0

Tabelle 4.1: Abweichung in X- und Y-Richtung zwischen jeweils zwei Fasern zweier V-Gruben-Arrays mit insgesamt je vier PWG1-XP-Fasern; der Kanal Faser 3 gegen Faser 4 (3-4) dient als Referenzkanal

Die größte gemessene radiale Abweichung liegt bei 0,45 μm für zwei Chips. Dies hat nach Tabelle 2.2 eine Verschlechterung der theoretischen Kopplungsdämpfung von 0,15 dB zur

Folge. Die Messungen ergaben einen ähnlich niedrigen Wert ($0,2 \text{ dB}$). Eine Standard Einmoden Faser würde zum Vergleich nur eine Verschlechterung der Dämpfung von $0,033 \text{ dB}$ bei gleichem radialen Versatz verursachen.

4.2 Passive Kopplungstechnik mit Rautenstrukturen

Rautenförmige Kanäle aus $\{100\}$ -Silicium können alternativ zu V-förmigen Führungsstrukturen eingesetzt werden. In Abbildung 4.4 ist eine Glasfaser, welche in einem rautenförmigen Kanal verklebt ist, dargestellt. Der montierte Chip ist genauso handhabbar wie ein V-Grubenarray, es ergeben sich jedoch Unterschiede bei der Fasermontage und Genauigkeit der Faserführung.

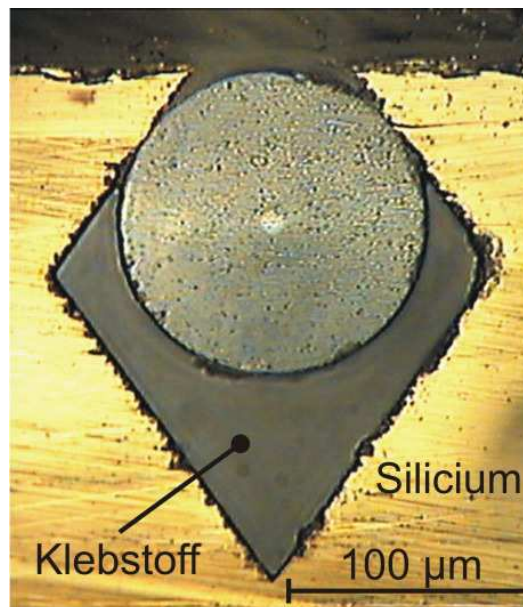


Abbildung 4.4: Rautenförmige Faserführung aus $\langle 100 \rangle$ -Silicium

4.2.1 Herstellung & Montage

Das Ausgangsmaterial zur Herstellung von Rauten entspricht dem für V-Gruben: $\{100\}$ -Silicium. In Abbildung 4.5 ist die Abfolge der Prozessschritte dargestellt. Der mit Si_3N_4 beidseitig beschichtete Wafer wird belackt und mit Hilfe rechteckiger Maskierungsöffnungen belichtet. Nach Öffnung der Si_3N_4 -Maskierung durch einen RIE Prozess, werden schmale Kanäle mit Hilfe einer Wafersäge eingebracht. Die Sägetiefe beträgt $190 \mu\text{m}$. Alternativ kann diese Schädigung der $\{111\}$ -Ebenen auch mit Hilfe des DRIE Verfahrens erfolgen, um eine Massenproduktion zu ermöglichen. Nach kurzer Ätzeit mit KOH (bei 60°C , $1,5 \text{ h}$) haben sich rautenförmige Kanäle gebildet.

Zur Montage von Glasfasern in die Rautenkanäle werden diese manuell einzeln oder als

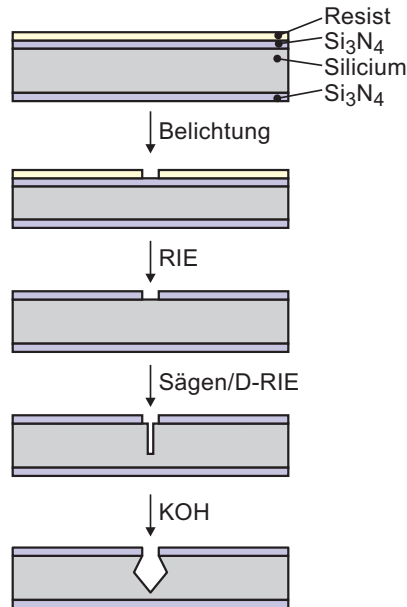


Abbildung 4.5: Technologiesteps zur Herstellung von Rautenstrukturen in $\{100\}$ -Silicium

Faserbändchen in die Kanäle geschoben. Damit die Fasern richtig ausgerichtet werden, müssen sie an die oberen Flanken der Raute gedrückt werden. Um ein besseres Resultat zu erzielen, wird ein kombinierter Prozess angewendet. Zunächst werden die Fasern durch die oberen Schlitze der Rauten, mit Hilfe eines Vakuums, angesaugt. Dann werden die Fasern zusätzlich unter einem Winkel von 5° vorgespannt (siehe Abbildung 4.6). Somit werden die Fasern gleichzeitig in die Gruben gedrückt und gezogen. Der UV-härtende Klebstoff wird schließlich am Ende des Chips aufgebracht. Durch kapillare Kräfte zieht er sich in die Kanäle. Die Aushärtung des Klebstoffs erfolgt mit Hilfe von UV-Licht durch die obere Öffnung der Raute. Die Vakuuman-saugung ist zu einem großen Teil lichtdurchlässig konzipiert, so dass alle Bereiche des Chips bestrahlt werden können. Ein Nachteil der

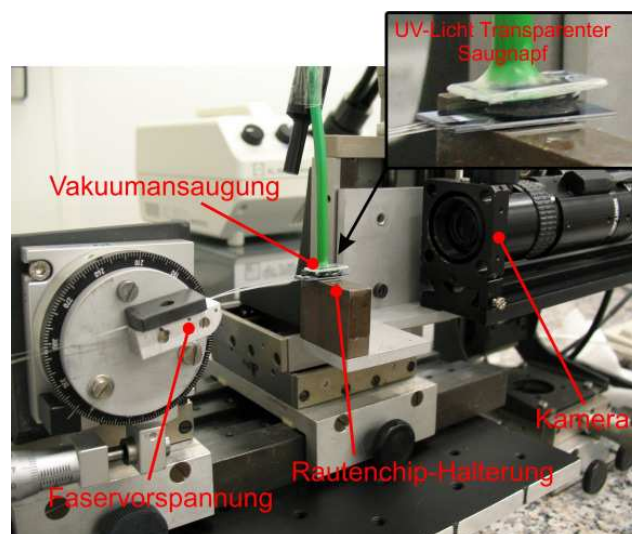


Abbildung 4.6: Foto des Fasermontage-Aufbaus zur Montage von Rauten-Chips

Rauten liegt darin, dass der eingebrachte Klebstoff die Fasern durch den Schrumpf beim Aushärten von den Führungen wegzieht. Aus diesem Grund müssen Klebstoffe mit geringem Schrumpf verwendet werden. Verwendet wurde der Klebstoff Vitralit 1505 der Firma Panacol-Elosol. Dieser Klebstoff hat einen Schrumpf beim Aushärten von 1,5 %. Die Viskosität liegt bei $350 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Diese ist gerade noch niedrig genug, damit der Klebstoff durch die Kanäle laufen kann. Klebstoffe mit niedrigerer Viskosität sind kommerziell erhältlich, jedoch weisen sie einen höheren Schrumpffaktor auf. Der Klebstoff Dymax OP-4-20632 hat nur einen Schrumpf von 0,2 %, konnte jedoch nicht verwendet werden, da die Viskosität von $500 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ zu hoch ist.

4.2.2 Führungsgenauigkeit

Die Rauten wurden zunächst ebenfalls wie die V-Gruben auf Ihre Flankenrauigkeit und Maskierungsöffnungsbreite hin überprüft. Die Oberflächenrauigkeit (Max-Min) lag bei $36,7 \text{ nm}$. Die Standardabweichung betrug $6,4 \text{ nm}$. Die geringere Rauigkeit im Vergleich zu den V-Gruben Chips könnte von der deutlich geringeren Ätzzeit und der damit verbundenen geringeren Unterätzung herrühren. Messungen mit dem Linienbreitenmessgerät ergaben ähnliche Werte wie bereits in [18] veröffentlicht. Die Öffnungsbreite schwankt um $0,39 \mu\text{m}$ bei einer Standardabweichung von $0,11 \mu\text{m}$. Diese liegen, ebenso wie die Rauigkeitswerte, deutlich niedriger als die der V-Grubenchips.

Die hergestellten Rautenchips wurden mit Nufern PWG1-XP-Fasern bestückt wie in 4.2.1 beschrieben. Die erreichbare Genauigkeit liegt unter $0,6 \mu\text{m}$ für zwei voreinander positionierte Chips. Das heißt bezogen auf einen Chip sind Abweichungen von $0,3 \mu\text{m}$ zu erwarten. Damit ist die radiale Abweichung um $0,2 \mu\text{m}$ höher für zwei gekoppelte Chips im Vergleich zu den sehr präzise bestückten V-Gruben Chips. Die bessere Genauigkeit der Rauten-Chips in Bezug auf die Rauigkeit und Öffnungsbreite wird vermutlich durch den Klebstoff-Schrumpf und eine ungenauere Faser montage gemindert. Da der Herstellungsaufwand für V-Gruben Chips geringer ist und der Fügevorgang besser überwacht werden kann wurden die V-Grubenchips den Rauten-Chips vorgezogen.

4.3 Mikro-Durchgangslöcher in Silicium Wafern

Die Herstellung von Löchern mit Durchmessern im Mikrometerbereich und großen Aspektverhältnissen ist heute in vielen Bereichen die Voraussetzung für den technischen Fortschritt. So werden feinste Löcher als Düsen in Zerstäubern und Druckköpfen eingesetzt [40]. Im Bereich der Halbleitertechnologie werden Löcher eingesetzt, um elektrische Verbindungen zwischen der Wafer Vorder- und Rückseite herzustellen (Vias). So können auch mehrere Chips zu einem dreidimensionalen Verbund gestapelt werden [41]. Im Bereich der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik können Mikrolöcher zur passiven Kopplung von Glasfasern an integriert optische Komponenten wie Laserdioden eingesetzt werden [42, 43] oder auch zur Herstellung passiver Steckkomponenten, um eine lösbare Faser-Faser Verbindung herzustellen. Zum heutigen Zeitpunkt werden in der industriellen

Fertigung und in der Netzwerktechnik Faser-Faser Verbindungen einzeln oder mehrfach mit V-Gruben realisiert [44]. In vielen Anwendungen werden aber zweidimensionale Faserführungsstrukturen benötigt, um kleine Bauteilgrößen und geringe Montagekosten zu ermöglichen. Für die Kopplung von Standard Einmodenfasern (SSMF) oder die im Bezug auf die Kopplung anspruchsvolleren Fasern mit hohem Indexkontrast und kleinen Modenfelddurchmessern sind hoch präzise Führungsstrukturen erforderlich. Polymethylmetacrylat (PMMA) basierte Strukturen werden häufig für Multimode Anwendungen eingesetzt und bieten keine ausreichende Justagegenauigkeit für Einmodenanwendungen (Genauigkeit: $2 - 5 \mu\text{m}$) [43] [45] [46].

Das derzeit geeignetste Material scheint Silicium zu sein. Die mechanischen und thermischen Eigenschaften, sowie die Möglichkeit der präzisen Strukturierung bieten deutliche Vorteile gegenüber polymerbasierten Strukturen. Aus Sicht der Genauigkeit wäre eine Silicium Strukturierung mittels KOH unter Ausnutzung der $\{111\}$ -Ätzstoppebenen des Silicium-Kristalls ideal aufgrund der Genauigkeit im Sub-Mikrometerbereich. Wie jedoch im Abschnitt 3.2.2 beschrieben, verhindern die $\{111\}$ -Ebenen aber auch die Herstellung kleiner, durchgehender Löcher. Die sich schneidenden $\{111\}$ -Ebenen führen zu einem verfrühten Ätzstopp. Die erreichbare Ätztiefe berechnet sich für $\{100\}$ - und $\{110\}$ -Wafer wie folgt:

$$T_{\{100\}} = \frac{1}{2}B \tan(54,74^\circ) \quad (4.1)$$

$$T_{\{110\}} = \frac{1}{2}B \tan(35,26^\circ) \quad (4.2)$$

$$(4.3)$$

Die Länge B bei $\{100\}$ -Siliciumwafern gilt für die kleinste Breite der V-Grube und bei $\{110\}$ -Wafern für die Diagonale zwischen den Spitzen, sich gegenüberliegenden Ecken der Rautenstruktur. Für einen Wafer der Dicke $500 \mu\text{m}$ wird folglich eine Maskierungsöffnung von mindestens $707 \mu\text{m}$ für $\{100\}$ -Material bzw. $1414 \mu\text{m}$ für $\{110\}$ Material benötigt. Werden die Wafer beidseitig geätzt, so ergibt sich folglich die Hälfte der berechneten Breiten.

Bislang wurden drei Verfahren in der Literatur behandelt, welche dieses Problem der minimalen Strukturgröße umgehen. Ein Ansatz ist der vollständige Verzicht auf nasschemische Strukturierung. Bei der Firma Protron Mikrotechnik GmbH wurden Haltestrukturen entwickelt, welche durch Deep Reactive Ion Etching (DRIE) hergestellt wurden (siehe Abbildung 4.7 b). Diese kompensieren den Nachteil der Ungenauigkeit des Ätzverfahrens mit Hilfe von selbst zentrierenden Klammerstrukturen [47][48]. Das Verfahren ist relativ aufwändig, da es mehrere DRIE Ätzungen erfordert. Eine Genauigkeit von besser als $0,5 \mu\text{m}$ wird mit dieser Technologie erreicht.

Eine weitere naheliegende Lösung des Problems wurde von Hoppe patentiert [43][49]. Hierbei werden schmale Gräben durch $\{110\}$ -Wafer geätzt. Legt man zwei dieser Strukturen um 90° gedreht übereinander, so ergeben sich rechteckförmige Löcher (siehe Abbildung 4.7 a). Der Vorteil liegt darin, dass Gräben mit minimalen Breiten von $4 \mu\text{m}$ theoretisch herstellbar sind. Für die Fasertechnik ist jedoch vor allem eine sehr hohe Genauigkeit notwendig. Die Darlegungen in [43] lassen darauf schließen, dass durch eine Verbiegung der Strukturen und durch ungenaue Montage der Wafer nicht die geforderte Genauigkeit eingehalten werden kann.

Weitere Möglichkeiten bestehen darin den Siliciumkristall lokal zu schädigen, um dann

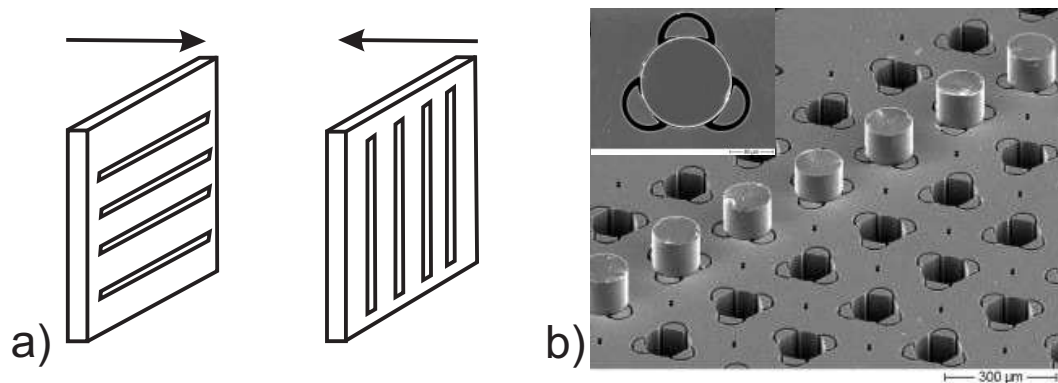


Abbildung 4.7: *Zweidimensionale Faser-Führung mit Hilfe von 90° zueinander orientierten Schlitzen aus {110}-Silicium (a); Faserführung durch ICP geätzte Klammerstrukturen der Firma Protron GmbH [47, 48] (b)*

mit einer KOH-Lösung durch den Si-Wafer ätzen zu können.

Eine mechanische Vorschädigung bzw. ein Durchbrechen der limitierenden {111}-Ebenen wird üblicherweise mit DRIE Ätzungen oder Laser Bohrungen erreicht [18] [50]. Ein weiteres Verfahren ist die Schädigung der Kristallstruktur durch lokales, kurzzeitiges Aufschmelzen mit Hilfe elektrischer Durchschläge [18][51].

Auf einem Wafer müssen oft einige zehntausend Löcher hergestellt werden, was nur mit so genannten Batch-Verfahren kosteneffizient möglich ist. Das Einsatzgebiet für serielle Verfahren, wie die Laser-Ablation und das Hochspannungsverfahren liegt im Prototypenbau, Kleinserien oder Sonderformen. Nur das Hochspannungsverfahren bietet jedoch die Möglichkeit schräg zur Waferoberfläche verlaufende Kanäle herzustellen (siehe Abschnitt 4.3.3) [18][51].

Durch das Durchbrechen der begrenzenden Kristallebenen kann in jedem Fall die Bauteilgröße sowie der konstruktive Aufwand im Vergleich zum reinen anisotropen Ätzen der Komponenten reduziert werden. Eine Anwendung neben der Fasertechnik ist das rückseitige Öffnen von Silicium V-Gruben, so dass Vakuumkanäle für die Ansaugung von Glasfasern realisiert werden können [52]. Bisher ist nur das Tiefen-Trockenätzverfahren (DRIE) geeignet, große Stückzahlen herzustellen. Das DRIE-Verfahren ist jedoch in Relation zum nasschemischen Ätzen sehr teuer, da die Prozessparameter für jedes Design erneut abgestimmt werden müssen. Hinzu kommt, dass jeweils nur ein Wafer bearbeitet werden kann. Aus diesem Grund eignet sich dieses Verfahren vorwiegend für große Stückzahlen und einer großen Anzahl von Chips pro Wafer.

In den folgenden Abschnitten wird die Schädigung der Silicium-Kristallstruktur mit Hilfe der Laser-Ablation, DRIE Ätzung und elektrischen Hochspannungsdurchschlägen untersucht.

4.3.1 Laserablation

In Kooperation mit dem Laser-Zentrum Hannover [53] und der Fachhochschule Münster [54] wurden Versuche zum Laserbohren durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es,

herauszufinden, ob die verwendete Nitridmaskierung (LPCVD, 100 nm Dicke) der thermischen Belastung standhält und eine Prozesszeit pro Bohrung im Sekundenbereich erreicht wird, damit der Vorgang wirtschaftlich eingesetzt werden kann.

Hierzu wurde ein 400 μm dicker Wafer beidseitig mit Siliciumnitrid beschichtet (LPCVD, Dicke: 100 nm) und im Bereich der Bohrung die Maskierung 130 μm im Durchmesser geöffnet. Ohne Modulation des Lasers treten hohe thermische Spannungen auf, welche zu Rissen und einer starken Oberflächenbeschädigung führen (siehe Abbildung 4.8). In der Folge wurden Laserquellen mit Wellenlängen im UV- bis Rotlichtbereich eingesetzt (350 bzw. 600 nm). Am Laserzentrum der Fachhochschule Münster wurde ein Pikosekundenlaser verwendet, welcher jedoch die Nitridbeschichtung weiträumig um die Bohrung ablöste (siehe Abbildung 4.8). Die Verwendung eines Femtosekunden-Lasers des Laserzentrums Hannover zeigte, dass dieser Effekt vermindert werden kann, was jedoch zu Lasten der Prozesszeit geht. So muss bei der Bohrung mit einem Femtosekundenlaser mit Zeiten von bis zu einer Stunde pro Bohrung gerechnet werden, um zu verhindern, dass die beim Abtrag des Siliciums entstehende Wärme die Nitridmaskierung nicht beschädigt. Durch eine Verkürzung der Pulse kann jedoch nicht die Anlagerung von Silicium-Abtrag auf der Oberfläche verhindert werden. Mit den Versuchen konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 60 μm ergaben sich, aufgrund starker Beschädigung der Nitridmaskierung nach dem KOH-Ätzen, Löcher mit einem Durchmesser von etwa 200 μm . Aus diesem Grund scheinen wasserstrahlgeführte Laser potentiell besser geeignet zu sein, da hier die entstehende Wärme abgeleitet und das abgetragene Silicium durch den Wasserstrahl entfernt werden können [55] [56]. Ein Wasserstrahl geführter Laser stand jedoch nicht zur Verfügung.

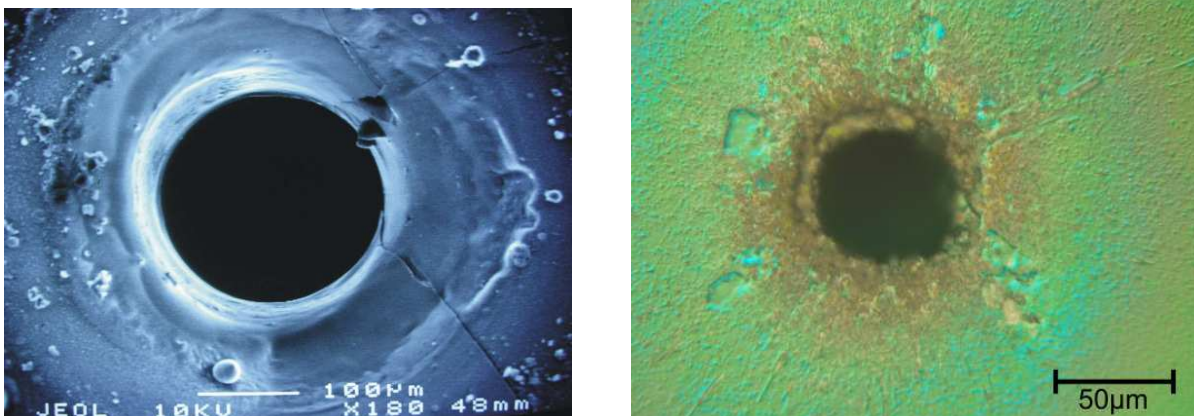


Abbildung 4.8: Links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Laserbohrung in Silicium; Deutlich sichtbar sind Anlagerungen von abgetragenem Silicium um die Bohrung herum und Risse aufgrund zu hoher Wärmeentwicklung durch zu lange Pulszeiten; Rechts: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Laserbohrung in Silicium mit Siliciumnitrid Beschichtung; Deutlich sichtbar sind Anlagerungen von abgetragenem Silicium um die Bohrung herum und Schädigungen der Nitridoberfläche. Verwendet wurden hier Pulse mit Pikosekundenlänge.

4.3.2 DRIE-Ätzung

In Abschnitt 3.2.4 wurde kurz auf den DRIE-Prozess eingegangen. In Kooperation mit dem Institut für Mikrostrukturtechnologie und Analytik der Universität Kassel [57] wurden durchgehende Mikrolöcher in Silicium hergestellt. Zur Anwendung kam ein kombinierter Prozess bestehend aus DRIE Ätzung und anschließender KOH-Ätzung zur Beseitigung von schrägen und rauen Seitenprofilen. Das Ziel der Versuche liegt darin, zu prüfen, ob mit Hilfe der KOH-Ätzung Ungenauigkeiten des DRIE Prozesses ausgeglichen werden können und ob der Prozess geeignet ist zur Herstellung von zweidimensionalen Feldern für Faserführungen.

In Abbildung 4.9 ist der Prozess schematisch dargestellt. Ein $400\ \mu\text{m}$ dicker $\{110\}$ -Silicium

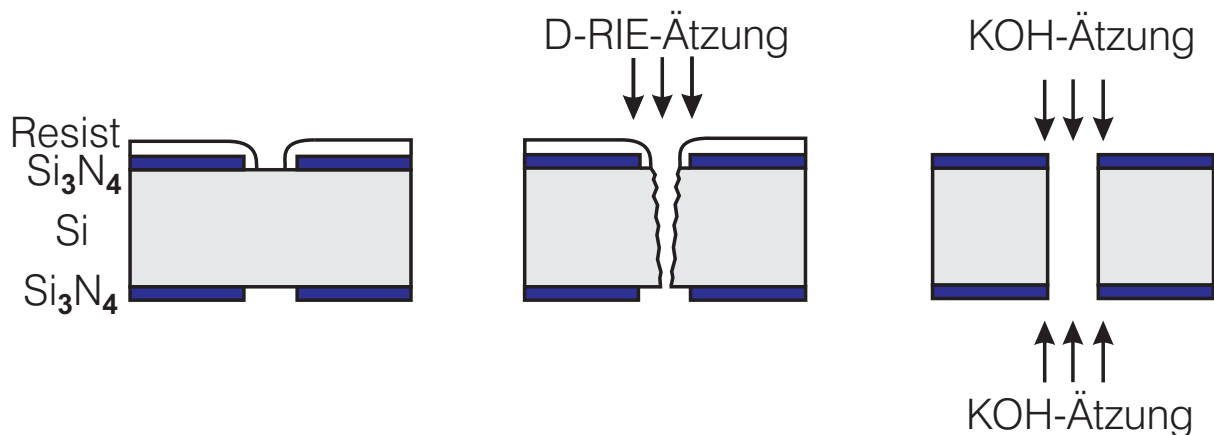


Abbildung 4.9: *Schema des kombinierten DRIE- und KOH-Ätzvorgangs*

Wafer wurde mit Siliciumnitrid (LPCVD, Dicke: $100\ \text{nm}$) beidseitig beschichtet. Die Nitrid Maskierung wird zunächst für den KOH Ätzschritt mit dem RIE Verfahren geöffnet. Dann wird zur Maskierung der Fotolack AZ-1518 (Dicke: $2\ \mu\text{m}$) aufgebracht, da Siliciumnitrid von der fluor-basierten Chemie des DRIE Prozesses stark angegriffen wird (Ätzratenverhältnis $\text{Si}:\text{Si}_3\text{N}_4 = 1:1$). Der Fotolack wird ebenfalls strukturiert, jedoch nicht mit rautenförmigen Öffnungen, sondern mit Kreisen geringeren Durchmessers ($80\ \mu\text{m}$). Somit überlappt der Fotolack die rautenförmigen Bereiche.

Als reaktives Gas wurde SF_6 verwendet. Der SF_6 Gasfluss, der Prozessdruck und die Bias-Spannung wurden so angepasst, dass die Selektivität gegenüber dem Fotolack eine Ätzung durch den gesamten Wafer erlauben. Mit einer SF_6 Flussrate von $150\ \text{sccm}$, einem Prozessdruck von $50\ \text{mTorr}$ und einer Bias-Spannung von $30\ \text{V}$ wurde eine ausreichend große Selektivität gegenüber dem Fotolack erreicht ($> 200 : 1$). Die Selektivität zwischen Silicium und Fotolack wird kaum durch die SF_6 Flussrate beeinflusst. Der Prozessdruck sollte jedoch möglichst hoch und die Bias-Spannung niedrig eingestellt werden. Die Ätzrate des Gesamtprozesses betrug $2,3\ \mu\text{m}/\text{min}$.

Die hergestellten Durchgangslöcher haben relativ schräge und raue Seitenwände (siehe Abbildung 4.10). Nach einer 90 minütigen KOH-Ätzung bei 55°C entstanden rautenförmige Kanäle mit glatten, senkrechten Seitenwänden. Unebenheiten und starke Trichterbildungen können durch die Nachbehandlung ausgeglichen werden. Die hergestellten rautenförmigen Durchgangslöcher haben eine Diagonale von $208\ \mu\text{m}$ und $147\ \mu\text{m}$. Durch

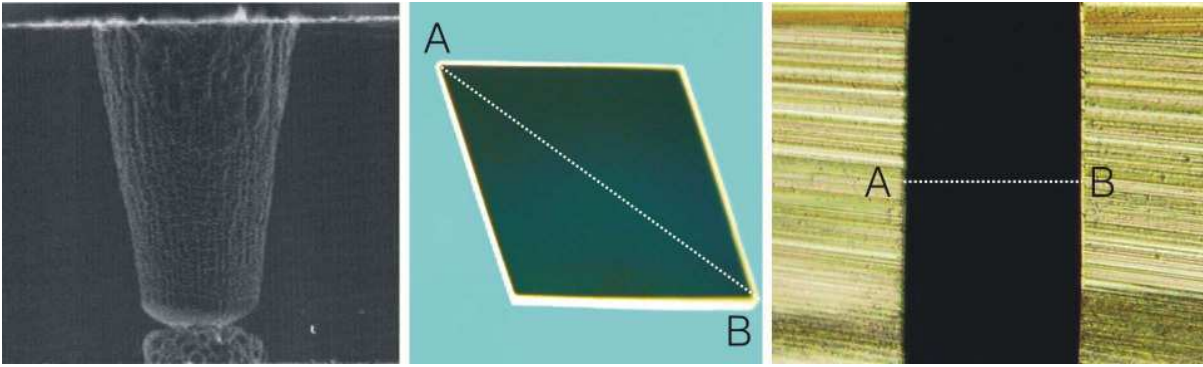


Abbildung 4.10: *Links: REM Aufnahme nach ICP-Ätzung; Mitte: geätzte Raute nach KOH-Ätzung mit leichter Unterätzung durch Notching; Rechts: Querschnitt durch geätzte Raute*

den Notching-Effekt wird eine exakte KOH-Ätzung mit Beschränkung auf die Nitrid-Maskierung verhindert (siehe Abschnitt 3.2.4). Deutlich sichtbar sind die Unterätzungen in Abbildung 4.10. Folglich wäre es sinnvoll nicht vollständig mit dem DRIE-Verfahren durch den Wafer zu ätzen und den letzten Abschnitt mit Hilfe der KOH zu durchätzen. Mit Hilfe des DRIE Verfahrens können laut [41] Durchmesser bis zu $10\ \mu\text{m}$ von zwei Seiten durch Silicium Wafer geätzt werden. Mit Hilfe des kombinierten DRIE und KOH Ätzprozesses könnten folglich auch Lochdurchmesser bis in den Bereich von $10\ \mu\text{m}$ hergestellt werden.

4.3.3 Hochspannungsdurchschläge

Hochspannungsdurchschläge und das anschließende Ätzen mit KOH sind derzeit das einzige Mittel diagonale Kanäle in Silicium herzustellen. Mit Hilfe des Verfahrens können die in Abbildung 4.11 dargestellten Geometrien realisiert werden. In [18][51] wurden erste Ergebnisse mit Hochspannungsversuchen vorgestellt. Mit Hilfe des Versuchsaufbaus, beschrieben in Abbildung 4.12, wurden in ersten Versuchen sehr spitze Wolfram-Nadeln (Radius Nadelspitze: $1\ \mu\text{m}$) in fertig geätzte Rauten und Pyramiden positioniert (siehe Abbildung 4.13 a). Die Gruben befinden sich gegenüber auf der Wafer Vorder- und Rückseite. Durch Anlegen eines Hochspannungsimpulses und dem daraus resultierenden Lawinen-Durchschlag erwärmt sich das Silicium lokal sehr stark. Durch die sehr gute thermische Leitfähigkeit und den nur sehr kurzen Spannungsimpuls kühlt das Silicium abrupt wieder ab. Die perfekte Gitterstruktur des Siliciums wird dauerhaft geschädigt. Der Pfad des elektrischen Durchschlags folgt den $\{111\}$ -Ebenen des Silicium Kristalls. Vermutlich aufgrund von Störstellen im Gitter ist der Pfad nicht immer der kürzeste Weg zwischen Quelle und Senke [18].

In Abbildung 4.14 sind Spannungs- und Stromverläufe für verschiedene Scheitelwerte U_0 der Spannungsimpulse aufgetragen. Zur Erzeugung der Hochspannungsimpulse wird ein Kompakt-Netzstörsimulator verwendet. Die eingesetzte genormte Blitzstoßspannung hat eine Stirnzeit von $T_s = 1,2\ \mu\text{s}$ und eine Rückenhalbwertszeit von $T_R = 50\ \mu\text{s}$. Ein erfolgreicher Durchschlag ist in 4.14 bei einer Scheitelspannung $U_0 = 700\ \text{V}$ dargestellt. Der Span-

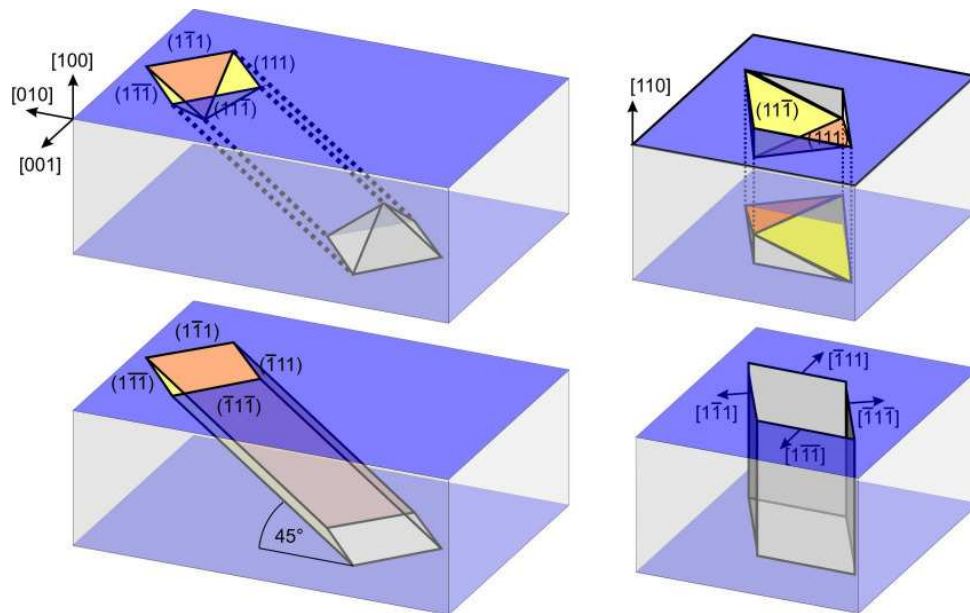


Abbildung 4.11: Obere Reihe zeigt mögliche Geometrien ohne Schädigung des Silicium Kristalls für $\langle 100 \rangle$ und $\langle 110 \rangle$ Silicium. In der unteren Reihe sind die durchätzten Kanäle bei einer Kristallschädigung skizziert (aus [51])

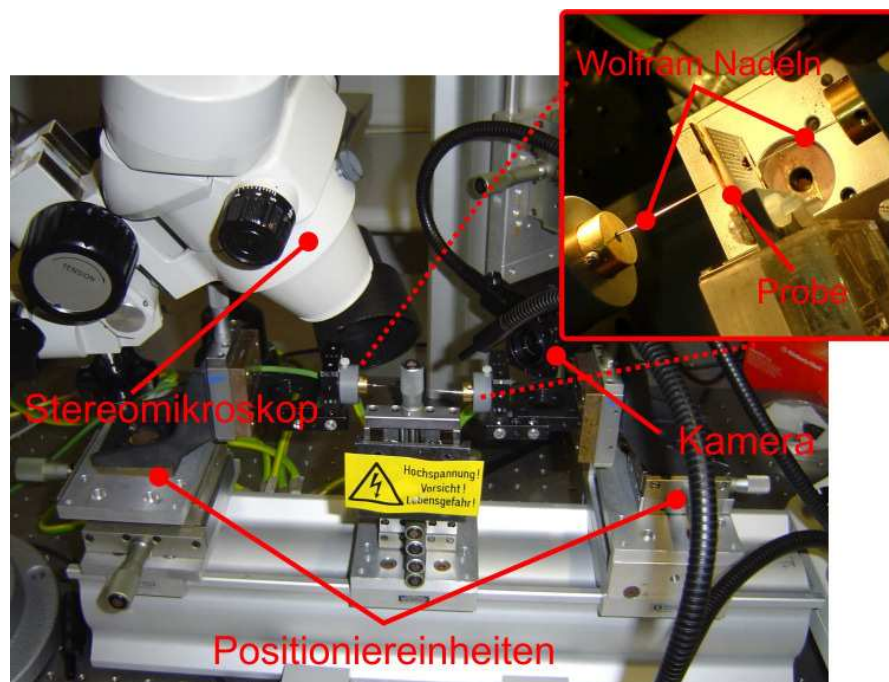


Abbildung 4.12: Versuchsaufbau für Hochspannungs-Durchschlagsversuche

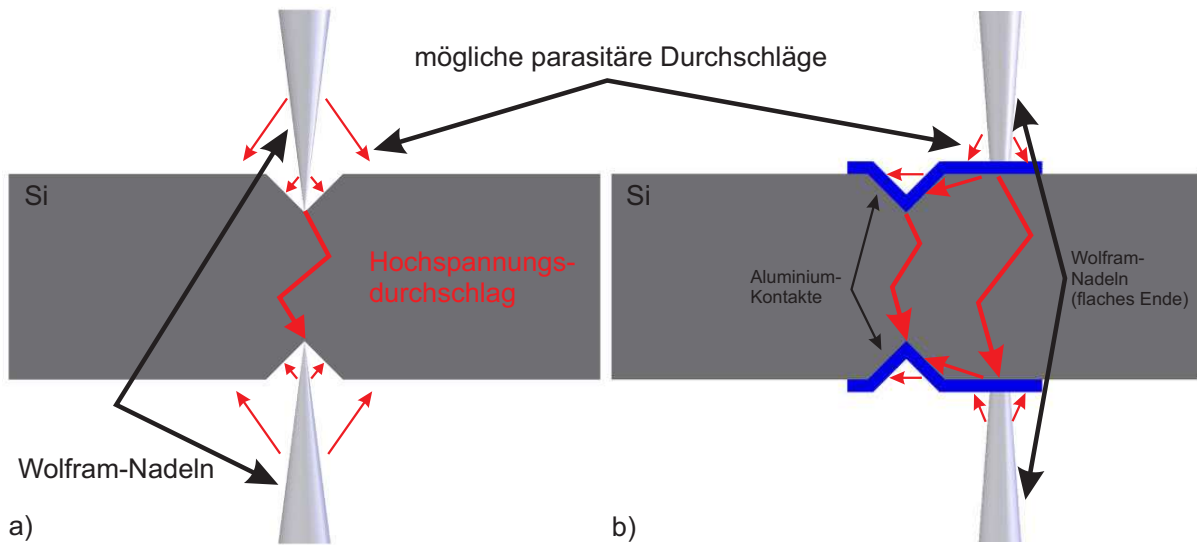


Abbildung 4.13: Skizze der möglichen Hochspannungs-Durchschlagswege; einfache V-Grube mit direktem Nadelkontakt(a), einfache V-Grube mit Nadel positioniert auf Kontaktfläche aus Aluminium mit Gold Beschichtung(b) [58]

nungsverlauf zeigt deutlich den charakteristischen Spannungsabfall nach der Zündung des Durchschlags. Der Vorteil bei der Verwendung der Wolfram-Nadeln liegt darin, dass durch den Spitzeneffekt eine lokale Feldüberhöhung entsteht. Der Durchschlagspfad beginnt und endet folglich mit großer Wahrscheinlichkeit an den Nadelspitzen und die Durchschlagsspannung ist deutlich geringer als ohne Spitze. Die Nadeln müssen jedoch sehr exakt positioniert werden, was sehr zeitaufwändig sein kann. Zudem verschleifen die Nadelspitzen sehr schnell. Darüber hinaus können parasitäre Durchschläge zu benachbarten Siliciumebenen auftreten (siehe Abbildung 4.13), welche die Kanalbreite vergrößern können.

Verwendung von Leiterbahnen und großen Kontaktmetallisierungen

Um das Positionieren der Nadeln zu umgehen, wurden Leiterbahnen aus $2\ \mu\text{m}$ dickem Aluminium mit einer Schutzschicht aus Gold verwendet. Werden alle Gruben parallel mit Leiterbahnen versehen, so sollte bei einer Grube der Durchschlag zuerst erfolgen (siehe Abbildung 4.15). Durch Verglühen der jeweiligen Leiterbahn könnte die Verbindung unterbrochen werden und ein erneuter Durchschlag könnte an einer weiteren Stelle erfolgen. Somit wäre nur eine großflächige Kontaktierung der Leiterbahnen notwendig. Hierfür wurde zunächst untersucht, ob durch eine Verjüngung der Leiterbahn eine Unterbrechung des elektrischen Stromes herbei geführt werden kann. Der Spannungsimpuls sorgt für eine Erwärmung der Leiterbahn besonders an der verjüngten Stelle. Die Leiterbahn verbrennt

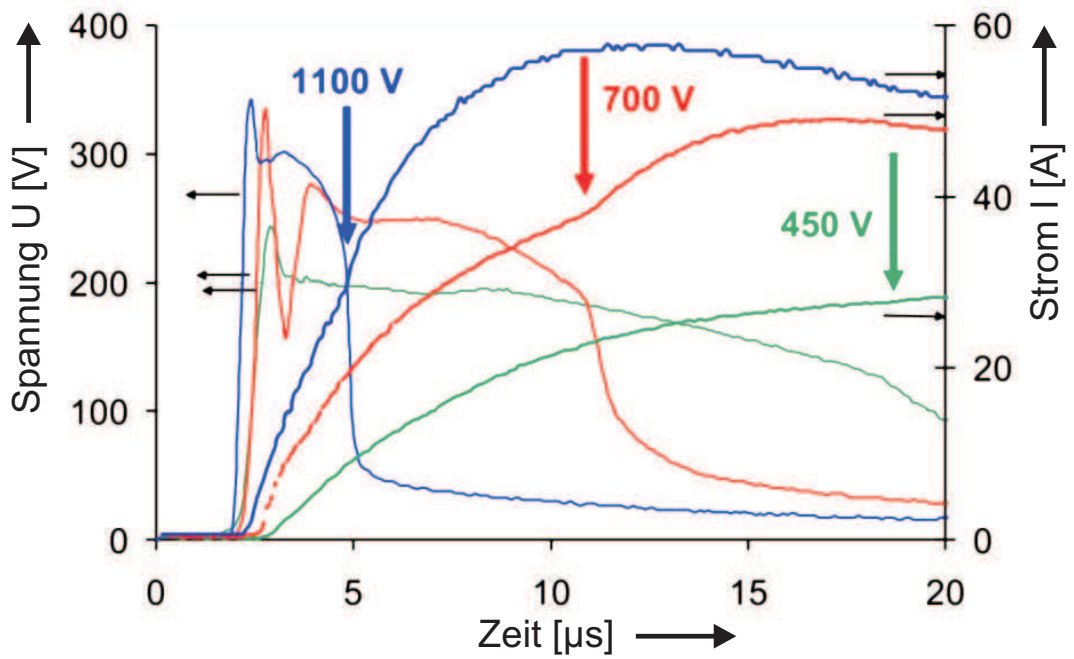


Abbildung 4.14: Spannungs- und Strom-Verläufe für variierende U_0 (aus [51])

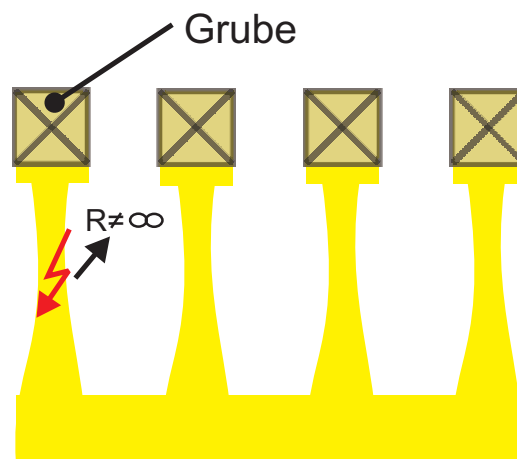


Abbildung 4.15: Skizze von pyramidenförmigen Gruben mit paralleler Kontaktierung mit Leiterbahnen

(siehe Abbildung 4.16 b). Der ohmsche Widerstand der Leitung erhöhte sich jedoch nicht stark, so dass die Möglichkeit einer parallelen Verbindung der Strukturen nicht realisiert werden konnte. Zudem kam es häufig an nicht kontrollierbaren Stellen der Leiterbahnen, insbesondere an der Kante zur pyramidenförmigen Grube, zu Durchschlägen.

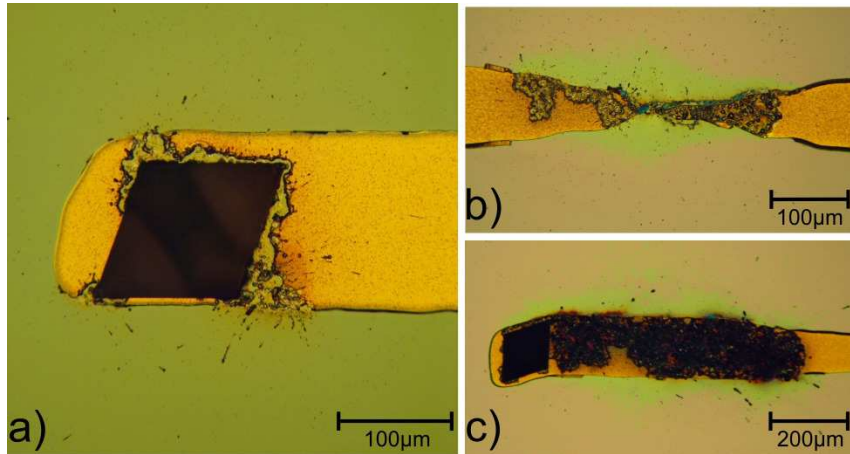


Abbildung 4.16: *Aluminium-Gold Leiterbahnen nach durchgeführten Hochspannungsdurchschlägen; Region um Rautenstruktur, parasitäre Durchschläge an Rautenkante (a), geschädigte Leiterbahn an Verjüngung (b), parasitäre Durchschläge auf Leiterbahn (c) [58]*

Ein weiterer Versuch bestand darin, eine Kontaktfläche um die geätzte Struktur herzustellen (siehe Abbildung 4.13 b). Auf dieser Kontaktfläche können Nadeln wesentlich einfacher positioniert werden. Abbildung 4.17 zeigt eine Raute nach einem Hochspannungsdurchschlag mit und ohne die Metallisierung. Bei den Versuchen kam es zu parasitären Durchschlägen zwischen Nadel und Kontaktfläche, Rändern der Fläche zum Silicium und besonders am Übergang von der Waferoberfläche zur Grube. Die Siliciumnitrid Maskierung wurde folglich durch die thermische Einwirkung stark beschädigt (siehe Abbildung 4.17 b).

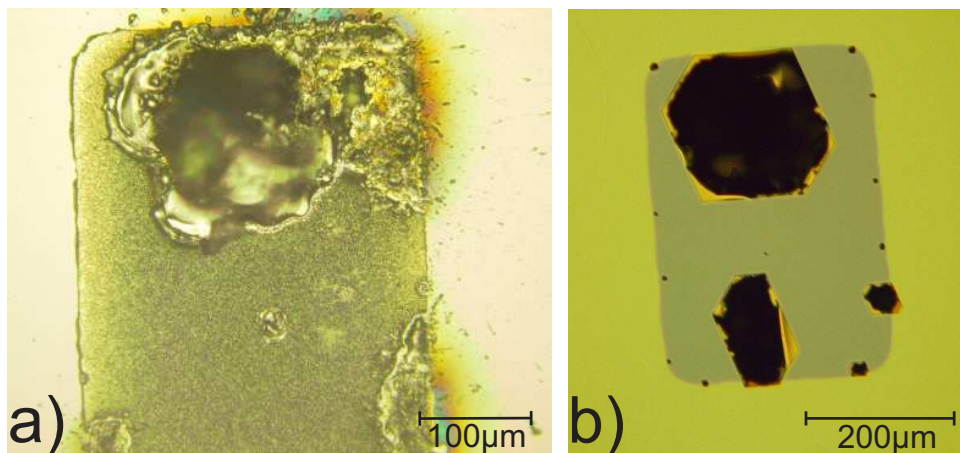


Abbildung 4.17: *Aluminum-Gold Kontaktfläche nach Hochspannungsdurchschlag; Aufsicht (a), Aufsicht ohne Metallisierung (b) [58]*

Galvanisch gefüllte Gruben

Zur Umgehung dieser Problematik wurden die Gruben galvanisch mit Kupfer aufgefüllt (Abbildung 4.18). Eine abgeflachte Wolframnadel kann sehr gut in die mittlere Vertiefung

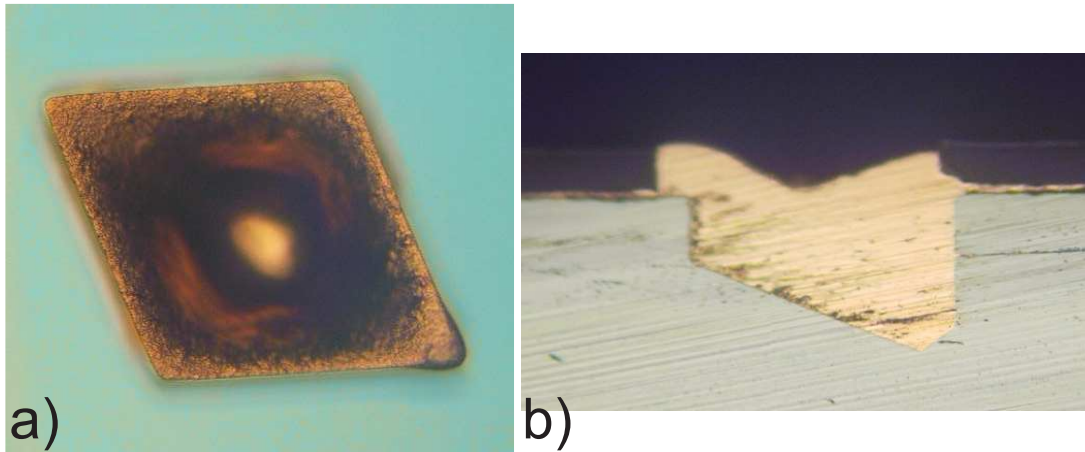


Abbildung 4.18: Mit Kupfer galvanisch aufgefüllte Rautenstruktur; Aufsicht (a), Querschnitt (b) [58]

positioniert werden. Nun wird erstmalig die Spitze der geätzten Pyramide direkt für den Spitzeneffekt genutzt. $\{100\}$ -Silicium ist sehr gut hierfür geeignet aufgrund der

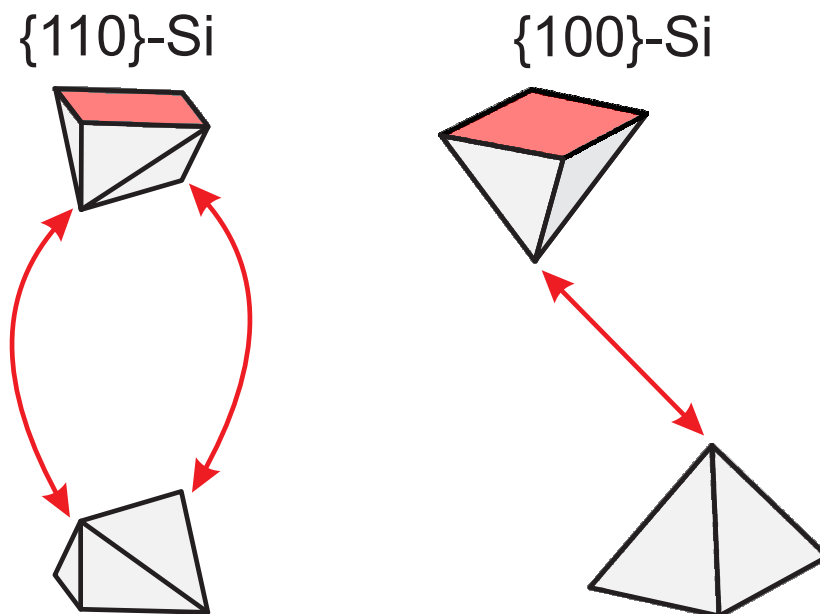


Abbildung 4.19: Durchschlagspfade bei mit Kupfer gefüllten rauten- und pyramidenförmigen Gruben

pyramidenförmigen Gruben mit gut ausgeprägter Spitze. Bei rautenförmigen Gruben sind zwei Spitzen vorhanden. Die Feldlinien beschreiben von den Spitzen einen Bogen zur anderen Seite und vergrößern somit die Strukturen erheblich (siehe Abbildung 4.19). Durch die Verwendung der galvanisch gefüllten Gruben konnte die Positionierung der

Nadeln vereinfacht und der Verschleiß erheblich reduziert werden. Die Siliciumnitrid Oberfläche wurde nicht durch parasitäre Durchschläge beschädigt.

Zusammenfassung: Hochspannungsversuche

Durch die Verfüllung von pyramidenförmigen Gruben mit Hilfe der Galvanik wird die Nadelpositionierung vereinfacht und der Verschleiß verringert. Die Ausbeute wird deutlich gesteigert, da kaum parasitäre Entladungen auftreten, welche die Durchgangslöcher verbreitern. In Abbildung 4.20 und 4.21 sind Fotos der hergestellten vertikalen Rautenstrukturen und diagonalen Kanälen dargestellt. Die Qualität der diagonalen Kanäle muss noch verbessert werden. Abbildung 4.21 b) zeigt den nach einem Sägeschnitt aufgenommenen Querschnitt. Der Kanal bildet einen Winkel von 45° zur Oberfläche. Die Maskierungsöffnung für die mit Kupfer gefüllten pyramidenförmigen Gruben ist nicht groß genug, so dass eine $\{111\}$ -Ebene im rechten Winkel zum Kanal eine Kante bildet (siehe Abbildung 4.21 b, Position 1). Solche Kanten werden ebenfalls durch Dickeschwankungen der Wafer hervorgerufen. Ganz vermeiden lassen sich diese Kanten folglich nicht. Die Stufenbildung in Abbildung 4.21 b, Position 2 wird durch eine zu kurze Ätzeit der verbreiterten Kanäle hervorgerufen und verschwindet bei Verlängerung der Ätzeit.

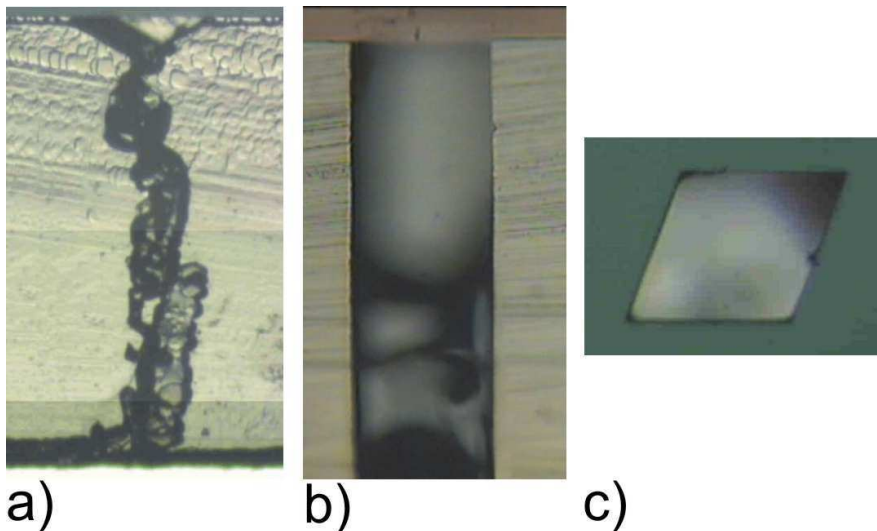


Abbildung 4.20: *Erfolgreich geschädigte und geätzte Kanäle; Querschnitt eines Durchschlagspfades mit KOH angeätzt zur Verbesserung des Kontrasts (a), Querschnitt von fertig geätztem rautenförmigen Kanal (b), Aufsicht von b) (c), siehe [18][51]*

4.3.4 Thermomigration & elektrochemisches Ätzen

Als ein alternatives Verfahren wurde die Thermomigration von Aluminium durch Silicium untersucht. Thermomigrierte Proben wurden von der Firma Silicon Sensors, Berlin bezogen [59]. Bei dem Verfahren werden die Silicium-Wafer auf 1000°C erhitzt, wobei eine

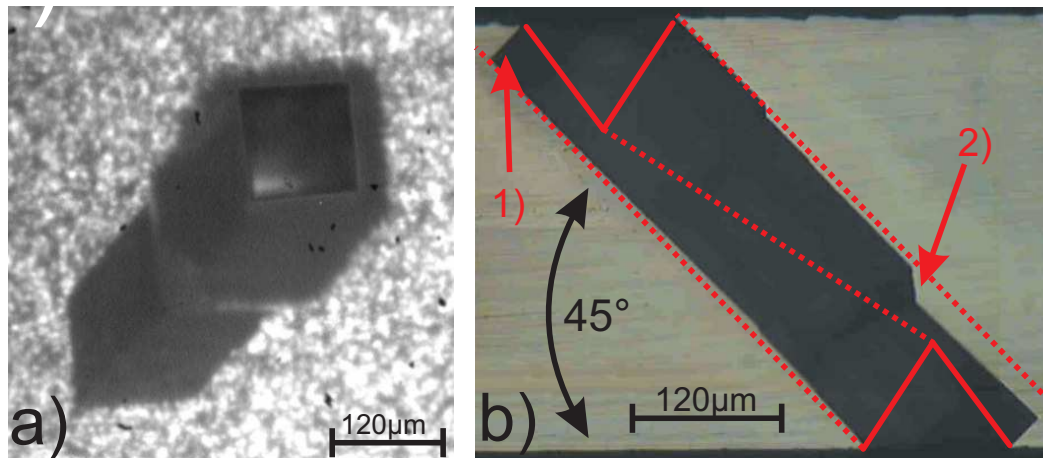


Abbildung 4.21: Erfolgreich geschädigter und geätzter diagonaler Kanal in $\{100\}$ -Silicium; Aufsicht mit Infrarot Kamera (a), gesägter Querschnitt (b), rechtwinklige Kante aufgrund fehlender zweiter Maskierungsöffnung und Variation der Waferdicke (b,1), Kanten aufgrund zu kurzer Ätzeit (b,2) [18][51]

Temperaturdifferenz zwischen Wafer Vorder- und Rückseite von 5°C eingestellt wird. Aluminium, welches sich auf der kälteren Seite befindet legiert mit dem Silicium und wandert in Richtung des Gradienten durch den Wafer. Es bilden sich p-dotierte Kanäle mit Dotierkonzentrationen von etwa 10^{19}at./cm^3 . In ersten Versuchen wurde untersucht, ob die Kristallstruktur durch den Prozess geschädigt wird, so dass ein Ätzen mit KOH entlang des migrierten Kanals möglich ist. Es konnten keine veränderten Ätzeigenschaften des Siliciums festgestellt werden. Dies liegt zum einen darin begründet, dass mit Hilfe einer Aluminium-Dotierung Störstellen im Kristall unter Einwirkung von Wärme reduziert werden können und der Kristallisierungsprozess von nicht kristallinem in polykristallines Silicium gefördert wird [60]. Die Migration findet in Öfen oder unter Einwirkung von Infrarotstrahlung statt. Ein sehr schnelles Abkühlen der Wafer ist nicht möglich, so dass die atomare Struktur keine Zeit hat zu rekristallisieren. Nur an Stellen, wo der Migrationsprozess nicht homogen war, konnten aluminiumhaltige Bereiche mit einer Aluminium-Ätzlösung entfernt werden. Auf diese Weise konnte nicht durch den gesamten Wafer geätzt werden.

Da mit Hilfe der Migration sehr feine und dünne p-dotierte Kanäle in das Silicium eingebracht werden können (bis zu $30\ \mu\text{m}$ Durchmesser, [61]), liegt es nahe, Hochspannungsimpulse an migrierte Kanäle anzulegen. Auf diese Art könnte der Silicium Kristall lokal geschädigt werden. Durch den dotierten Kanal besteht die Möglichkeit, dass sich die Hochspannungsimpulse nur entlang der Kanäle ausbreiten. Somit könnten Kanäle mit geringerem Durchmesser realisiert werden. Erste Versuche zeigten, dass durch die Hochspannungsimpulse die Struktur des Siliciums in den thermo-migrierten Kanälen geschädigt werden kann. Die Maskierung war jedoch aus SiO_2 , welches von der KOH-Lösung angegriffen wird. Zudem hat der Migrationsprozess die Maskierung um die Strukturen herum vom Silicium abgelöst. Die starke Unterätzung verhinderte die Herstellung von Kanälen mit geringem Durchmesser.

Kürzlich wurde von Gautier et al. ein neues Verfahren entwickelt, welches das elektroche-

mische Ätzen und die thermomigration miteinander verbindet [62]. Das elektrochemische Ätzen, das heißt die Oxidationsreaktion von Silicium mit Hilfe von 30% HF in H_2O , wird von Löchern (p-dotierten Bereichen) aktiviert. Ohne Bestrahlung des Wafers mit Licht werden n-dotierte Bereiche folglich nicht geätzt. Das Silicium der p-dotierten Kanäle wird bei Anlegen einer Spannung und eines entsprechenden Kanalstroms vollständig oder porös geätzt.

Das neue Verfahren hat folglich großes Potential zur Herstellung vertikaler Durchgangslöcher in Silicium. Da diagonale Kanäle mit diesem Verfahren nicht realisierbar sind, bleibt das Hochspannungsverfahren das vielfältigere Verfahren.

Kapitel 5

Verkleben von Glasfasern

Die stoffschlüssige, dauerhafte Verbindung von Glasfaser und Silicium-Substrat hat Auswirkungen auf die Funktionsweise und Haltbarkeit des Produktes. Aus diesem Grund ist die Wahl des geeigneten Dosierverfahrens und ggf. Fügemediums entscheidend, um eine effiziente Fertigung zu ermöglichen.

Im Folgenden wird ausschließlich auf das Fügen mit Hilfe von UV-härtendem Klebstoff eingegangen, da es ein industrielles Standardverfahren ist und relativ kostengünstig eingesetzt werden kann. Verfahren wie das Laserschweißen kommen derzeit aus Kostengründen nicht in Frage (im Hinblick auf eine Montage bei kleinen und mittelständischen Unternehmen bei niedriger bis mittlerer Stückzahl). Klebstoffe mit thermischer, zeitgesteuerter oder mehrkomponentiger Härtungsfunktion können ebenfalls nicht eingesetzt werden. Thermisch härtende Klebstoffe werden beim Erhitzen sehr dünnflüssig, so dass sie sich auf den Klebeflächen sehr dünn verteilen. Bei der Dosierung geringer Mengen, wie sie für die Fasertechnik erforderlich sind, härten lösungsmittelhaltige oder erwärmte Klebstoffe zu schnell aus, so dass Dosierwerkzeuge sofort verstopfen. Aus diesem Grund können auch keine flüssigen Gläser, wie Natrium Silikat Glas [63, 64] verwendet werden, da sie ebenfalls direkt bei Austritt aus der Kanüle aushärten. Mehrkomponentige haben häufig sehr lange Topfzeiten.

Beim Bonden mit Hilfe von UV-härtenden Klebstoffen ist die Wahl des richtigen Klebstoffs und die Beherrschung der Dosierung exakter Volumina eine zwingende Voraussetzung. Der Klebstoff bestimmt die Stärke sowie die Haltbarkeit der Verbindung durch seine Haft- und Füllkomponenten [65]. Die präzise Dosierung ist in zweierlei Hinsicht entscheidend: es muss genug Klebstoff aufgebracht werden, um die geforderte Bondstärke zu erreichen und es darf nicht so viel dosiert werden, dass die Funktion des Bauteils oder der benachbarten Komponenten beeinträchtigt wird. In der Mikrotechnik sind diese Grenzen oft sehr eng gesetzt, da viele Komponenten auf engstem Raum zusammenliegen. Gerade in der MEMS Technologie kann die Funktion der beweglichen Mikroaktoren oder - Sensoren durch ein ungenau dosiertes Klebstoffvolumen stark eingeschränkt werden.

5.1 Randbedingungen

Als Beispiel dient hier wiederum der in Kapitel 8.1 vorgestellte 1x2 Faserschalter. In diesem Fall gelten die Randbedingungen in Tabelle 5.1. Die Fasern werden in V-Gruben positioniert. Die Besonderheit bei dieser Anwendung liegt darin, dass die Glasfasern auf der Ausgangsseite nicht wie zum Beispiel bei Faserbündchen üblich im $250\ \mu\text{m}$ -Raster angeordnet sind, sondern direkt nebeneinander im Abstand von $125\ \mu\text{m}$ liegen (siehe Abbildung 8.2 und 8.3). Da die Fasern sequentiell montiert werden (siehe Kapitel 8.1), dürfen benachbarte V-Gruben durch den Fügevorgang nicht beschädigt oder mit Klebstoff gefüllt werden. Der andere kritische Bereich ist das Ende des so genannten Lateral-Aktors, welcher die Eingangsfaser umschaltet. Da aus Platzgründen keine Einfüllhilfen vorhanden sind, muss relativ exakt positioniert und dosiert werden. Benachbarte Balken liegen hier in einer Entfernung von $300\ \mu\text{m}$. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass die Faser während des Fügevorgangs festgehalten werden sollte, um ein Aufschwimmen der Faser zu verhindern. Dies ist besonders wichtig bei Komponenten, wo die Faser im Koppelbereich festgeklebt werden muss. Beim thermischen Faserschalter (Abschnitt 8.1) werden die Fasern im Koppelbereich lediglich in die V-Gruben hineingepresst. Somit ist es nicht zwingend notwendig die Fasern während des Fügevorgangs zu fixieren.

Der verwendete Klebstoff sollte niederviskos ($< 500\ \text{mPa}\cdot\text{s}$) sein, damit durch die Kapillarwirkung der Klebstoff unter die Faser gezogen wird. Eine Aussparung am Grubenrand (siehe 8.3) erleichtert es dem Klebstoff zwischen Faser und Grube zu fließen.

Randbedingungen	Größe
Faserdurchmesser	$125\ \mu\text{m}$
Faserabstand (radial)	$125\ \mu\text{m}$
Greiferabstand	$5\ \text{mm}$
Führungsstruktur	V-Grube
Material Chip	Silicium, Siliciumnitrid
Material Faser	Glas/Polymer (Kern/Mantel)
min. benötigtes Volumen pro Klebstelle	$\approx 10^6\ \mu\text{m}^3$
Anzahl Klebestellen pro Schalter	6
Viskosität Klebstoff	$100 - 500\ \text{mPas}$
UV-Härtung möglich	Ja

Tabelle 5.1: Randbedingungen für die Faser-Chip Verklebung des Faserschalters

5.1.1 Glasfasern in Führungsstrukturen

Für die Verklebung von Glasfasern in Silicium V-Gruben sind niederviskose UV-härtende Klebstoffe geeignet (Viskosität $< 500 \text{ mPa} \cdot \text{s}$), da sie durch Kapillarkräfte an der Faser entlang kriechen können. So wird eine großflächige Verbindung erreicht, die schon bei kleinen Volumina für ausreichend hohe Verbindungskräfte sorgt (siehe folgenden Abschnitt 5.2).

Neben der niedrigen Viskosität sollte der Klebstoff einen geringen Schrumpfung und eine hohe Endfestigkeit aufweisen. Der Schrumpfung des Klebstoffs kann die Faser unkontrolliert aus der Führung ziehen. Eine geringe Endfestigkeit kann dazu führen, dass sich die Faser durch Zug- oder Scherbelastungen ebenfalls aus der Sollposition bewegen kann. Klebstoffe mit den beschriebenen Eigenschaften bestehen häufig aus Epoxidharz, da dieser strukturbedingt weniger schrumpft, als Klebstoff aus Acrylaten. Verwendet wurde der Klebstoff Vitralit 1505 der Firma Panacol Elosol [66]. Dieser weist einen Schrumpfung von 1,5 % bei einer Viskosität von $350 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ auf. Für die Rautenstrukturen wäre ein noch niedrigerer Schrumpfung von Vorteil, da die Fasern durch den Klebstoff von den Führungen weggezogen werden.

5.1.2 Glasfasern an integriert-optische Wellenleiter

Zur dauerhaften Verbindung von Glasfaserarrays und integriert optischen Schaltungen auf Silicium wurde ein ähnlicher UV-härtender Klebstoff verwendet (Vitralit 1507). Der einzige Unterschied liegt darin, dass er zu 20% mit nanoskaligen Glaspartikeln gefüllt ist (Größe der Partikel: 14 nm)[67]. Die Glasfüllung verbessert vor allem die thermischen Eigenschaften des Klebstoffs, so dass sich der thermische Ausdehnungskoeffizient an den von Glas und Silicium annähert.

5.2 Notwendiges Klebstoffvolumen

Bei der Dimensionierung von faseroptischen Komponenten tritt die Frage auf, wie groß die Kontaktfläche zwischen V-Grube, Klebstoff und Faser sein muss, damit eine ausreichende mechanische Festigkeit erreicht wird. Dieser Wert hängt von dem verwendeten Klebstoff und der Größe der Grube ab. Um herauszufinden wieviel Klebstoff notwendig ist und auf welcher Länge eine Faser eingeklebt werden muss, wurden SMF28-Fasern in V-Gruben mit der Breite von $100 \mu\text{m}$ eingeklebt. Die Menge des Klebstoffs wurde variiert. Kraftmessungen zeigten, dass schon bei geringen Klebstoffvolumina hohe Haltekräfte erreicht werden können. Ein mathematischer Zusammenhang von Klebstoffvolumen und Haltekraft konnte für die geringen Volumina nicht bestimmt werden. In der Praxis ist es nicht möglich nur Klebstoff unter die Faser zu bringen. Es zeigt sich jedoch deutlich, dass bei Volumina größer als $4 \cdot 10^6 \mu\text{m}^3$ die axialen Haltekräfte mehr als 3 N betragen. Da eine Zugentlastung in jedem Fall zusätzlich erforderlich ist, wird nicht mehr Klebstoff benötigt. Dieses Volumen entspricht in etwa dem minimal dosierbaren Volumen für eine Stahlkanüle mit $100 \mu\text{m}$ Durchmesser (siehe Abbildung 5.4).

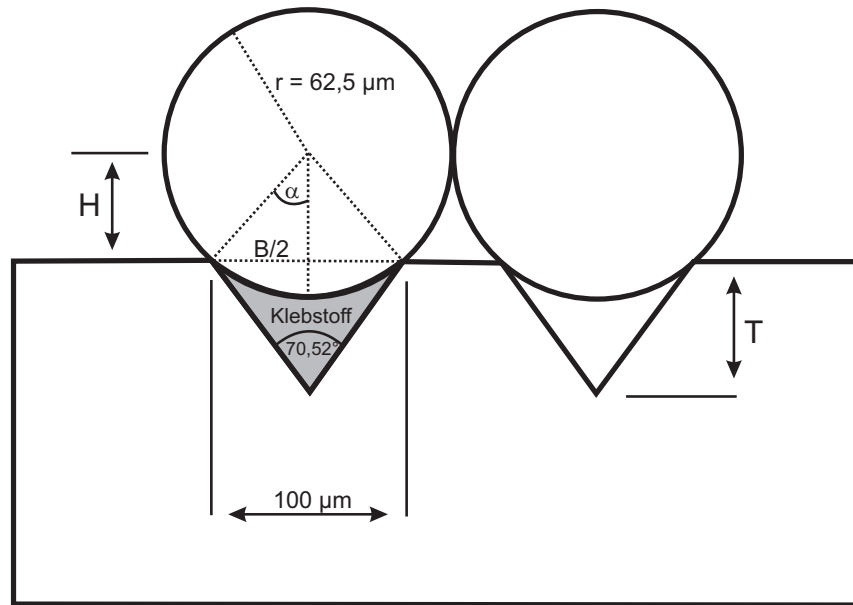


Abbildung 5.1: Glasfaser in V-Gruben mit Abmessungen

Zur Berechnung des Klebstoffvolumens zwischen Faser und V-Grube wird wie folgt vorgegangen.

Die Querschnittsfläche, die der Klebstoff zwischen Faser und V-Grube einnimmt berechnet sich aus der V-Gruben Querschnittsfläche A_{Δ} und dem Faserabschnitt, welcher in der Grube liegt:

$$A_{\Delta} = \frac{B}{2} \cdot T = \frac{B^2}{4} \cdot \tan(54,74^{\circ}) \quad (5.1)$$

$$\text{mit } T = \frac{B}{2} \cdot \tan(54,74^{\circ}) \quad (5.2)$$

Der Abschnitt der Faser, welcher in der Grube liegt berechnet sich wie folgt:

$$A_{Faser} = 2 \cdot \frac{\alpha}{360^{\circ}} \cdot \pi \cdot r^2 \quad (5.3)$$

$$\text{mit } \alpha = \arcsin\left(\frac{B}{2 \cdot r}\right) \quad (5.4)$$

Dreiecksfläche, die nicht in der Grube liegt:

$$A_{Faser_{\Delta}} = \frac{B}{2} \cdot H \quad (5.5)$$

somit folgt für den Flächeninhalt der Grube abzüglich der Faserfläche:

$$A_{Klebstoff} = A_{\Delta} - (A_{Faser} - A_{Faser_{\Delta}}) \quad (5.6)$$

Am vorderen Ende des Lateralaktors des in Kapitel 8.1 vorgestellten Faserschalters soll die Glasfaser beispielsweise auf einer Länge von 3 mm in eine $100\text{ }\mu\text{m}$ breite V-Grube geklebt werden. Somit ist ein Klebstoffvolumen von $V = 5,39 \cdot 10^6\text{ }\mu\text{m}^3$ erforderlich, um den gesamten Bereich zu füllen. Wie zuvor gemessen sind Volumina größer als $4 \cdot 10^6\text{ }\mu\text{m}^3$ ausreichend für eine stabile Verbindung. Hierfür wäre rechnerisch eine V-Grubentiefe von $2,2\text{ mm}$ erforderlich.

5.3 Dosierverfahren

Im Bereich der Automatisierungstechnik werden häufig Kolben-, Schnecken- oder Druckluft- betriebene Dosiersysteme eingesetzt. Ein weiteres, sehr robustes und simples Verfahren ist das so genannte Eintauch- oder auch Stempel-Verfahren. Bei all diesen Verfahren handelt es sich um eine berührende Dosierung, da der Klebstoff mit Hilfe einer Kanüle oder Stempel mit dem zu fügenden Bauteil in Berührung gebracht werden muss. Dem gegenüber stehen berührungslose Verfahren, wie zum Beispiel das Tröpfchendosieren mit Hilfe von Piezoaktoren [68]. Tröpfchen-Dosierer wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Im Folgenden sollen die untersuchten Verfahren kurz vorgestellt und miteinander verglichen werden.

5.3.1 Eintauch-Dosierverfahren

Beim so genannten Eintauch-Verfahren wird je nach benötigtem Klebstoffvolumen ein zylinderförmiger Stab in ein Klebstoff-Reservoir eingetaucht. Für die Fasermontage eignet sich eine entmantelte Glasfaser mit $125\text{ }\mu\text{m}$ Außendurchmesser. Nach dem Herausziehen



Abbildung 5.2: *Glasfaser fixiert an Kanüle für das Eintauch Dosierverfahren*

der Faser kann der an der Faser haftende Klebstoff an den zu klebenden Stellen durch Kontakt aufgebracht werden. Die Vorteile des Eintauch-Verfahrens liegen in dem sehr einfachen Aufbau, den geringen Investitionskosten und der kleinen Baugröße. Die Nachteile überwiegen jedoch im Hinblick auf die Fasermontage:

- Kalibrierung bei Erneuerung der Dosierspitze
- langsam, da Weg zum Klebstoff-Reservoir zurück gelegt wird
- Dosierung nur über Dicke der Faser einstellbar
- nicht für niederviskosen Klebstoffe geeignet.

Für die Fasermontage ist vor allem von Nachteil, dass keine sehr dünnflüssigen Klebstoffe dosiert werden können. Zur sicheren Montage sollte der Klebstoff kapillare Eigenschaften besitzen, so dass er unter oder neben der Faser die Spalten ausfüllt. Dies kann jedoch nur mit Klebstoff Viskositäten von weniger als $1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ erreicht werden. Derart niederviskose Klebstoffe benetzten in Versuchen die verwendete Faser vollständig, so dass sich kein Tropfen am Faserende bilden konnte.

5.3.2 Druckluft- und Kolbendosierer

In vielen Anwendungen werden Druckluft betriebene Dosierer verwendet. Das Grundprinzip besteht darin, dass Klebstoff, welcher sich in einer Kartusche befindet, durch eine Kanüle gepresst wird. Mit Hilfe von kurzen Druckluftimpulsen kann der Klebstoff aus der Kanüle herausgedrückt werden. Bei geringen Klebstoff Viskositäten sorgt ein kontinuierlich anliegendes Vakuum dafür, dass kein Klebstoff ohne Impuls ausläuft. Durch die Einstellbarkeit der Zeitdauer und Stärke des Druckluftimpulses kann die Menge des Klebstoffs sehr gut dosiert werden. So lassen sich fast alle Klebstoffe mit dem System dosieren. Die geringe Baugröße der Dosiernadel ermöglicht die Dosierung an schwer zugänglichen Stellen und der Dosiervorgang ist im Vergleich zum Eintauchverfahren deutlich schneller. Auch hier muss, wie beim Eintauchverfahren, die Position der Kanülenspitze kalibriert werden. Zudem müssen die richtigen Einstellungen des Luftdrucks und Vakuums gefunden werden.

In [68] wurden die Eigenschaften dieser Dosiertechnik eingehend untersucht und mit einem mechanischen Verfahren, bei welchem ein präzise gesteuerter Kolben den Klebstoff aus der Kanüle drückt, verglichen. Die wichtigsten Kriterien für den Vergleich sind die Reproduzierbarkeit des zu dosierenden Volumens und die kleinste erreichbare Menge. Mit Hilfe des Kolbendosierers konnten in [68] für einen Kanüledosierer sehr geringe Dosiervolumina ($10 \mu\text{m}^3$) aufgebracht werden. Dies lag jedoch daran, dass nur bei diesem Verfahren auch sehr feine Glaskapillaren eingesetzt wurden (Innendurchmesser der Kanüle bis zu $1 \mu\text{m}$). Mit Hilfe des Druckluft-Dosiergerätes konnten durch die Verwendung von Stahlkanülen mit einem minimalen Außendurchmesser von $230 \mu\text{m}$ und einem Innendurchmesser von $100 \mu\text{m}$ Klebstoffvolumina von $10^6 \mu\text{m}^3$ dosiert werden. Inzwischen sind noch kleinere Stahlkanülen mit Innendurchmessern bis zu $40 \mu\text{m}$ am Markt erhältlich [69]. In eigenen Versuchen konnte eine Verringerung des dosierten Volumens erreicht werden, indem auch für den Druckluft betriebenen Dosierer Glas-Kapillare verwendet wurden. Die kleinste

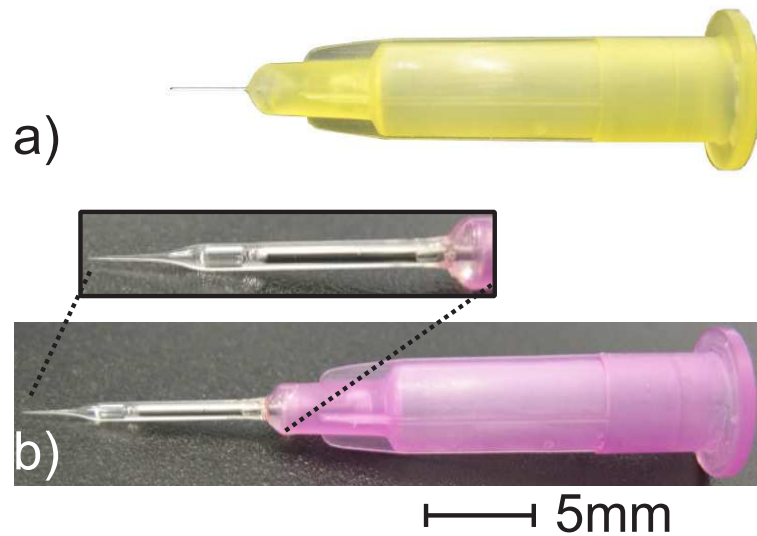


Abbildung 5.3: Kanüle mit $0,25 \text{ cm}^3$ Reservoir und $100 \mu\text{m}$ Innendurchmesser (a); Glaskapillare Innendurchmesser $5 \mu\text{m}$ auf Standard Kanüle (b)

verwendete Kapillare hatte einen Außendurchmesser von $8 \mu\text{m}$ und einen Innendurchmesser von $5 \mu\text{m}$ mit welcher ein Volumen von $20 \mu\text{m}^3$ dosiert werden konnte. Der verwendete Klebstoff, Panacol-Elosol Vitralit 1505, hat eine Viskosität von $350 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Die Kapillare wurde auf eine dicke Stahlkanüle gesteckt und verklebt (siehe Abbildung 5.3 b). Da der notwendige Luftdruck vom Innendurchmesser und der Länge der Kapillare abhängt, ist darauf zu achten möglichst kurze Kapillaren zu verwenden. Die verwendeten Kapillaren sind kommerziell verfügbar, da sie für Analyseverfahren beim sog. Elektrospray Verfahren angewendet werden.

In Abbildung 5.4 ist das erreichbare Klebstoffvolumen für das Druckluft-, Piezo- und Kolben-Dosierverfahren dargestellt. Der gelb hinterlegte Bereich zeigt die erreichte Verbesserung gegenüber [68]. Die Spitzen der Glas-Kapillare sind durch den geringen Durchmesser sehr biegsam und somit durchaus robust genug, um automatisiert eingesetzt zu werden. Für die Fasermontage reicht das erreichbare Dosier-Volumen der Stahlkanülen aus. Wenn Klebstoff jedoch sehr dicht an weiteren Bauteilen aufgebracht werden soll und durch die Schwankungen des Dosiervolumens die Gefahr eines unerwünschten Kontakts besteht, bietet es sich an Kapillaren mit geringerem Durchmesser zu verwenden und ggf. mehrfach zu dosieren, bis das angestrebte Volumen erreicht ist.

In Tabelle 5.3.2 befindet sich eine Übersicht der gängigen Dosierverfahren und deren Vor- und Nachteile.

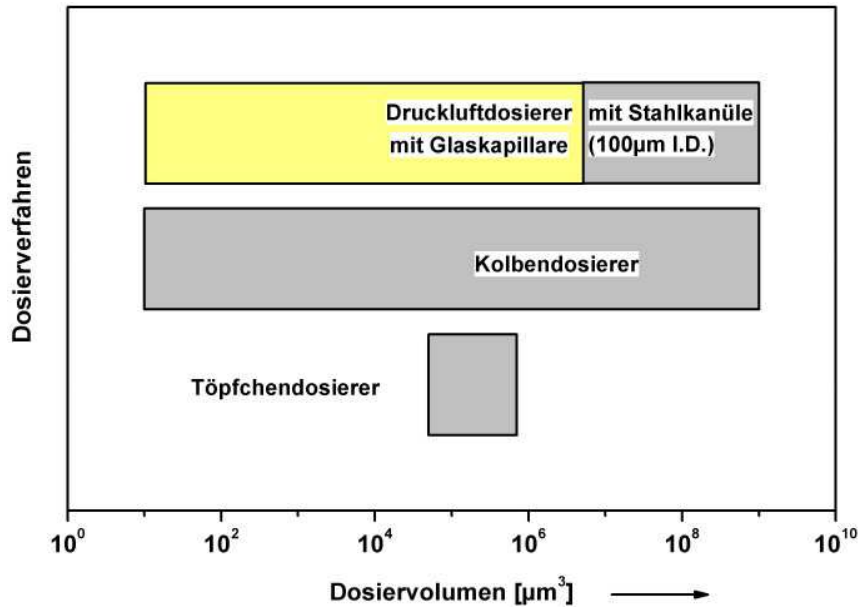


Abbildung 5.4: Dosierbare Klebstoffvolumina; Werte aus [68] mit Erweiterung durch eingeführte Glaskapillare beim Druckluftdosierer

	Stempel -Verfahren	Druckluft -Dispenser	Kolben -Dosierer
Investitionskosten	++	0	0
Reproduzierbarkeit	-	+	(+)
Volumenbereich	-	++	++
Viskositätsbereich	0	++	++
Baugröße	++	+	0
Genauigkeit Dosierung	-	+	+
Kalibrierung	0	0	0
Einfluss Toleranz Chiphöhe	-	-	-
Geschwindigkeit	--	+	0
Automatisierung	--	+	+

Tabelle 5.2: Vergleich des Eintauch-, Druckluft- und Kolbendosierens; ++: sehr gut, +: gut, (+): mit Einschränkung gut, 0: befriedigend, -: ausreichend, --: mangelhaft

Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit der Druckluft-betriebenen Stahlkanülen liegt laut [68] bei 30 % (ohne Druckregelung und mit Kalibrierung für eine Dosiernadel). Dieser Wert konnte durch Messungen bestätigt werden. Fehler von bis zu 500 % können entstehen, wenn Klebstoff nachläuft und sich an der Außenwand der Kanüle sammelt. Dies konnte durch die Überlagerung eines dauerhaften Vakuums verhindert werden. Der Nachteil des Vakuums besteht darin, dass durch das Vakuum der Klebstoff in die Kanüle hineingezogen werden kann, so dass nach längerer Wartezeit mehrere Druckluftimpulse notwendig werden können, um ihn wieder heraus zu drücken. Durch den Einsatz eines geeigneten Bildverarbeitungs-Algorithmus lässt sich der Fehler gut erfassen und korrigieren (siehe Abschnitt 9).

Bei Kolbendosierern kann es bei kleinen Dosiermengen ($< 2 \cdot 10^5 \mu\text{m}^3$) zu großen relati-

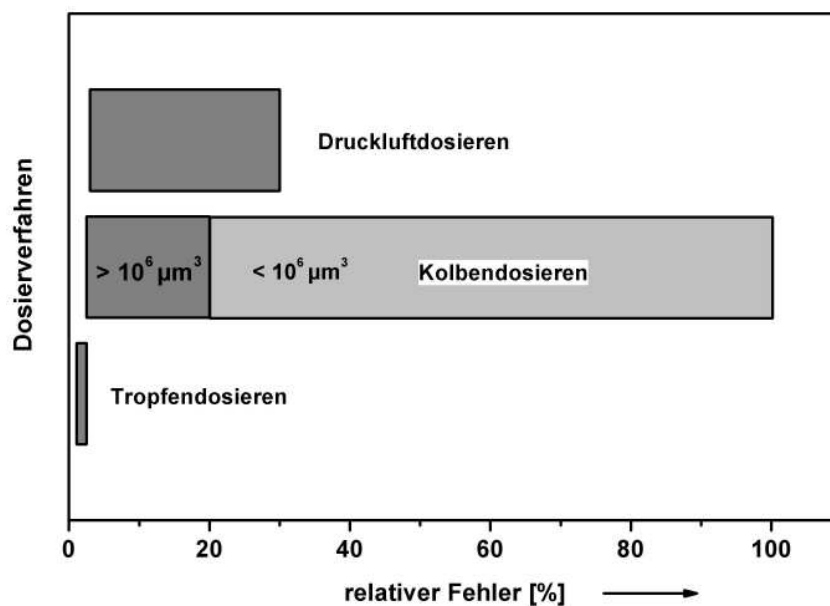


Abbildung 5.5: *Relativer Dosierfehler unterschiedlicher Dosierverfahren (abgeleitet aus [68] und eigenen Messungen für Druckluftdosierer)*

ven Fehlern von bis zu 100 % kommen. Dies liegt an der Kolbenverdrängung. Mit Hilfe der eingesetzten Glas-Kapillaren konnte neben der Verkleinerung des dosierten Volumens die Reproduzierbarkeit im Vergleich zu den Stahlkanülen konstant gehalten werden. Der Druckluftdosierer deckt somit einen sehr großen Volumenbereich bei einem relativen Fehler von 30 % ab.

Zur Verbesserung der Genauigkeit wurde in [70] der Dosiervorgang durch den Einsatz von Sensoren und einer leichten Änderung des mechanischen Aufbaus verbessert. Durch die Umfassung der Dosierkartusche mit einer metallischen Hülse kann die Ausdehnung der Kartusche reduziert werden. Dies spielt vor allem bei hohen Viskositäten bzw. Betriebsdrücken eine Rolle. Die Überwachung von Nadeldurchmesser, Oberflächenbeschaffenheit, Temperatur, Druck, Nadelabstand, Durchfluss sind Möglichkeiten den relativen Fehler zu minimieren. Kommerziell sind derzeit nur Systeme mit Druckregelung verfügbar. Da ein relativer Fehler von maximal 30 % bei der Faser Montage in diesem Fall tolerierbar ist, wurden keine derartigen Maßnahmen getroffen.

5.3.3 Dosieren mittels Elektropray-Verfahren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden erste Versuche zur Verwendung eines auf dem Elektropray Verfahren basierenden Dosierens durchgeführt. Dieses Verfahren wurde bislang nicht zur Dosierung von Klebstoff verwendet. Bei dem Elektropray Vorgang werden Flüssigkeiten durch Anlegen eines elektrischen Feldes zu einem Spray aus feinen, hoch unipolar aufgeladenen Tropfen zerstäubt [71]. Eingesetzt wird dieses Verfahren beispielsweise bei Massenspektrometern. Mit Hilfe einer Glaskapillare, welche mit einer leitfähigen Beschichtung versehen ist, wird eine relativ kleine Spitze bereitgestellt. Durch den Spitzeneffekt tritt eine Feldüberhöhung am Kanülenende auf. Dies ermöglicht den Einsatz niedrigerer elektrischer Spannungen. Ab einer bestimmten Höhe des E-Feldes wird das Kräftegleichgewicht *zwischen der Gravitation, der Oberflächenspannung, dem inneren hydrostatischen Druck, dem äußeren Gasdruck und der elektrischen Kraft, die aus dem angelegten elektrischen Feld resultiert* gestört [71]. Es bildet sich ein feiner Strahl, welcher unmittelbar darauf zu einem Spray wird.

Mit Hilfe dieses Verfahrens konnte Acrylat-Klebstoff (Delo 4302) sehr fein dosiert werden. Für den Versuch wurde eine Gold beschichtete Glaskapillare mit $5\ \mu\text{m}$ Innendurchmesser dicht über einen mit Siliciumnitrid beschichteten Silicium-Chip positioniert. Die Chip-Halterung (eine ebene Fläche aus Aluminium) wurde geerdet und die Spitze auf Potentiale zwischen 0 und 3000 V gesetzt. Der Graph in Abbildung 5.6 zeigt die notwendige Spannung zur Erzeugung des Klebstoff-Strahls oder -Sprays bei verschiedenen Abständen zwischen Kanüle und Oberfläche.

Der Klebstoff konnte Punkt und Linienförmig durch Bewegung der Kanüle aufgetragen werden (Abbildung 5.6). Durch das Anlegen der Gleichspannung folgt der Klebstoff dem

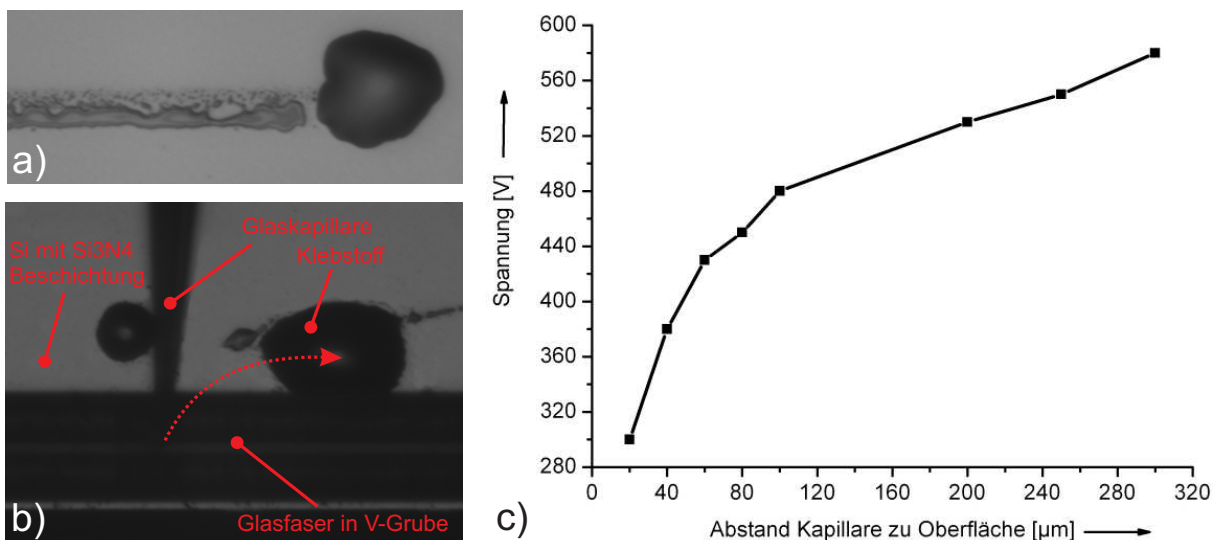


Abbildung 5.6: Foto eines dosierten Klebstoff Punktes und einer Linie a), Klebstoff-Dosierung an Glasfaser (b), Variation des Abstands zwischen Chip-Oberfläche und Kapillare mit resultierender notwendiger Spannung (c)

Verlauf der Feldlinien. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 5.6 b). Dort befindet sich das Ende der Glaskapillare oberhalb einer Glasfaser. Der emittierte Klebstoff sammelt sich

jedoch schräg rechts neben der Faser an.

Weitergehende Versuche konnten leider aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden. Es ist anzunehmen, dass durch eine Pulsung des elektrischen Feldes auch beliebige Positionen mit Klebstoff benetzt werden können. Das Verfahren ist nicht beschränkt auf kleine Kapillaren. Versuche mit Stahlkanülen (150 μm Innendurchmesser) waren ebenso erfolgreich. Es muss jedoch auf einen großen Abstand zwischen Kanüle und Oberfläche geachtet werden, damit kein elektrischer Kontakt durch den Klebstoff hergestellt wird.

Weitere Versuche sind erforderlich, um zu prüfen, ob alle Klebstoff-Varianten geeignet sind. Eine Beeinträchtigung der Eigenschaften des Klebstoffs durch die Einwirkung des E-Feldes konnte nicht beobachtet werden, sollte jedoch durch weitere Versuche geprüft werden.

Kapitel 6

Faser - Wellenleiter Kopplung

Um optische Glasfaser Netzwerke betreiben zu können, werden eine Reihe von aktiven und passiven Komponenten benötigt. Unter anderem werden Lasermodule, (DE-)Multiplexer, Faserverstärker und dispersionskompensierende Module eingesetzt. Da in den heutigen Glasfaser Weitverkehrsnetzen zumeist Standard Einmodenfasern (SMF28-Fasern) eingesetzt werden, müssen optische Komponenten an diese angekoppelt werden. Aus technologischen Gründen wird in optischen Komponenten oft mit anderen Modenfeld Geometrien gearbeitet. In diesem Kapitel wird die Kopplung von integriert optischen Komponenten in Siliciumoxinitrid-Technologie (SiON) untersucht. Um diese Komponenten möglichst klein und somit günstig herstellen zu können, werden hochbrechende Wellenleiter hergestellt, die Mode eng am Kern führen. Hierdurch werden sehr kleine Kurvenradien ermöglicht. Ein Restfilm unter dem Wellenleiterkern verbessert die Wellenleiterdämpfung und ermöglicht eine gute Überkopplung in benachbarte Wellenleiter [1]. Daraus resultiert ein ovales, kleines Modenfeld (siehe Abbildung 6.1). Die direkte Stoßkopplung an SMF28-Fasern zeigt eine hohe Koppeldämpfung. Zur Reduzierung der Koppeldämpfung sind Maßnahmen zur Anpassung der Modenfelddurchmesser zu treffen. So genannte „Taper“-Strukturen vergrößern beziehungsweise verkleinern den Modenfelddurchmesser durch geometrische oder optische Änderung des Wellenleiterkerns.

6.1 Wellenleiter-Taperstrukturen

Taper-Strukturen können integriert auf dem Wellenleiter-Chip hergestellt werden. Die Strukturen ermöglichen eine Anpassung des Modendurchmessers. Integriert-optische Taper sind zum Teil technologisch schwer herstellbar. Dies gilt besonders bei vertikaler Anpassung der geometrischen Wellenleiterstruktur, da hier eine Graustufenmaskierung erforderlich ist.

Linsensysteme zur Anpassung des Modenfelddurchmessers sind möglich, jedoch scheiden sie in der Regel aus, da mindestens drei Bauteile (Faser, Linse und Chip) sehr genau gegeneinander positioniert werden müssen. Eine gute Alternative zu den integriert op-

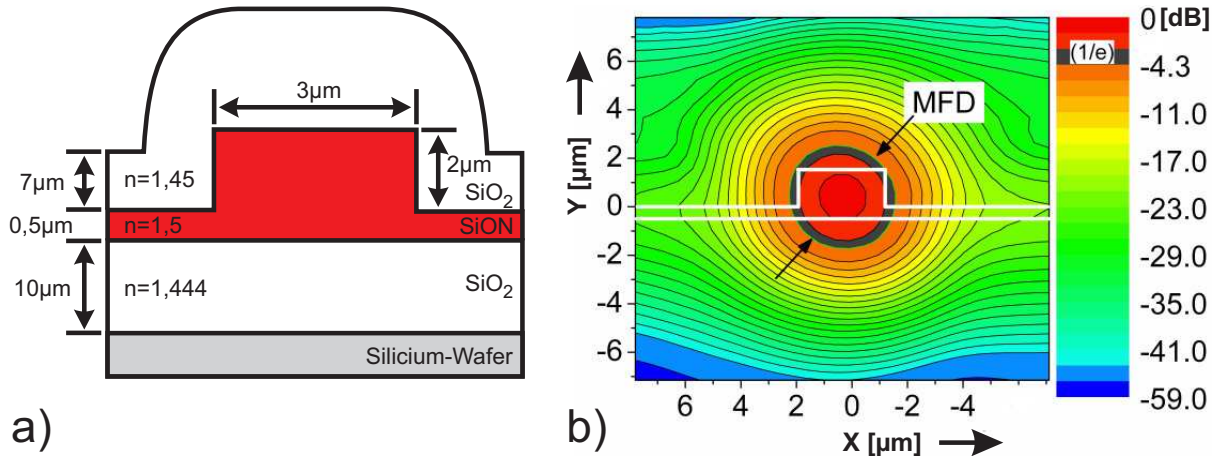


Abbildung 6.1: Technologiequerschnitt der verwendeten Wellenleiter (a) und simuliertes Modenfeld (b), als grauer Ring ist der Modenfelddurchmesser eingezeichnet (aus [1] und [11])

tischen Taperstrukturen sind Spezialfasern mit angepasstem Modenfelddurchmesser oder Fasertaper. Spezialfasern mit hohem Indexkontrast können mit geringen Koppelverlusten direkt an die Wellenleiter gekoppelt werden. Zur Anpassung der Spezialfasern an die SMF28-Fasern wird ein spezielles Spleißverfahren verwendet, welches den Kern der Spezialfaser unter thermischer Einwirkung vergrößert. Fasertaper, auch unter dem Namen „gelinste Faser“ bekannt, ermöglichen ebenfalls die Anpassung der Modenfelder zueinander. Da bei dieser Form der Anpassung SMF28-Fasern verwendet werden, sind keine weiteren Spleißstellen notwendig. Diese Form der Anpassung ist vor allem aus der Lasertechnologie bekannt.

In [72] wird ein planarer Modenkonverter für Wellenleiter, ähnlich denen in dieser Arbeit verwendeten, vorgestellt. Somit können die Ergebnisse mit den hier erzielten näherungsweise verglichen werden. Durch die Segmentierung der Wellenleiterstruktur wird auch eine vertikale Modenanpassung erreicht, ohne Graustufenmaskierungen verwenden zu müssen. Durch die Segmentierung und einen generischen Algorithmus, welcher die Abstände und Breiten der Wellenleitersegmente berechnet, wurde in [72] eine simulierte und gemessene Einfügedämpfung von jeweils $1,3\text{ dB}$ und $1,6\text{ dB}$ erreicht.

In der vorliegenden Arbeit wird das Koppelverhalten integriert optischer Komponenten ohne integrierte Taper-Struktur jedoch mit hochbrechenden Spezialfasern realisiert. Zunächst wird das Koppelverhalten für einzelne Verbindungen von Glasfasern und integriert optischen Wellenleitern untersucht. Im zweiten Schritt werden Faserverbünde, bei welchen mehrere Fasern parallel an optische Wellenleiter angekoppelt werden, vorgestellt. Die Fasern werden zu diesem Zweck durch geeignete Führungsstrukturen (Abschnitt 4) auf das richtige Rastermaß gebracht und dann mit den integriert-optischen Wellenleitern verklebt.

Integrierte Wellenleiter-Taper haben den Vorteil, dass nun Standardfasern mit relativ großem Modenfelddurchmesser direkt angekoppelt werden können. Hierdurch wird der zu betreibende Aufwand in Bezug auf die Positioniergenauigkeit leicht reduziert. Die Kopplung mittels Spezialfasern ist diesbezüglich sehr aufwendig, jedoch sind die Dämpfungswerte bei exakter Positionierung deutlich geringer. In Abschnitt 2.2 wurde bereits

eine Übersicht über die Koppelverluste zwischen Wellenleiter und verschiedener Fasertypen gegeben. Die vorliegenden Wellenleiter sind auf die Faser UHNA4 optimiert worden. Somit wird eine sehr geringe Koppeldämpfung von $0,22 \text{ dB}$ (theoretisch) und $0,1 \text{ dB}$ (Messung) pro Koppelstelle ermöglicht. Zu diesem Wert müssen jedoch noch Verluste an der Spleißstelle zwischen SSM- und UHNA-Faser addiert werden. Die Spleißverluste betragen $0,15 \text{ dB}$ pro Spleißstelle, so dass sich eine gemessene Gesamtdämpfung von $0,25 - 0,4 \text{ dB}$ ergibt. Die Dämpfungen sind folglich deutlich geringer als die aus [72]. Bei der Verwendung von Spezialfasern kommt es nun auf eine geeignete Montagetechnik an. Die obigen Messwerte beruhen auf Messungen mit jeweils einer einzelnen Faser auf der Ein- und Ausgangsseite des Chips mit Index-angepasstem Öl im Bereich der Koppelstelle. Bei der dauerhaften Verbindung der Fasern mit dem Chip kommen weitere Verluste hinzu (siehe Abschnitt 6.4).

6.2 Verklebemessplatz

Zur Vermessung stoßgekoppelter Glasfaserchips und zur Verklebung von Glasfaserchips mit integriert optischen Wellenleitern wird der Aufbau in Abbildung 6.2 verwendet. Ein Sechssachsensystem (Hexapod) ermöglicht die winkeltreue Ausrichtung der Komponenten zueinander. Anhand von Dämpfungsmessungen der äußeren Fasern und Wellenleiter wird der Winkel mit hoher Genauigkeit justiert. Das Hexapod kann Winkel von bis zu $0,115$ Milligrad auflösen. Mit Hilfe der Piezo-betriebenen Steller werden die Wellenleiter zueinander präzise ausgerichtet (Schrittweite: 1 nm). Ein Steuerrechner ermöglicht die Kontrolle über alle Stellachsen und stellt Routinen zur Auffindung der Koppelmaxima zur Verfügung. Für die Justage des axialen Winkels wurde eigens eine Routine, die den Pivot-Punkt bestimmt, erstellt [1] [73]. Dies verbessert die Genauigkeit der Drehung und sorgt somit für geringere Maximum Suchzeiten nach einem Drehvorgang.

6.3 Faser- Wellenleiterkopplung mit Dünnkern-Fasern

In Abschnitt 4.1 wurden bereits V-Gruben Chips bestückt mit PWG1-XP-Fasern vorgestellt. Um diese Chips an die integriert optischen Wellenleiter-Chips kleben zu können, müssen die Stirnflächen vom Wellenleiter-Chips sowie die des V-Gruben Chips sehr eben und parallel zueinander sein. Zur Stabilisierung der Fügestelle werden Glasdeckel auf die Chips geklebt (siehe Abbildung 6.3). Hierzu wird ein UV-härtender Epoxid Klebstoff verwendet. Die Schichtdicke des Klebstoffs beträgt beim Wellenleiter-Chip ca. $10 \mu\text{m}$. Abbildung 6.4 zeigt das Oberflächenprofil einer V-Grubenchip-Stirnfläche mit Glasfaser (gemessen mit Veeco Weißlichtinterferometer). Der Chip wurde mit Hilfe eines Glassägeblatts mit einer Körnung von $30 \mu\text{m}$ zersägt. Neben der relativ schlechten Oberflächengüte (Löcher von $1,0 \mu\text{m}$ Tiefe, Rauigkeit 118 nm) wirken sich vor allem die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Glas und Klebstoff negativ aus. Der Klebstoff quillt etwa $4 \mu\text{m}$ hervor. Der Grund hierfür könnte an der geringeren thermischen Leitfähigkeit des Epoxidharzes liegen und folglich einer Erwärmung des Klebstoffs beim Sägevorgang. Neben der

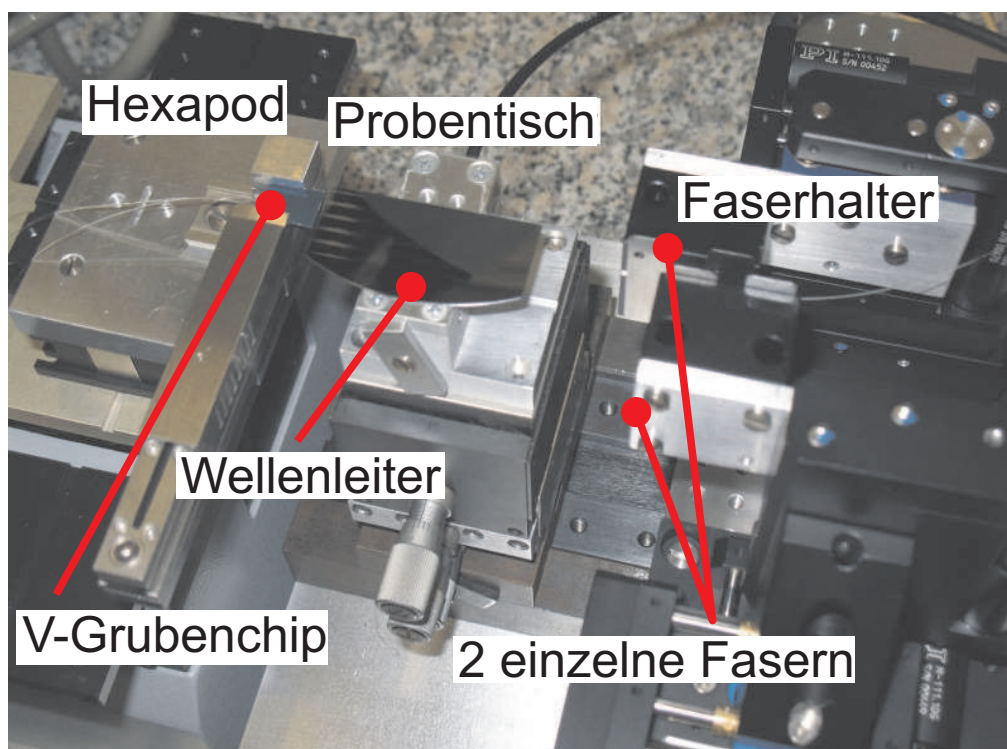
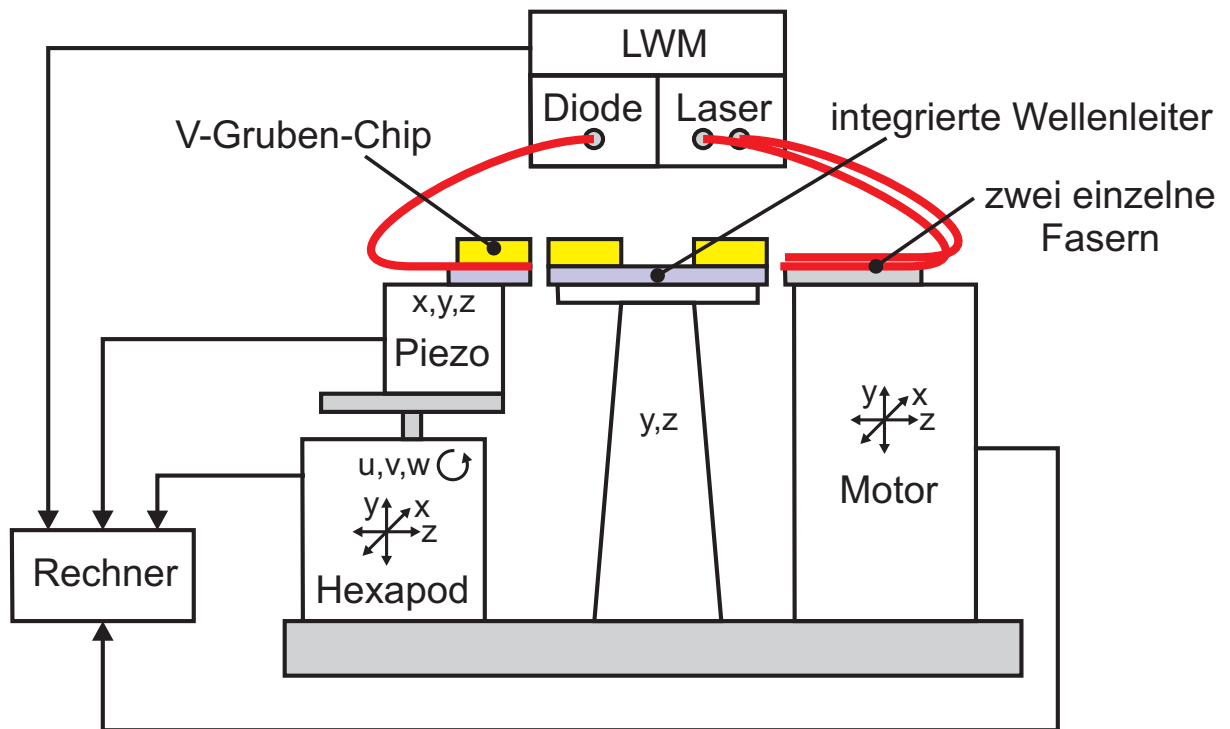


Abbildung 6.2: Skizze und Foto des Aufbaus zur Vermessung und Verklebung von Faser-Arrays an integriert-optische Wellenleiter

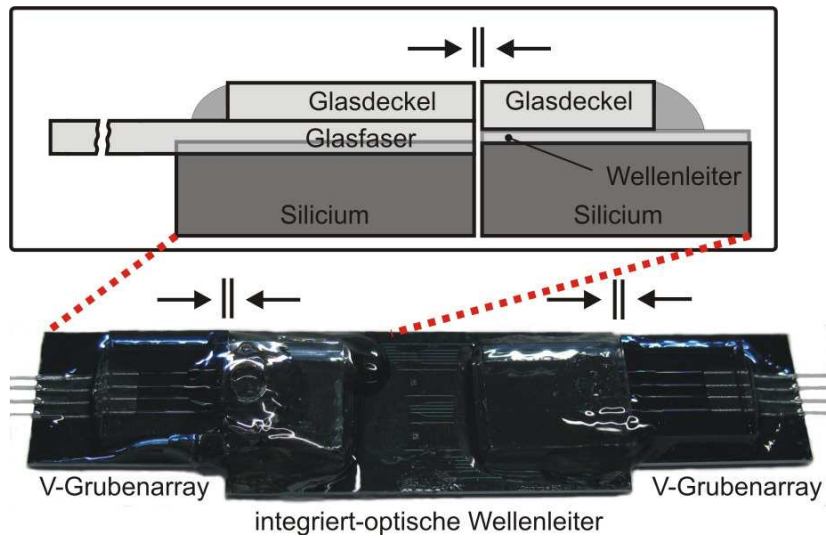


Abbildung 6.3: Wellenleiterchip beidseitig an V-Gruben-Array gekoppelt und verklebt.

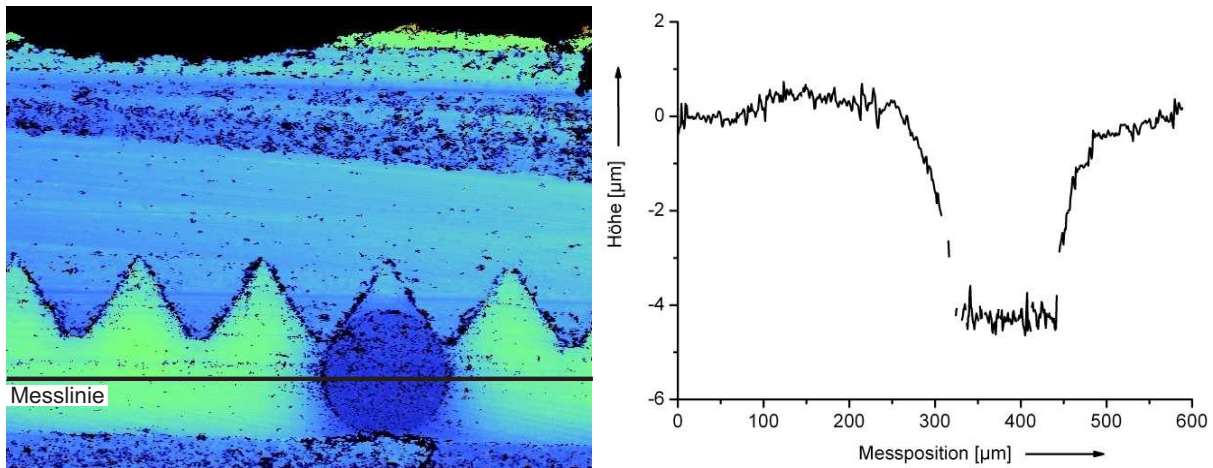


Abbildung 6.4: Rauigkeitsmessung mit Weißlichtinterferometer (Veeco) einer gesägten V-Grube, welche mit Faser bestückt ist, Klebstoff steht ca. 4 μm hervor.

Problematik des hervor quellenden Klebstoffs zeigt sich ein weiteres Phänomen mit negativer Auswirkung auf die Faser-Chip Kopplung: durch das relativ lang überstehende Sägeblatt, welches erforderlich ist, um eine Schnitttiefe von mindestens 3 mm erreichen zu können, verbiegt sich das Blatt und es entsteht eine leicht Schräge Stirnfläche. Eine Politur der Stirnflächen ist folglich notwendig. Die polierte Stirnfläche weist eine Rauigkeit von 30 nm auf. Stellenweise treten Riefen mit einer Tiefe von $0,23\text{ }\mu\text{m}$ auf. Zur Politur wurden Polierscheiben bis zu einer Körnung von $1\text{ }\mu\text{m}$ verwendet.

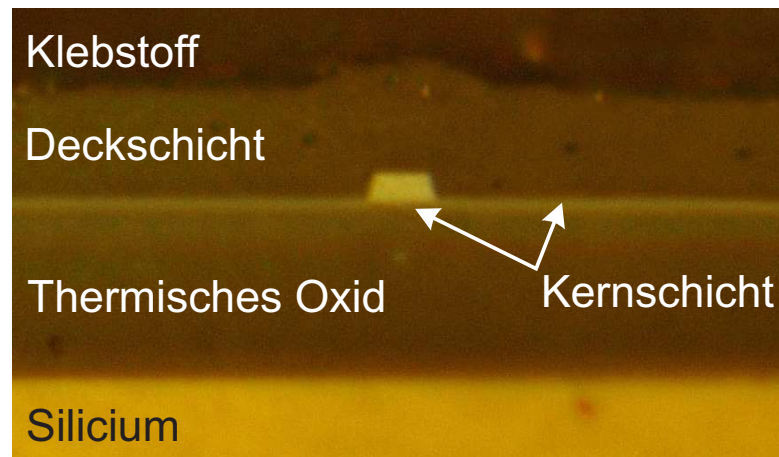


Abbildung 6.5: *Optische Mikroskopaufnahme 2000-fache Vergrößerung von polierter Wellenleiter-Stirnfläche*

6.4 Messungen und Ergebnisse

Bevor auf die Dämpfungsmessungen eingegangen wird, sollen an dieser Stelle einige Randbedingungen erläutert werden.

Die gesamte Dämpfung eines Wellenleiter-Chips mit angekoppelten Ein- und Ausgangsfasern setzt sich im wesentlichen aus drei Beiträgen zusammen: der Dämpfung des integriert optischen Wellenleiters in $\frac{dB}{cm}$, den Verlusten an den beiden Koppelstellen zwischen Glasfaser und Wellenleiter-Chip sowie den Verlusten durch das Spleißen der hoch brechenden Spezialfasern an die SMF28-Fasern.

Die Wellenleiterdämpfung ist sehr schwierig zu bestimmen, da sich die Verluste an den Koppelstellen überlagern. So genannte „Cut-Back“ Messungen werden häufig angewendet. Dies scheidet in diesem Fall aus, da die Wellenleiterdämpfung zu gering ist. In [1] wird für die verwendete Wellenleitertechnologie eine Dämpfung zwischen $0,2$ und $0,05 \frac{dB}{cm}$ für das C-Band angegeben ($1530 - 1565\text{ nm}$). Diese Messwerte beruhen auf einer Dämpfungsmessung gerader Wellenleiter bei welchen der theoretische Koppelwert zwischen Faser und Wellenleiter eingerechnet wurde. Für die folgenden Messungen besteht somit nicht die Möglichkeit die Wellenleiterdämpfung genau einzubeziehen. Für diese Arbeit ist es nicht von Relevanz, wie hoch die Wellenleiterdämpfung ist oder wie hoch die Kopplungsdämpfung durch Modenfehlanspassung ist. Das Ziel ist hier herauszufinden mit welcher Präzision die Komponenten gefügt oder anders ausgedrückt, welche Dämpfung durch die Justage

und Klebetechnik verursacht wird.

Vor der festen Verbindung von Fasern und Wellenleiter-Chip werden Dämpfungsmessungen mit einzelnen Fasern an den integriert optischen Wellenleitern durchgeführt. Verwendet werden UHNA4 Fasern, da die Wellenleiter an diese Faser angepasst sind. Bei der Messung werden die Spleißstellen nicht mitgemessen. Man erhält somit die Dämpfung des Wellenleiters überlagert mit der Koppeldämpfung vom Ein- und Ausgang. Die Wellenleiter-Chips haben eine Länge von 26 mm.

In einer ersten Versuchsreihe wurden Glasfasern einzeln an Wellenleiter geklebt. Hierfür wurden PWG1-XP-Fasern in V-Gruben Chips eingeklebt. In einem Fall wurden gesplattete (engl. „cleaved“) Fasern mit glatter Facette so eingeklebt, dass sie 50 μm über den Silicium-Chip hinausragen. Somit kommt die Faser sehr nahe an den Wellenleiter heran. In einem weiteren Versuch wurde jeweils eine Faser in einen V-Gruben Chip eingeklebt, ein Glasdeckel aufgebracht und die Stirnfläche gesägt und anschließend poliert (wie in Abbildung 6.3 dargestellt). Die Gesamtdämpfung an einem geraden Wellenleiter betrug bei der überstehenden Faser 3,7 dB. Die Referenzmessung mit UHNA4 Fasern belief sich auf 1,7 dB. 2,0 dB Dämpfung sind auf die Spleißstellen, das Verkleben und den zusätzlichen Beitrag durch die PWG1-XP-Fasern zurückzuführen. Die Spleiße verursachen 0,3 dB Dämpfung. Wie bereits zuvor geschildert sind die Wellenleiter auf UHNA4 Fasern optimiert worden. Würde man die Wellenleiter auf die PWG1-XP-Fasern optimieren, so könnte die Dämpfung um 0,46 dB pro Koppelstelle reduziert werden. Folglich verursacht das Fügen der Fasern rechnerisch eine zusätzliche Dämpfung von 0,39 dB pro Koppelstelle. Der Unterschied zu Referenzmessung mit einzelnen Fasern liegt vermutlich daran, das während des Aushärtevorgangs des Klebstoffs durch dessen Schrumpfung die Faser unkontrolliert verschoben wird. Dies ist vor allem auf den relativ großen Abstand zwischen den Fügeteilen (50 μm) zurück zu führen. Diese und die folgenden Messergebnisse sind zur Verbesserung der Übersicht in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Montageform	Gesamt	WL	Spleiß	Δ PWG-UHNA4	Fügung
überstehend	3,7 dB	1,7 dB	0,3 dB	0,46 dB	0,78 dB
gesägt/pol.	5,6 dB	2,1 dB	0,3 dB	0,46 dB	2,28 dB
2Fas. pol. a)	5,4 dB	3,4 dB	0,3 dB	0,46 dB	0,68 dB
2Fas. pol. b)	4,9 dB	3,3 dB	0,3 dB	0,46 dB	0,38 dB

Tabelle 6.1: Dämpfungsmessungen der verklebten Faser-Wellenleiter Kopplungen; WL: Wellenleiterdämpfung, Spleiß: Dämpfung von zwei PWG1-XP zu SSMF Spleißstellen, Δ PWG-UHNA4: Dämpfung verursacht durch Modenfehlanspassung der PWG1-XP-Faser zum Wellenleiter (muss zwei mal berücksichtigt werden), Fügung: Resultierende Dämpfung verursacht durch Justagefehler beim Fügevorgang

Beim zweiten Versuch, bei welchem die Faser bündig mit dem Glasdeckel und dem V-Grubenchip abschließt, wurde eine höhere Dämpfung gemessen. Die Gesamtdämpfung betrug 5,6 dB bei einer Wellenleiter- und Koppeldämpfung von 2,28 dB. Somit ist die Dämpfung um 1,5 dB pro Koppelstelle höher als bei der vorstehenden Faser. Die erhöhte

Dämpfung rührt vermutlich von schief polierten Endflächen her, so dass die Chips nicht nahe genug zueinander positioniert werden konnten. Bei einem dritten Versuch wurde noch einmal Wert auf eine möglichst senkrechte Politur der Chip-Endflächen gelegt. Bei diesem Versuch wurden zwei Fasern in V-Gruben-Arrays montiert. Die radiale Abweichung der Fasern zueinander wurde messtechnisch zu $0,25 \mu m$ bestimmt. Tabelle 6.1 zeigt die Messergebnisse beider Kanäle. Die höhere Gesamtdämpfung rührt daher, dass keine geraden Wellenleiter sondern Koppler verwendet wurden. Durch die exaktere Politur konnten die Dämpfungen hervorgerufen durch das Fügen leicht reduziert werden. Für die beiden Fasern wurden $0,68 dB$ und $0,38 dB$ gemessen. Die radiale Abweichung der Fasern zueinander wird den geringsten Beitrag zur Dämpfung liefern. Der radiale Versatz sorgt für einen Fehler von etwa $0,1 dB$. Der größte Beitrag wird auch hier einer schrägen Politur oder Fehlpositionierung der Chip-Endflächen zuzuordnen sein. Durch einen axialen Sägeschnitt an der Fügestelle wurde ein axialer Abstand bei der schlechteren Faser von etwa $5 \mu m$ gemessen. Dies entspricht einer Dämpfung von $0,3 dB$ (gemessen). Dies passt zu den Messwerten (2Fas. pol. a/b) in Tabelle 6.1.

6.5 Zusammenfassung & Auswertung

Wie in Abschnitt 6.1 erläutert bietet die verwendete Koppeltechnik mit Spezialfasern grundsätzlich den Vorteil geringer Einfügedämpfungen. Die Ergebnisse erster Fügeversuche zeigen, dass die feste Verbindung der Spezialfasern mit den integriert-optischen Wellenleitern mit geringen Dämpfungen möglich ist. Die Ergebnisse können noch weiter verbessert werden, indem Justagemarken auf den Chips vorgesehen werden, so dass vor dem Fügevorgang der laterale Winkel und der axiale Versatz der Chips vermessen werden kann. Es ist auch nicht auszuschließen, dass noch ein geringer vertikaler Winkelfehler trotz der Endflächen-Politur zurückgeblieben ist. In der Summe sollten diese Maßnahmen dazu beitragen den Spalt zwischen den Chips weiter zu reduzieren.

Bei den Ergebnissen wurde die Modenfehlpassung zwischen PWG1-XP und Wellenleiter eingerechnet. Die Wellenleitergeometrie ist, wie schon beschrieben, auf die UHNA4 Faser abgestimmt. Die Anpassung auf die PWG1-XP-Faser sollte ohne weiteres möglich sein. Durch den geringfügig größeren Modenfelddurchmesser sind jedoch leicht größere Biegeradien der Wellenleiter erforderlich, um die gleichen Wellenleiter Dämpfungswerte erreichen zu können.

Kapitel 7

Glasfaser Greifwerkzeuge

Zur Handhabung und Fügung von Glasfasern werden hochpräzise Greifwerkzeuge benötigt. Zur Faser-Chip Montage müssen die Fasern üblicherweise auf einer Länge von weniger als 100 mm gegriffen werden, um die Faser auf dem Chip und im Gehäuse exakt positionieren zu können. Der über diese Länge hinausgehende Teil der Faser, welcher zur Verbindung der montierten Komponente mit anderen Geräten dient (z.T. mit Steckverbinder), kann aufgerollt im Fasermagazin verbleiben [74]. Die geeigneten Greifprinzipien für Glasfasern lassen sich im Ausschlussverfahren bestimmen. In [75] werden die Vor- und Nachteile der bekannten Greifprinzipien im Hinblick auf die Mikromontage dargestellt. Die Einteilung der Prinzipien erfolgt dort nach dem physikalischen Wirkprinzip (siehe [76]). Die Greifer werden in zwei Obergruppen, mechanische Greifer und Haftgreifer, eingeteilt. Die Gruppe der mechanischen Greifer beinhaltet s.g. Fingergreifer und Klemmgreifer, welche sich weniger für die Fasermontage eignen. Dies liegt bei den Fingergreifern an der Baugröße und bei den Klemmgreifern am zu geringen Eigengewicht der Faser bzw. der fehlenden Justierbarkeit der Haltekraft. Die Anpassbarkeit ist jedoch wichtig zur Flexibilisierung eines Greifersystems [77].

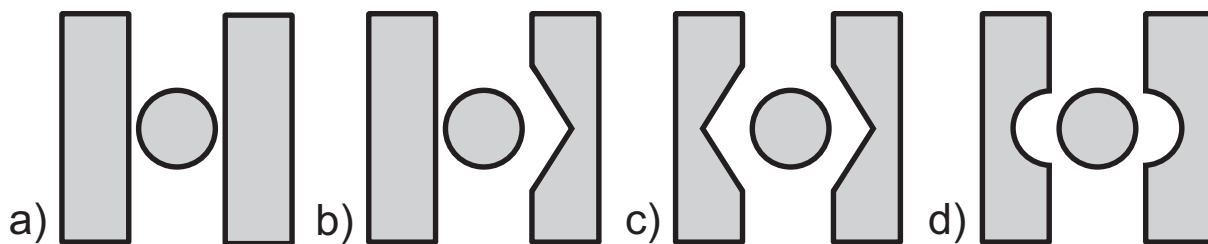


Abbildung 7.1: Mögliche Greiferbackenformen für mechanische Fasergreifer:
a) Flachbacken, b) Flachbacke/Prismenbacke, c) Prismenbacken d) Rund- oder Elliptische Backen [75] [78]

Zangengreifer können bei entsprechender Größe verwendet werden. Zwei Greiferbacken, welche die Faser fest umschließen sind in der Lage die Faser in allen Raumrichtungen verlässlich zu führen. Der Nachteil besteht darin, dass diese Greifer aufgrund der Baugröße

und der Tatsache, dass sie die Faser umschließen, vorwiegend außerhalb eines Siliciumchips eingesetzt werden können. Die möglichen Formen der Greiferbacken für die Handhabung von Glasfasern sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Laut [75] ist Version (7.1 c) mit zwei Prismenbacken am besten geeignet, da sie eine gute Zentriergenauigkeit mit vergleichsweise geringer Faserbeanspruchung vereinen. Die Rund- oder Elliptischen Backen (7.1 d) beanspruchen die Faser stark, die Flachbacken (7.1 a) bieten keine Zentrierung der Faser und die Kombination aus Prismen- und Flachbacken (7.1 b) bietet bei fast gleichen Eigenschaften zum Prismenbackengreifer eine geringere Zentrierfähigkeit.

Haftgreifer, insbesondere Vakuumbreifer, welche nur an der Faseroberseite angreifen, sind in der Lage die Fasern direkt nebeneinander in Vertiefungen (Faserführungsstrukturen wie z.B. V-Gruben) zu positionieren (siehe Abbildung 7.2). Die alleinige Verwendung

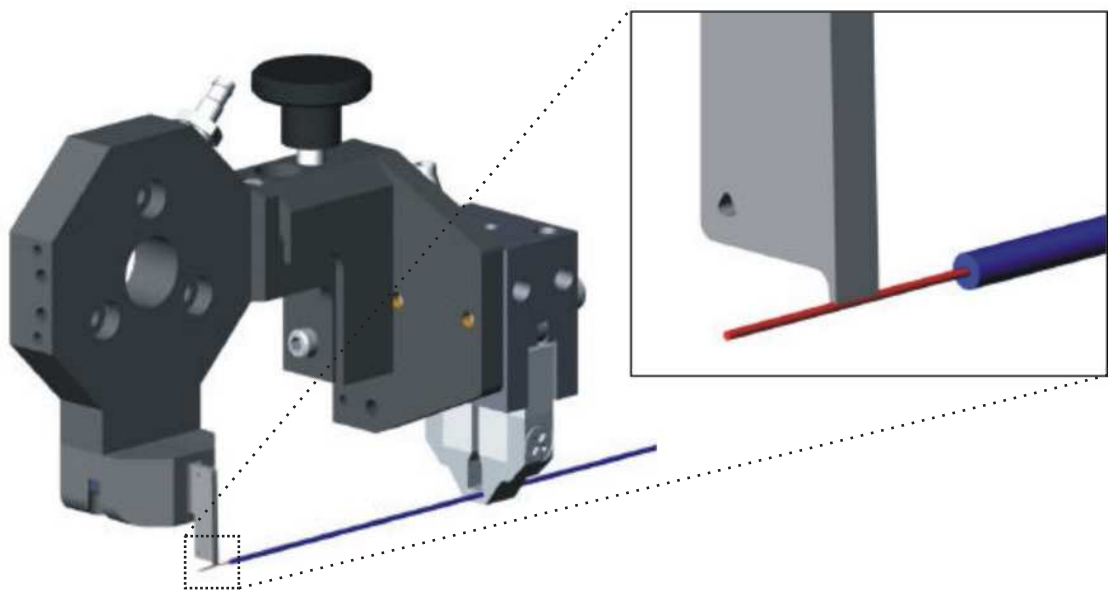


Abbildung 7.2: Skizze eines Glasfaser-Greifwerkzeugs der Firma Milasys Technologies GmbH [79]

von Vakuumbreifern scheidet aus folgenden Gründen aus:

- Aufgrund der Baugröße sind relativ geringe Haltekräfte zu erwarten
- aus geringen Haltekräften resultieren sehr geringe Reibungskräfte (vor allem bei Glas/Stahl/Silicium Oberflächen), so dass nur in einer Raumrichtung (parallel zur Saugrichtung) eine Fixierung der Faser möglich ist

Somit bietet sich die Kombination aus Vakuum und Zangengreifer an. Der Zangengreifer kann die ummantelte Faser greifen und der Vakuumbreifer hält lediglich ein sehr kurzes Stück der Faser, welches auf dem Chip gefügt werden soll. Statt des Vakuums können auch elektrostatische Kräfte genutzt werden, um Fasern zu greifen. Da hierbei die erreichbare Kraft nicht ausreicht, um gegen eine eventuell vorhandene Eigenbiegung der Faser anzukommen, kann sie nicht zum Greifen verwendet werden. Im Umkehrschluss muss ein Abrutschen der Faser vom Greifer verhindert werden, indem die Vakuum-Saugkraft größer

als die Kräfte der Eigenbiegung und der elektrostatischen Aufladung der Faser ist. Da die Faser nur in einer Dimension klein ist, spielen die elektrostatischen Oberflächeneffekte wie Van-der-Waals Kräfte und elektrostatische Oberflächenladungen beim Ablegen der Faser keine große Rolle. Durch ein geeignetes Reinigungsverfahren wird die elektrostatische Aufladung der Faser verhindert. Das Absetzen der Fasern bedarf keiner besonderen Strategien, wie es in [80] für Mikro-Bauteile beschrieben wird.

Die Firma Milasys hat einen kombinierten Vakuum und Zangengreifer für Glasfasern entwickelt [81]. Der „Combi-Grip“ besteht aus einem mittig angeordneten Vakuumgreifer und einem bzw. zwei pneumatisch betriebenen Zangengreifern. Wenn sich zwei Greifer rechts und links neben dem Vakuumgreifer befinden, können Chips wenn nötig von zwei Seiten bestückt werden, ohne ihn um 180 Grad drehen zu müssen; vergl. Kapitel 8.1 [79]. Der Vakuumgreifer wird mit Hilfe des DRIE Trockenätzverfahrens aus Silicium hergestellt (siehe Abbildung 7.2). Der Zangengreifer kann mittels einer Schraube in der Höhe verstellt werden, so dass die Faser in die gleiche Höhe wie der Vakuumgreifer gebracht werden kann. Die Höhenverstellung wird jedoch auch notwendig, wenn nur der Vakuumgreifer verwendet werden soll oder beidseitig montiert wird, da der Greifer ansonsten auf dem Chip oder der Montageplattform aufsetzen kann. Zur automatisierten Montage von größeren Faserchips, wie dem in Abschnitt 8.1 beschriebenen Faserschalter, muss ein Greifer folgende Eigenschaften aufweisen:

- bei langen entmantelten Faserstücken muss die Faser an mehreren Stellen geführt werden, um die Eigenbiegung der Faser zu unterbinden
- bei langen entmantelten Faserstücken sollten mindestens zwei Vakuum Fasergreifer verwendet werden, wobei einer am Chipende aufsetzt, um den mechanischen Greifer vom Vakuumgreifer zu entkoppeln (siehe Abschnitt 7)
- die manuelle Höhenverstellung des Zangengreifers muss durch eine automatisierte Variante ersetzt werden
- Für die Qualitätskontrolle wäre eine Positionsmarkierung hilfreich, damit die Position des Greifers relativ zur V-Grube des Chips überprüft werden kann

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen und der Tatsache, dass die Herstellung der Vakuumgreifer mittels DRIE bei kleinen Stückzahlen und großen Bauteilen teuer ist, wurden Alternativen erarbeitet, die lediglich durch nasschemische Ätzung mit Kalilauge (KOH) im so genannten Batch Verfahren hergestellt werden können.

7.1 Vakuumgreifer

Die Vakuumgreifer müssen Glasfasern mit einem Durchmesser von $125\ \mu\text{m}$ greifen und direkt neben andere Fasern setzen können. Derartige Greifer sind auch für geometrisch ähnliche Komponenten wie zum Beispiel Linsen, Kapillare und Drähte geeignet. Neben den einleitend beschriebenen Forderungen spielen noch weitere Faktoren eine Rolle. Um

ein genaues Anforderungsprofil erstellen zu können, müssen die zu montierenden Komponenten und die Montageanlage näher betrachtet werden. Das ideale Ziel besteht darin, einen möglichst flexiblen, aber dennoch perfekt auf die Montageaufgabe abgestimmten Greifer zu entwickeln, der in eine automatisierte Anlage integrierbar ist (siehe auch [82]). Darüber hinaus sollte er kostengünstig als Massenprodukt herstellbar sein und eine lange Lebensdauer aufweisen. Aus der Forderung, Fasern direkt nebeneinander positionieren zu können, folgt, dass die Greiferspitze maximal $125\ \mu\text{m}$ breit sein darf, wenn es sich um einen Greifer ohne Führungsstruktur handelt. Die funktionellen Teile des Greifers sollten möglichst aus einem Teil gefertigt werden, um die Montage- und Justagekosten bei der Herstellung zu minimieren. Als Material zur Herstellung des Vakuumgreifers ist Silicium ideal geeignet, da aus der Halbleiterindustrie Fertigungsverfahren existieren, die den Anforderungen an die Genauigkeit, Oberflächengüte und Massenfabrikation gewachsen sind. Darüber hinaus bietet Silicium im Vergleich zu metallischen Werkstoffen den Vorteil, dass es sich bis zum Bruchpunkt nahezu nicht plastisch verformt und hohen Zug- und Druckkräften widerstehen kann. Dies ist vor allem notwendig, wenn auf einen Abstandssensor zwischen Greifer und Chip verzichtet werden soll und die Faser unter leichtem Druck gefügt werden soll. Die Haupt Fehlerquellen bei der Positionierung des Greifers in vertikaler Richtung sind die Dicketoleranzen der Wafer und eines eventuellen Gehäuses. Die Waferdicke schwankt üblicherweise zwischen $10 - 25\ \mu\text{m}$. Die fehlerhafte Positionierung der Motoreinheit verursacht einen vergleichsweise niedrigen Fehler (Abschnitt 8.5.1). Diese setzt sich aus der absoluten Wiederholgenauigkeit und einem evtl. Überschwingen der Positionsregelung zusammen. Die Ungenauigkeit des Faserdurchmessers ist relativ gering und kann hier vernachlässigt werden. Zur Sicherheit werden im Folgenden Greifer entwickelt, die so flexibel sind, dass eine Fehlpositionierung von bis zu $50\ \mu\text{m}$ zu keiner Zerstörung des Greifers führt [83].

Als Herstellungsverfahren bietet sich das anisotrope Ätzen mittels Kaliumhydroxid Lösung (KOH) an (siehe hierzu Abschnitt 3.2).

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Montage werden in dieser Arbeit Faserschalter als Beispiel-Objekt herangezogen (siehe Abschnitt 8.1). Beim Faserschalter, wie er von Kopka et al. (siehe [4][22]) entwickelt wurde, werden Fasern nahezu direkt nebeneinander positioniert. Eine weitere Besonderheit ist die zu montierende Länge der entmantelten Fasern. Diese kann bis zu $35\ \text{mm}$ betragen. Somit müssen sehr hohe Winkel und Positionsgenauigkeiten über einen verhältnismässig großen Weg eingehalten werden. Da hohe Wiederholgenauigkeiten für den Greifer gefordert werden, ist die Verwendung von Führungsstrukturen unerlässlich. Hieraus ergeben sich zwei Nachteile: erstens wird der Greifer hierdurch noch filigraner und somit anfällig für Beschädigungen und zweitens wird die Anforderung an die Positioniergenauigkeit erhöht, da die Faser beim Einsetzen in den Chip durch zwei gegenüberliegende Führungsstrukturen geführt wird.

Der Greifer sollte die Faser an mehreren Stellen der entmantelten Länge in Position halten, um der Eigenbiegung der Faser zu begegnen. Damit möglichst viele Bereiche mit Hilfe der Bildverarbeitung überwacht werden können und gegebenenfalls Klebstoff aufgebracht werden kann, sollte keine durchgehende Führungsstruktur verwendet werden, sondern mehrere unterbrochene Stege.

Um ein Höchstmaß an Flexibilität zu gewährleisten, werden nur einzelne Fasern montiert. Somit können beliebige laterale Faserabstände und Positionen von Faserendflächen mit Hilfe eines Greifers montiert werden. Zur Erhöhung der Parallelität müssten die Greifer-Führungsstrukturen in zwei Raumrichtungen gegeneinander justierbar sein. Die

Entwicklung eines solchen Greifers war jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Ein weiterer wichtiger Punkt besteht darin, dass der mechanische Zangengreifer zwar theoretisch die Genauigkeit der Vakuumbreifer erreichen kann (siehe [84]). Bei der Fasermontage muss jedoch beachtet werden, dass der Durchmesser des Fasermantels, welcher gegriffen werden muss, um die Faser nicht zu beschädigen, relativ ungenau ist. Darüber hinaus würden Ungenauigkeiten im Fasermagazin und bei der Greiferkalibrierung zu Montagefehlern führen. Zweckmäßig ist die Entkopplung der beiden Greifer voneinander, indem ein Vakuumbreifer am Rand des Chips positioniert wird. Hierdurch werden die Anforderungen an das Magazin reduziert und die Greifer-Genauigkeit verbessert.

7.1.1 Greiferkonzepte

Mit Hilfe des anisotropen, nasschemischen Ätzverfahrens lassen sich zwei Grundtypen entwickeln. Legt man den Vakuumkanal in die Waferenebene, so müssen zwei Chips zusammen gefügt werden, damit sich ein geschlossener Kanal ergibt (vertikaler Greifer). Diese Greifer sind folglich doppelt so dick wie ein Wafer. Breitere Greifer lassen sich herstellen, indem der Vakuumkanal senkrecht zur Waferoberfläche verläuft (horizontaler Greifer). Die Breite wird somit nur durch den Waferdurchmesser begrenzt, da nun die Höhe des Greifers durch die Dicke des Wafers bestimmt wird. In Abbildung 7.3 sind die möglichen Konfigurationen dargestellt. Es ergeben sich vier Möglichkeiten, wenn man die Lage der Vakuumkanäle mit den beiden Wafer-Kristallorientierungen $\langle 100 \rangle$ und $\langle 110 \rangle$ kombiniert. Die verschiedenen Formen der Greifer rühren von den unterschiedlichen Kristallorientierungen her. So können mit Hilfe des $\{100\}$ -Materials V-, bzw. pyramidenförmige Gruben hergestellt werden und mit Hilfe des $\{110\}$ -Materials rautenförmige Strukturen. Außenliegende Strukturen werden z.T. mit Hilfe eines abschließenden Sägevorgangs erstellt.

Wie aus der Abbildung 7.3c ersichtlich ist, bietet der vertikale $\langle 100 \rangle$ -Greifer keine ausreichende Vakuumversorgung, da die V-Gruben in Ihrer Breite nur begrenzt zu vergrößern sind und die Tiefe des Wafers nicht ausgenutzt wird.

Der horizontale $\langle 110 \rangle$ -Greifer hat ähnliche Eigenschaften wie der horizontale $\langle 100 \rangle$ -Greifer, jedoch ist die Möglichkeit der Faserführung begrenzt. Die beiden vielversprechendsten Konzepte sind der $\langle 110 \rangle$ -Vertikal Greifer und der $\langle 100 \rangle$ -Horizontalgreifer.

Der vertikale $\langle 110 \rangle$ -Greifer ist gut geeignet für kurze entmantelte Faserstücke (bis zu $10 - 15 \text{ mm}$), da er nur punktuell angreift und ein Einsatz mehrerer Greifer, die zueinander ausgerichtet sind, zu aufwändig wäre. Der horizontale Greifer bietet die Möglichkeit mehrere Stege mit Vakuumansaugung zu versehen, welche zueinander exakt ausgerichtet sind, da sie lithographisch in einem Stück herstellbar sind. Die erreichbaren Haltekräfte sind beim horizontalen $\langle 100 \rangle$ -Greifer höher als beim vertikalen $\langle 110 \rangle$ -Greifer, da die Öffnungen für Vakuumkanäle größer dimensioniert werden können.

Im Folgendem sollen die beiden vielversprechendsten Konzepte miteinander verglichen werden, der horizontale $\langle 100 \rangle$ -Greifer und der vertikale $\langle 110 \rangle$ -Greifer (siehe auch Tabelle 7.3). Die Berechnung der Biegebalken-Strukturen zum Schutz der empfindlichen Greiferspitzen erfolgt mit Hilfe des FEM-Werkzeugs „Ansys Workbench“ der Firma CadFem, einem kommerziell erhältlichen Simulationsprogramm [85]. Zur Berechnung wurden die in Tabelle 7.1 angegebenen Materialkonstanten verwendet. Der Silicium Bruchpunkt liegt

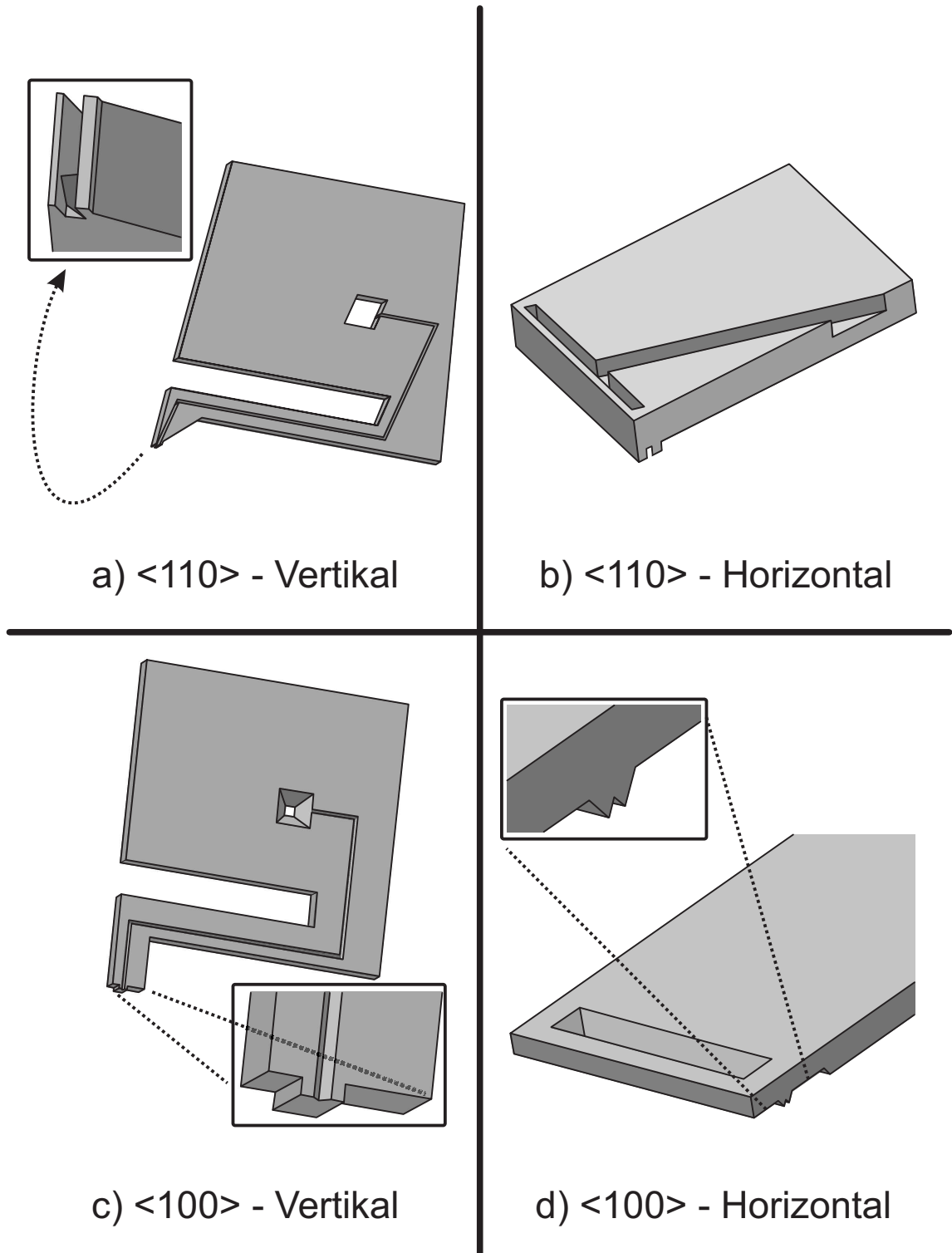


Abbildung 7.3: Greiferkonzepte: a,b) vertikaler und horizontaler $\langle 110 \rangle$ -Silicium Greifer; c,d) vertikaler und horizontaler $\langle 100 \rangle$ -Silicium Greifer

laut [86] bei 7 GPa . Zur Sicherheit wurde 1 GPa als Grenzwert angesetzt.

E-Modul	169 MPa
Poisson Zahl	0,279
Oberflächen Reibungskoeffizient	0,15
Silicium Bruchpunkt	7 GPa

Tabelle 7.1: Silicium Materialparameter zur Simulation der Biegeeigenschaften und Robustheit der Vakuumgreifer [26][31]

Der Reibungskoeffizient der Faserführung wurde mit Hilfe einer Faser, welche durch zwei aufeinander liegende V-Gruben aus Silicium gezogen wurde, abgeschätzt. Die Oberflächenrauigkeit wurde mit Hilfe eines Weißlichtinterferometers bestimmt (Veeco NT1000). Die Rauigkeit betrug 25 nm .

7.1.2 Horizontaler $\langle 100 \rangle$ -Silicium Greifer

Der in Abbildung 7.4 dargestellte horizontale Fasergreifer wurde entwickelt, damit Fasern von zwei gegenüberliegenden Seiten in einen Chip eingelegt werden können, ohne den Chip drehen zu müssen. Die einzelnen Stege des Greifers wurden so dimensioniert, dass eine Fehlpositionierung in vertikaler Richtung (Z-Richtung) von bis zu $50\text{ }\mu\text{m}$ möglich ist. Die drei Stege auf der linken Seite sind 5 mm breit und die Stege auf der rechten 3 mm . Die Länge beträgt bei allen 15 mm . Die unterschiedliche Stegbreite rührt daher, dass beim Faserschalter-Chip auf der Ausgangsseite nicht genug Raum für größere Stege zur Verfügung steht. Die Führungsgruben der Faser sind versetzt angeordnet zwischen der rechten und linken Greiferseite. Somit wird sichergestellt, dass bereits montierte Fasern nicht durch den Greifer berührt werden können. Die einzelnen Greifer-Stege sind so angeordnet, dass die zu montierende Faser an den wichtigen Stellen des Faserschalter-Chips geführt wird. Dies sind der Chip-Rand und Bereiche mit V-Gruben. Auf der Eingangsseite des Chips (linke Greiferseite) befindet sich mittig ein zusätzlicher Steg, um ein Verbiegen der Faser zu unterbinden. Durch die Positionierung des äußersten Stegs auf den Chip-Rand, wird eine Entkopplung zwischen Zangen- und Vakuumgreifer ermöglicht. In der Mitte des Greifers wurde ein Steg mit einer Markierung für die Bildverarbeitung vorgesehen. Hiermit ist es möglich visuell die Position zwischen Greifer und zu montierendem Chip zu kalibrieren und zu prüfen. Die Markierung besteht aus geätzten V-Gruben, die ein Kreuz bilden (siehe Abbildung 7.4). Die geätzte Positionsmarkierung hat gegenüber metallischen Markierungen den Vorteil, dass auch bei schlechter Fokussierung des Objektivs des Bildverarbeitungs-Systems eine Kantendetektion durchgeführt werden kann. Metallische Oberflächen reflektieren das einstrahlende Licht so stark, dass kein ausreichender Kontrast mehr besteht. Eine fehlerhafte Fokussierung entsteht bei diesem Greifer, da sich das Positionskreuz auf der Oberseite des unteren Greiferteils befindet. Da die unterschiedlichen Stege in einem Prozessschritt hergestellt wurden, sind die einzelnen Greifer exakt zueinander ausgerichtet und eine aufwändige Kalibrierung wie bei den

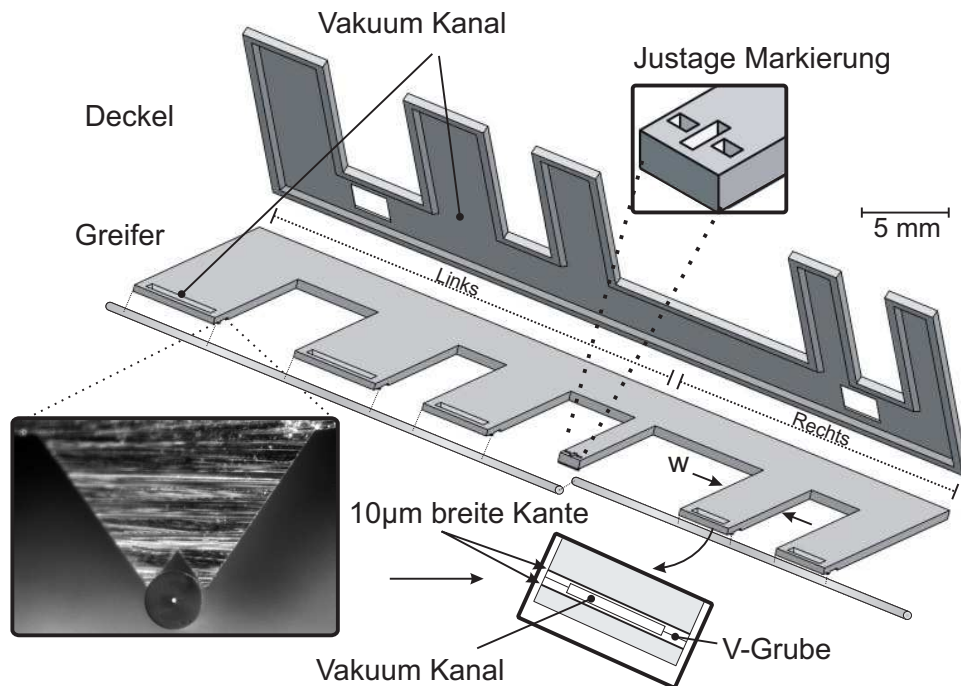


Abbildung 7.4: *Silicium Vakuum Greifer aus {100}-Wafermaterial bestehend aus zwei Seiten mit jeweils drei bzw. 2 Stegen mit Vakuumgreifern, mittig angeordnet befindet sich ein Steg mit integriertem Montagekreuz*

vertikalen $\langle 110 \rangle$ -Greifern entfällt.

Die V-Gruben zur Faserführung sind $100\ \mu\text{m}$ breit. Die rückseitigen Öffnungen für den Vakuumkanal haben eine Breite von $700\ \mu\text{m}$ und bei einem $5\ \text{mm}$ breiten Steg eine Länge von $4\ \text{mm}$. Hierdurch kann maximal ein Vakuumkanal von $4\ \text{mm} \times 100\ \mu\text{m}$ hergestellt werden (siehe Abbildung 7.6). Die Stege neben der Faserführung haben eine Breite von $10\ \mu\text{m}$, damit benachbarte Fasern bei der Montage nicht berührt werden. Sollen mehrere Fasern gleichzeitig gegriffen werden, muss der Greifer entsprechend erweitert werden. Für geringe Rasterabstände der Fasern, entstehen sehr instabile Strukturen. Somit müssten kleinere Löcher mit Hilfe anderer Technologien hergestellt werden. Für kleine Stückzahlen bietet sich die Vorbehandlung mit Hilfe elektrischer Durchschläge an (siehe Abschnitt 4.3.3). Auch andere Verfahren, wie das DRIE-Ätzen und das Laser-Bohren sind einsetzbar.

FEM-Analyse

Mit Hilfe des kommerziell erhältlichen Simulationsprogramms Ansys Workbench, wurde der Greifer auf seine Robustheit geprüft [85]. In Abbildung 7.5 sind die Ergebnisse für eine Verschiebung des Greifers von $50\ \mu\text{m}$ gegen eine Glasfaser dargestellt. Die maximal auftretende Spannung beträgt $259,5\ \text{MPa}$ und liegt somit deutlich unterhalb des angenommenen Grenzwertes von $1\ \text{GPa}$. Die Maxima der Spannung treten im äußeren Bereich der V-Grube zur Faserführung auf, wo sich kein Vakuumkanal befindet.

Durch die vertikale Fehlpositionierung tritt ebenfalls eine horizontale Verschiebung der Greiferspitze auf. Bei der maximalen Fehlpositionierung von $50\ \mu\text{m}$ verschiebt sich die

Greiferspitze um $5,4 \mu\text{m}$. Eine korrekte Faserpositionierung erfordert somit bei großen vertikalen Fehlern eine Lagekorrektur.

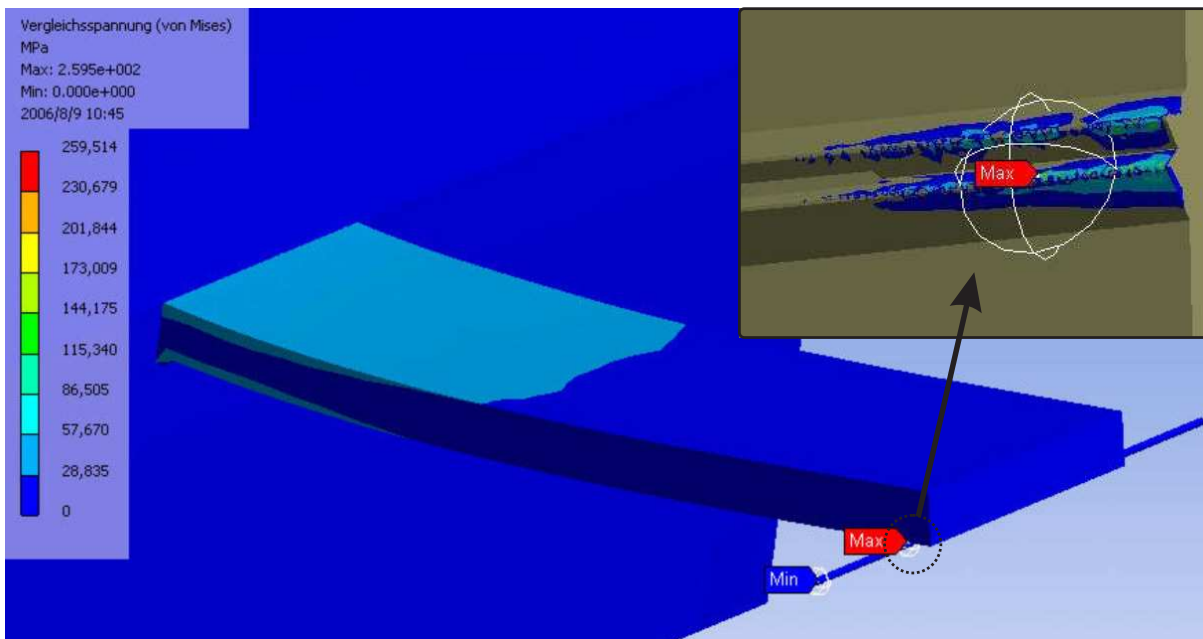


Abbildung 7.5: FEM-Analyse des horizontalen $\langle 100 \rangle$ -Greifers: dargestellt sind eine überhöhte Gesamtverformung sowie farbig gekennzeichnet die Gesamtspannung; rechts oben befindet sich eine Detailvergrößerung der V-Grube am Greiferrand.

Herstellung

Zur Herstellung des horizontalen $\langle 100 \rangle$ -Greifers wird das in Abschnitt 3.2.2 beschriebene anisotrope Ätzverfahren mittels KOH-Lösung verwendet. Die $525 \pm 25 \mu\text{m}$ dicken Silicium Wafer sind beidseitig mit 100 nm dickem Siliciumnitrid (Si_3N_4) beschichtet. Für den Greifer werden zwei Chips benötigt, der eigentliche Greifer und ein Deckel, welcher die Vakuumversorgung gewährleistet. Zur Strukturierung der Nitridschicht wird ein positiver Fotolack aufgeschleudert (ARU-4040, [28]). Mit Hilfe einer elektronenstrahlgeschriebenen Maske wird der Lack belichtet und dann entwickelt. Da es sich hierbei um einen Standardprozess handelt, soll nicht weiter darauf eingegangen werden. Die Nitridmaskierung des Greifers wird dann von der Rückseite mittels Reaktivem Ionen ätzen (RIE) geöffnet. Dann wird mit Hilfe der KOH-Lauge $420 \mu\text{m}$ tief vorgeätzt. Nach einem weiteren Lithographieschritt wird nochmals beidseitig mit Hilfe der KOH Lauge geätzt, bis die Vakuumkanäle groß genug sind.

Der Deckel des Greifers wird auf die gleiche Weise hergestellt, jedoch ist nur ein Lithographie- und Ätzschritt notwendig, um die Wannenstruktur herzustellen. Der Einfachheit halber wurden im Bereich der Faserführungen schmale Balken zwischen den Stegen stehen gelassen, welche durch einen kurzen Sägeschnitt entfernt werden. Zur effektiveren Massenfertigung der Greifer müssten dem Design Kompensationsstrukturen hinzugefügt werden, welche die Beschädigung der V-Gruben durch das Ätzen konvexer Ecken verhin-

dern (siehe Abschnitt 3.2.3). Die beiden Bauteile werden schließlich zusammengefügt. Die einfachste Lösung ist, die beiden Teile mittels UV-härtendem Klebstoff mit hoher Viskosität ($50000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) an den Rändern von außen zu verkleben. Der Klebstoff zeigt kaum kapillare Effekte, so dass eine Blockierung der Vakuumkanäle nicht eintritt. Andere Klebverfahren, welche die gesamte Auflagefläche miteinander verbinden (mit Hilfe von thermisch härtendem oder licht-aktivierbarem Klebstoff) sind aufwändiger, da die Vakuumkanäle in der Regel mit Wachs gefüllt werden müssen, um ein Hineinfließen des Klebstoffs zu verhindern. Der licht-aktivierbare Klebstoff hat zudem sehr geringe Verarbeitungszeiten, so dass Lagekorrekturen nur begrenzt durchführbar sind.

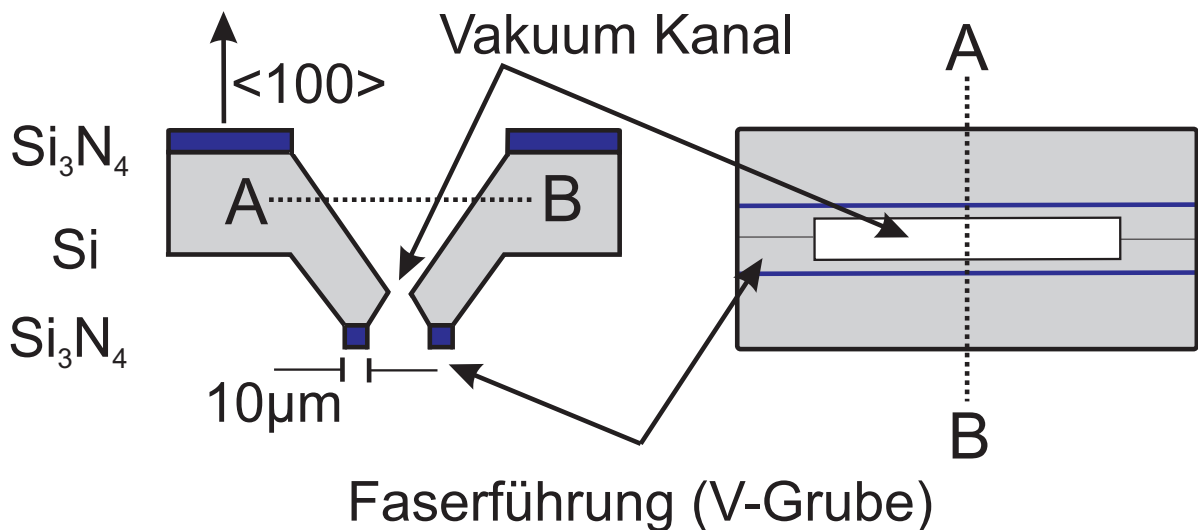


Abbildung 7.6: Übersicht Greifergeometrie des horizontalen $\langle 100 \rangle$ -Greifers; zur besseren Darstellung sind die Abmessungen nicht maßstabsgerecht dargestellt

7.1.3 Vertikaler $\langle 110 \rangle$ -Silicium Greifer

Der vertikale Greifer aus $\{110\}$ -Silicium ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Wie zuvor schon beschrieben, handelt es sich bei diesem Greifertyp um einen Einzelgreifer, welcher gut geeignet ist, Fasern mit kurzem entmantelten Endbereich zu handhaben. Für die manuelle Montage ist die Greifervariante aus Abbildung 7.7 a geeignet, da sie keine Führungsstruktur beinhaltet. Um die Wiederholgenauigkeit zu verbessern wurde die Variante in Abbildung 7.7 b entwickelt. Statt nur von einer Seite einen Vakuumkanal in den Wafer zu ätzen, wurde zusätzlich an der Greiferspitze von der Rückseite geätzt. Dort wo sich die beiden Gruben treffen, entsteht eine U-förmige Faserführung. Durch die $\{111\}$ -Ebenen am Rand der rückseitigen Maskierungsöffnung entsteht ein schräger Übergangsbereich (siehe Abbildung 7.7 b).

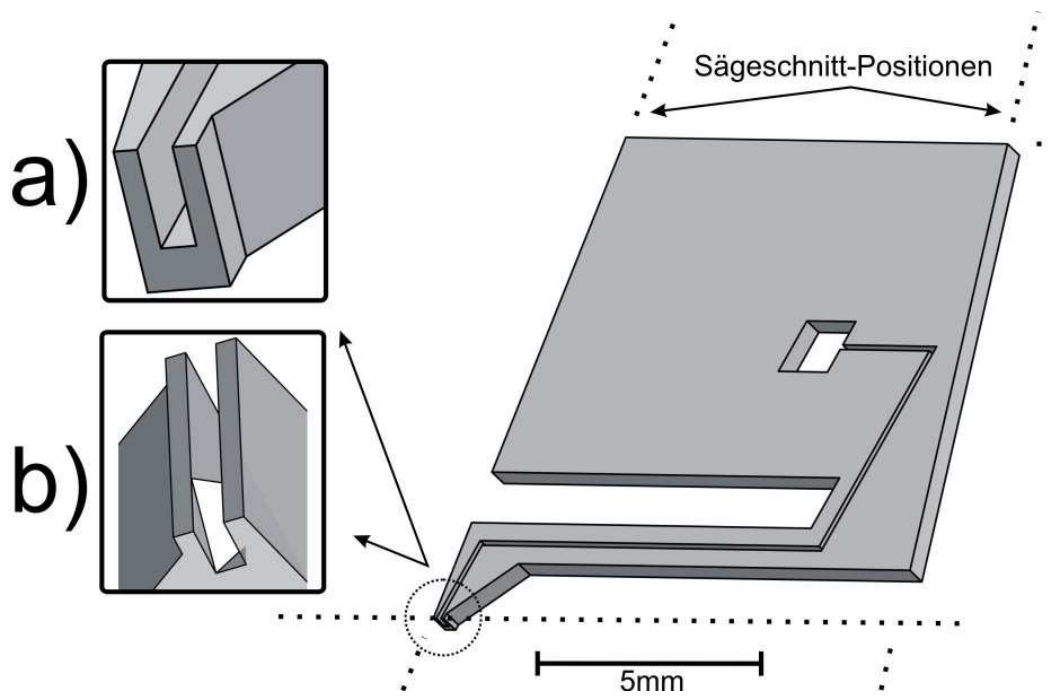


Abbildung 7.7: Skizzen einer Hälfte eines Fasergreifers (vertikal) aus $\{110\}$ -Silicium; a) und b) mögliche Faserführungen; biegsamer Arm verhindert Beschädigung des Greifers Fehlpositionierungen in vertikaler Richtung

Sägeschnitt Markierungen

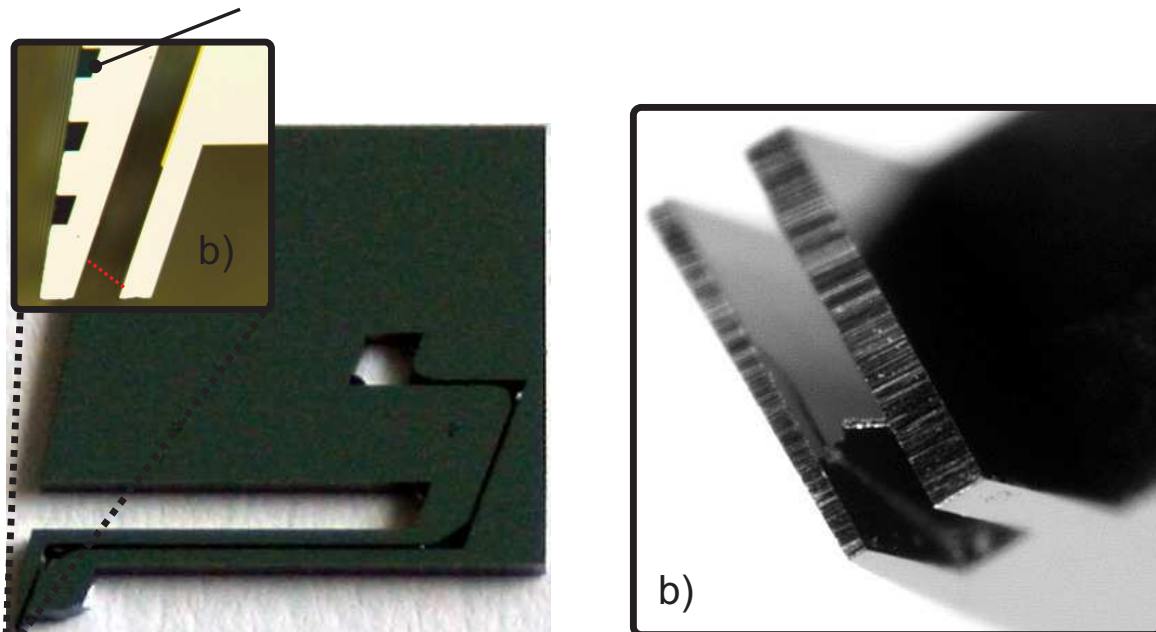


Abbildung 7.8: Foto sowie vergrößerte Mikroskopaufnahmen der Greiferspitze einer Hälfte des vertikalen $\langle 110 \rangle$ -Greifers; dargestellt ist die Variante b) mit Faserführung

FEM-Analyse

Die in den Greifer eingearbeitete Federstruktur ermöglicht wie beim horizontalen <100>-Fasergreifer eine vertikale Positioniertoleranz von $50\ \mu\text{m}$ bei der Variante a), ohne Führungsstruktur. Bei einem Vakuumkanal von $90\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$ ergab die FEM-Simulation eine maximale Vergleichsspannung von $212\ \text{MPa}$. Hierbei wurde ein biegsamer Balken mit einer Länge von $8\ \text{mm}$ und einem Querschnitt von $1 \times 0,79\ \text{mm}^2$ zu Grunde gelegt. Die höchsten Belastungen treten an den äußeren Bereichen auf, wo sich kein Vakuumkanal befindet (siehe Abbildung 7.9). Durch die geringere Balkenbreite und Höhe im Vergleich zum horizontalen <100>-Greifer ergibt sich eine geringere Federkraft von $2,1\ \text{N}$.

Die Simulation der Greifervariante b) zeigt im Vergleich deutlich höhere Spannungen.

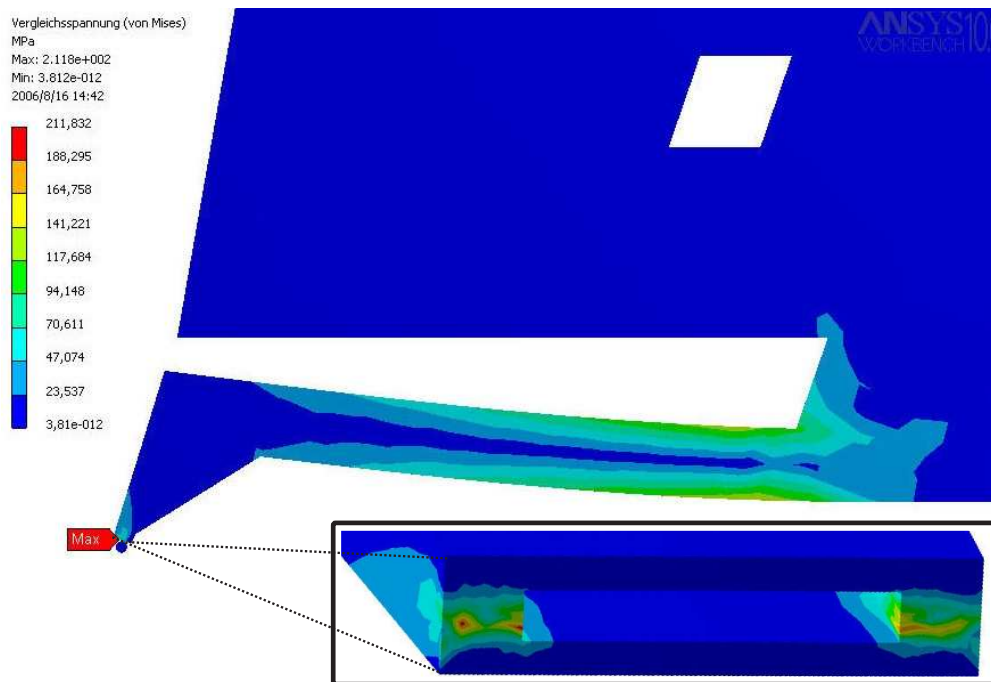


Abbildung 7.9: FEM-Simulationsergebnis: Verteilung der auftretenden Spannungen in MPa bei zu tiefem Absetzen des <110>-Greifers ohne Führungsstruktur (vertikale Verschiebung $50\ \mu\text{m}$)

Die Simulation ergab einen maximalen Wert von $860\ \text{MPa}$. Der Wert liegt aber noch mit einiger Reserve unterhalb der Bruchspannung von $1\ \text{GPa}$. Die größte Beanspruchung des Greifers mit Führungsstruktur konzentriert sich nun nicht mehr auf die äußeren Enden der Greiferspitze, sondern ist auf die gesamte Breite der Führungsstruktur verteilt (siehe Abbildung 7.11).

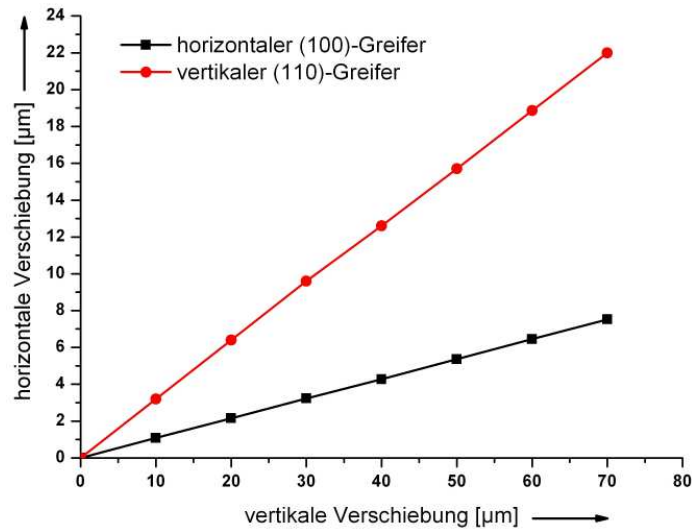


Abbildung 7.10: *FEM-Simulationsergebnis: horizontale Verschiebung der Greiferspitze in Abhängigkeit der vertikalen Fehlpositionierung*

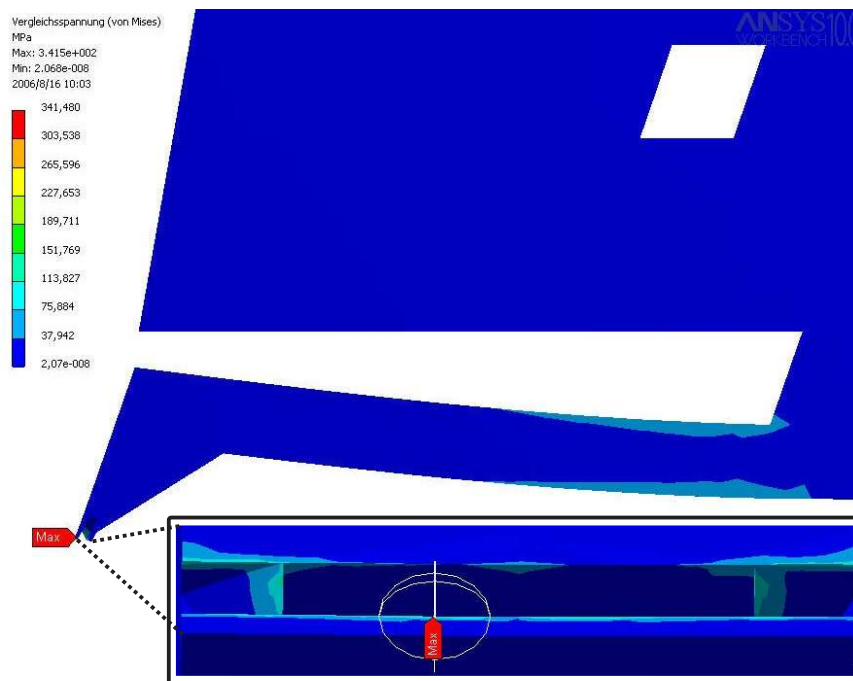


Abbildung 7.11: *FEM-Simulationsergebnis: Verteilung der auftretenden Spannungen in MPa bei zu tiefem Absetzen des <110>-Greifers mit Führungsstruktur (Vertikale Verschiebung beträgt 19 μm)*

Durch die vertikale Fehlpositionierung tritt wie beim horizontalen <100>-Greifer auch eine horizontale Verschiebung auf. Diese beträgt $15,7 \mu\text{m}$ bei einer vertikalen Verschiebung von $50 \mu\text{m}$ und ist somit größer als beim zuvor beschriebenen horizontalen <100>-Greifer (siehe Abbildung 7.10).

Herstellung

Der vertikale $\langle 110 \rangle$ -Greifer wird ebenso wie der horizontale $\langle 100 \rangle$ -Greifer durch das in Abschnitt 3.2.2 beschriebene anisotrope Ätzverfahren mittels KOH-Lösung hergestellt. Zusätzlich werden durch zwei Sägeschnitte eine abgeschrägte Vorderseite und die gerade Greiferspitze hergestellt (siehe Abbildung 7.7). Auch für diesen Greifer werden zwei Chips aufeinander geklebt, jedoch ist in diesem Fall eine hohe Präzision erforderlich, um die Greiferspitze passgenau zu fügen.

7.2 Wiederholgenauigkeit

Um den horizontalen $\langle 100 \rangle$ -Greifer und den vertikalen $\langle 110 \rangle$ -Greifer vergleichen zu können, wurden optische Durchgangs-Dämpfungsmessungen zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit durchgeführt. Zur Bestimmung der Saugkraft wurden zwei verschiedene Messmethoden herangezogen.

Zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit der Greifer wurden zwei Standard Einmoden Fasern in sich gegenüberliegende Halterungen eingespannt, welche mit Hilfe von Piezo-Aktoren in das Dämpfungsminimum gebracht wurden. Zur Auswertung wurde Laserlicht (1550 nm Wellenlänge) in eine Faser eingekoppelt und mit Hilfe eines empfindlichen optischen Detektors gemessen. Eine Faser wurde zusätzlich mit einem Vakuumgreifer gehalten. Durch manuelles Lösen der Faser vom Greifer mit Hilfe einer Pinzette und erneutes Ansaugen durch den Greifer konnte die maximal zu erwartende Wiederholgenauigkeit gemessen werden. In der Praxis sollte der Wert geringer sein, da die Faser aus einem Magazin gegriffen wird, in welchem sie sehr exakt geführt wird. Bei diesem Versuch konnte sehr deutlich die zentrierende Wirkung der Führungsstrukturen und des Vakuums beobachtet werden. Zum Teil dauerte es bis zu drei Sekunden bis die Faser in das Zentrum der Führungsstruktur zurück gerutscht war. Geht man bei den Messungen vom Dämpfungsminimum aus, so können nur Abweichungen $\geq 0,5\ \mu\text{m}$ mit guter Genauigkeit gemessen werden, da der Dämpfungsverlauf für kleinere Änderungen sehr flach verläuft. Beide Greifer zeigten eine Genauigkeit von $\leq 0,5\ \mu\text{m}$. Durch vorherige Einstellung eines lateralen Abstands zwischen den Faserkernen kann in einem Bereich mit steilerem Dämpfungsverlauf gemessen werden. Bei dieser Vorgehensweise wurde eine Genauigkeit des $\langle 100 \rangle$ -Greifers von $0,3\ \mu\text{m}$ gemessen. Dieser leicht bessere Wert im Vergleich zum $\langle 110 \rangle$ -Greifer ist vermutlich auf die höhere Saugkraft zurück zu führen (siehe Tabelle 7.2). Der Einfluss der Greifflächen Geometrie hat, wie in [87] beschrieben, ebenfalls einen Einfluss auf die Wiederholgenauigkeit. Ob eine V- oder U-förmige Führung der Faser vorteilhaft ist, konnte an dieser Stelle nicht geklärt werden, da die Greiferkonzepte zu unterschiedlich sind. Die Messungen zur Bestimmung der gesamten Positioniergenauigkeit der Montageanlage sind in Abschnitt 8.5 dargestellt.

	<100>-H	<110>-V
Saugkraft	2,5 mN (5 mm Stegbreite)	1,1 mN
Wiederholgenauigkeit	$\leq 0,3 \mu m$	$\leq 0,5 \mu m$

Tabelle 7.2: Saugkraft und Wiederholgenauigkeit des horizontalen <100>- und des vertikalen <110>-Greifers

7.3 Vakuum-Haltekraft

Die Saugkraft der Greifer wurde mit Hilfe einer präzisen Waage bestimmt, die eine Genauigkeit von $0,01 \cdot 10^{-3} kg$ hat. Ein L-förmiger Stab wurde an der Waage befestigt, so dass der abgewinkelte Teil des Stabes direkt oberhalb der gegriffenen Faser lag. Durch das Hochfahren des Greifers zog die Faser am Stab und erzeugte somit eine negative Gewichtskraft auf der Waage. Diese Ergebnisse wurden mit Gewichten verglichen, die an die Faser gehängt wurden. Die Messungen mit Hilfe der Gewichte sind ungenauer, lagen jedoch mit einer Abweichung von weniger als 15% im gleichen Bereich. Unter Annahme einer Erdbeschleunigung von $9,81 \frac{m}{s^2}$ betrug die Saugkraft eines 5 mm breiten Steges des <100>-Greifers 2,5 mN. Der vertikale <110>-Greifer hielt die Faser mit einer Kraft von 1,1 mN fest. Das Vakuum wurde mit Hilfe einer Membranpumpe erzeugt und betrug $0,25 \pm 0,05 \cdot 10^2 Pa$ bei einer Förderleistung von $3300 \frac{L}{h}$.

Da die Glasfasern nach der Herstellung auf Rollen gewickelt geliefert werden, weisen sie häufig eine Eigenbiegung auf. Die größte, gemessene Krümmung betrug 1 mm pro Zentimeter Faserlänge. Für das E-Modul einer Glasfaser wird $E = 0,0731 N/\mu m^2$ angenommen und für die resultierende Kraft der Biegung:

$$F = \frac{3}{4}\pi \frac{Er_F^4 w}{L^3}, \quad (7.1)$$

mit r_F : Faser-Radius, w: Verbiegung, L: Länge des Faserstücks [22]. Für die zuvor bestimmten Saugkräfte der Greifer ergeben sich minimale Abstände zwischen Zangengreifer und Vakuumgreifer von 10,3 mm und 15,6 mm jeweils für den <100>- und <110>-Greifer. Dies gilt unter der Annahme, dass die Kraftwirkung der Faser parallel zur Wirkung des Vakuums erfolgt. Die lateralen Haltekräfte der Greifer wurden messtechnisch nicht erfasst. In der Praxis wurde mit doppelt so großen Abständen gearbeitet, so dass die Faserbiegung keine Schwierigkeiten bereitet.

Durch das Reinigen der Glasfaser mit einem Tuch und Isopropanol kann es zu einer statischen Aufladung der Faser kommen. Durch die Aufladung wurde die Faser an den Greifer gezogen. Der Effekt kann somit die Greifkraft verstärken und behindert nicht den Greifvorgang.

Praxistest

Die Greifer sind so berechnet, dass eine vertikale Fehlpositionierung von $50\ \mu\text{m}$ zu keiner Beschädigung des Werkzeugs führt. Dies konnte in der Praxis bei beiden Greifern bestätigt werden für den Fall, dass die Faser korrekt in der Führungsstruktur des Greifers und des Chips positioniert ist. Bei großen Winkelfehlern kann es zu Abbrüchen an den Führungselementen der Greifer kommen. Dies liegt zum Einen an der Scherbelastung und der möglichen Fehlpositionierung von mehr als $125\ \mu\text{m}$ bei Auflage der Faser auf der Chip-Oberfläche.

Optische Dämpfungsmessungen ergaben, dass bei entsprechendem Anpressdruck (berechnete Kraft: $4\ \text{N}$) Glasfasern mit einer lateralen Genauigkeit von weniger als $4\ \mu\text{m}$ in V-Gruben positioniert werden müssen, wenn der Greifer ebenfalls eine Führungsstruktur besitzt (siehe Abbildung 8.5). Ist eine Führungsstruktur flexibel ausgelegt, wie es zum Beispiel bei dem beschriebenen Faserschalter im Bereich der Aktoren der Fall ist, so erhöht sich der Toleranzbereich auf $9\ \mu\text{m}$. Diese einzuhaltenden Genauigkeiten führen beim Faserschalter zu extremen Winkeltoleranzen, welche nur durch eine entsprechende Bildverarbeitung zur Chip Ausrichtung eingehalten werden können ($< 6,55 \cdot 10^{-3}\ \text{Grad}$, für $35\ \text{mm}$ Länge und $4\ \mu\text{m}$ lateraler Abweichung).

7.4 Vergleich der Greifer

Der Vorteil des $\langle 100 \rangle$ -Greifers ist die V-förmige Führungsstruktur, welche in der Waferenebene liegt. Diese ist sehr gut geeignet, um die geforderten Wiederholgenauigkeiten sicherzustellen. Zudem können mehrere Greifer in einem Chip integriert werden (siehe Abbildung 7.4). Die Anzahl der Greifer und somit die Gesamtlänge der montierbaren, entmantelten Faserlänge ist nur durch die zur Verfügung stehende Wafergröße beschränkt. Dies minimiert den Justageaufwand und sorgt für ein Maximum an Genauigkeit, da die einzelnen Greiferstege lithographisch zueinander ausgerichtet sind. Die relativ breiten Stege führen zudem dazu, dass die Vakuum-Ansaugfläche größer als beim $\langle 110 \rangle$ -Greifer ist [83].

Der vertikale $\langle 110 \rangle$ -Greifer bietet eine U-förmige, jedoch sehr kurze Faserführung ($\approx 1\ \text{mm}$). Die Greiferspitze ist schmal und steht weiter hervor, so dass auch in Vertiefungen und engen Bereichen eine Montage möglich ist. Da nur einzelne Greifer herstellbar sind, eignet sich der $\langle 110 \rangle$ -Greifer eher für kurze entmantelte Faserenden [83].

Beide Greifertypen bieten die Möglichkeit über eine Federstruktur die Fügekräfte so zu begrenzen, dass bei einer vertikalen Fehlpositionierung keine Beschädigung des Greifers auftritt. Dadurch, dass Fasern direkt nebeneinander positioniert werden müssen, sind die Stege, die die Führungsstrukturen begrenzen, sehr schmal. Besonders bei nicht nachgebenden Faserchips ist die Gefahr der Beschädigung sehr groß. Durch die größere Auflagefläche des horizontalen $\langle 100 \rangle$ -Greifers können größere Fügekräfte als beim vertikalen $\langle 110 \rangle$ -Greifer aufgebracht werden. In der Summe hat der horizontale $\langle 100 \rangle$ -Greifer mehr Vorteile gegenüber dem vertikalen Greifer. Beide haben jedoch ihr Einsatzgebiet: der horizontale ist besser geeignet für lange Faserstücke, die in einer Ebene zu montieren

sind und der vertikale $\langle 110 \rangle$ -Greifer ist gut geeignet für kurze Faserstücke, die sich in Vertiefungen oder zwischen anderen Komponenten befinden dürfen.

	$\langle 110 \rangle$ -Vertikal	$\langle 100 \rangle$ -Horizontal
Vakuumstärke	o	+
Faserführung	o	+
Montageaufwand	-	+
Justagekreuz für Bilderkennung	-	+
Baugröße	+	o
Fügekraft	o	+

Tabelle 7.3: Eigenschaften des vertikalen $\langle 110 \rangle$ -Greifers und des horizontalen $\langle 100 \rangle$ -Greifers; Abkürzungen: -: schlecht, o: ausreichend, +: gut

Ein Nachteil der eingesetzten einseitigen Aufhängung der Federstruktur liegt darin, dass durch die vertikale Fehlpositionierung auch eine horizontale Verschiebung stattfindet. In Abbildung 7.10 ist die horizontale Verschiebung der Greiferspitze über der vertikalen Fehlpositionierung für beide Greifertypen aufgetragen. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen. Die Steigung beim Graphen des $\langle 110 \rangle$ -Greifers ist deutlich steiler als beim $\langle 100 \rangle$ -Greifer. Dies resultiert aus der Tatsache, dass der $\langle 110 \rangle$ -Greifer eine Verlängerung unterhalb des Biegebalkens aufweist, wohingegen der $\langle 100 \rangle$ -Greifer sehr flach aufgebaut ist, so dass die Strecke zwischen Drehpunkt und Greiferspitze kürzer ist und somit die Verschiebung geringer ausfällt.

7.5 Kombiniertes Zangen- und Vakuumgreifer

Die entwickelten Kombinationen aus Vakuum- und Zangengreifer sind in Abbildung 7.12 und 7.13 dargestellt. Der $\langle 110 \rangle$ -Greifer wurde in das Konzept von der Firma Milasys durch eine angepasste Halterung eingebunden. Mittig angeordnet befindet sich der $\langle 110 \rangle$ -Vakuumgreifer. Die Höhe des Zangengreifers kann durch einen verstellbaren Anschlag auf die Höhe des Vakuumgreifers justiert werden.

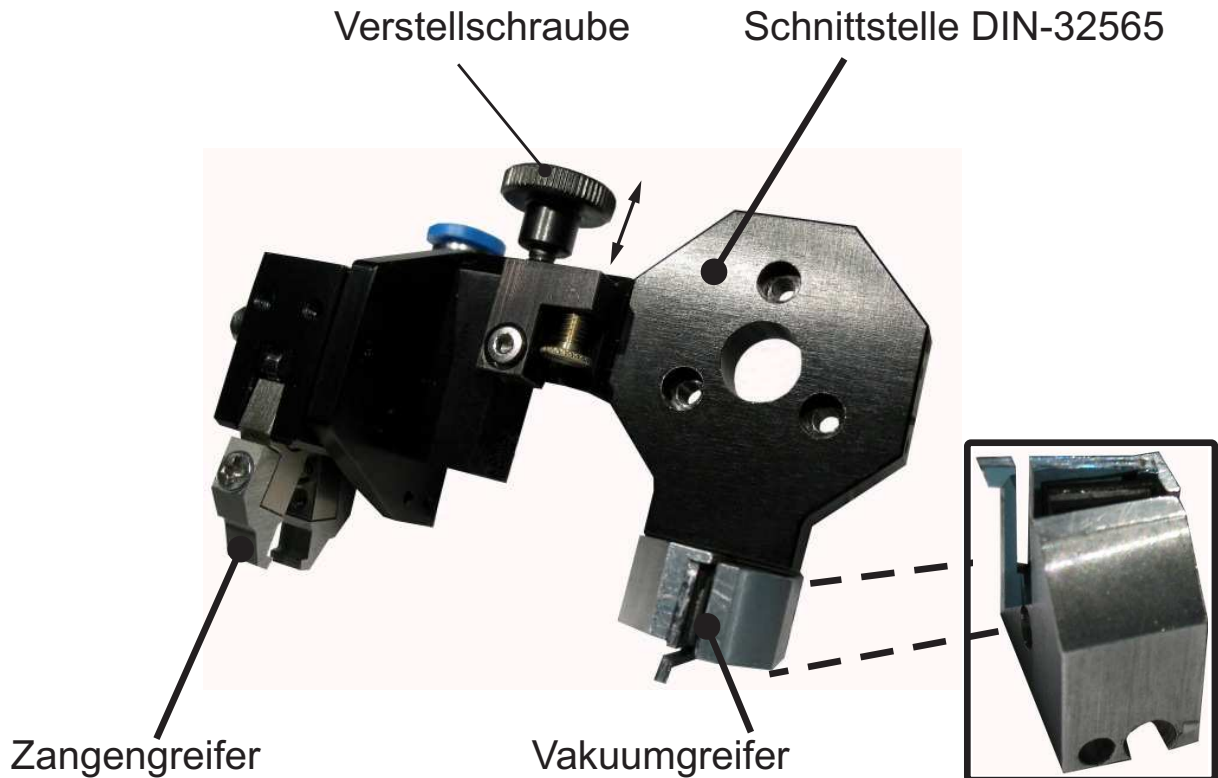


Abbildung 7.12: Foto von kombiniertem Zangen- und $\langle 110 \rangle$ -Vakuumgreifer, Greifer bietet Höhenverstellung für Zangengreifer

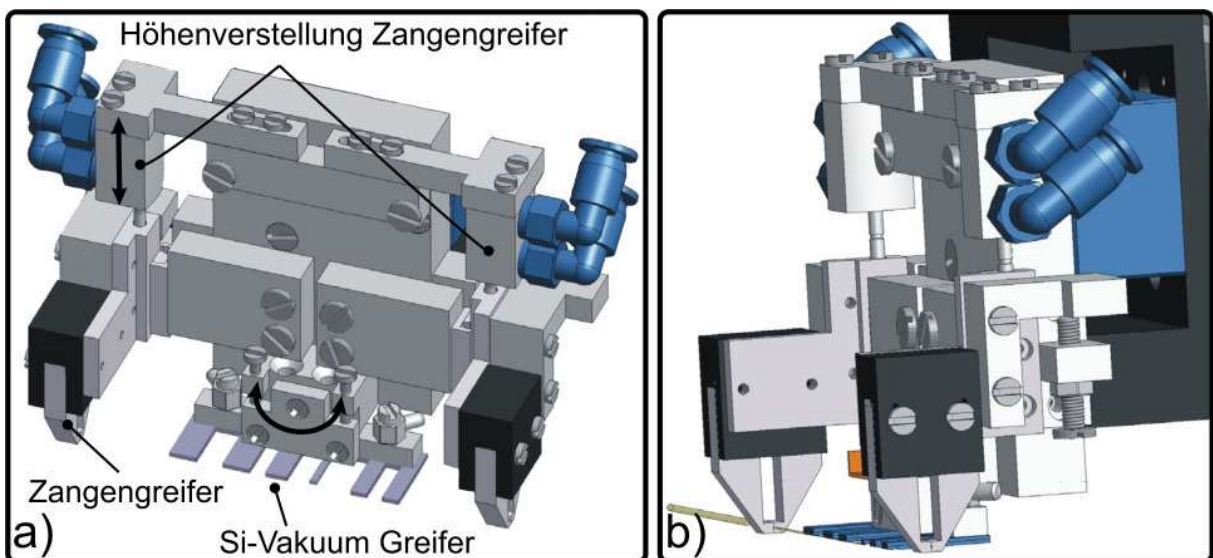


Abbildung 7.13: Konstruktionszeichnungen des kombiniertem Zangen- und $\langle 100 \rangle$ -Vakuumgreifer, Greifer bietet Höhenverstellung für Zangengreifer sowie Verschraubung zur Winkeljustage des Vakuumgreifers; a) Vorderansicht, b) Seitenansicht

Für die Kombination aus Vakuum- und Zangengreifer für den horizontalen $\{100\}$ -Silicium

Greifer wird eine erweiterte Justierbarkeit benötigt. Der neu entwickelte Aufbau ist in Abbildung 7.13 dargestellt. Auch hier befindet sich mittig angeordnet der $\langle 100 \rangle$ -Vakuumgreifer. Dieser kann durch Justierschrauben an den Winkel des zu montierenden Chips auf der Montageplattform angeglichen werden. Die Höhe der Zangengreifer ist ebenso justierbar wie beim kombinierten $\langle 110 \rangle$ -Greifer. Der jeweils nicht benötigte Zangengreifer wird mit Hilfe der pneumatischen Zylinder hochgefahren.

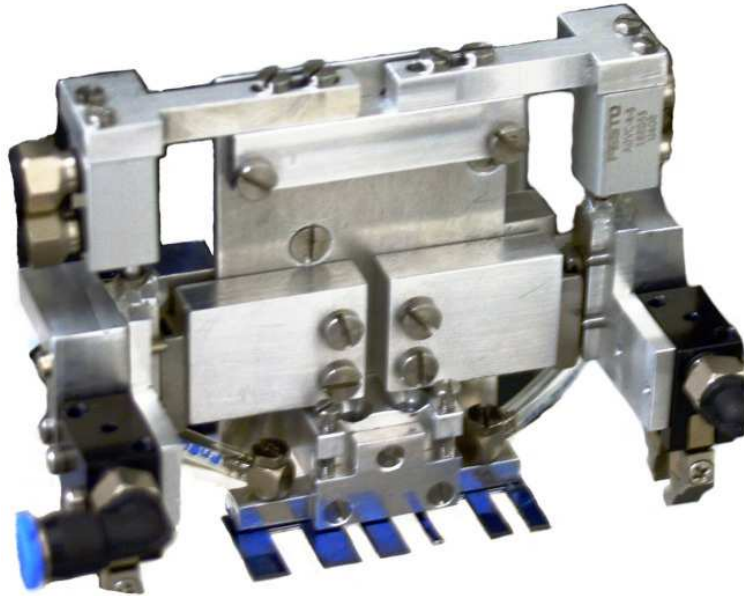


Abbildung 7.14: Foto des kombinierten Zangen- und $\langle 100 \rangle$ -Vakuumgreifers.

Kapitel 8

Automatisierte Glasfaser-Montage

In Kapitel 2.1 wurden bereits die heute gängigen Methoden der faseroptischen Aufbau- und Verbindungstechnik vorgestellt. Der hybride Aufbau optischer Komponenten und die erforderlichen Positioniergenauigkeiten im Submikrometerbereich (siehe Abschnitt 2.1) führen häufig zu hohen Montagekosten, welche bis zu 80% der gesamten Fertigungskosten betragen können [88][89][90][87]. Die Gründe für unverhältnismäßig hohe Montagekosten sind vielschichtig. Vielfach werden Komponenten noch manuell montiert, da sich der Einsatz teurer, hochspezialisierter Vollautomaten bei niedrigen bis mittleren Stückzahlen nicht rentiert. Die manuelle Montage erfordert bei den geforderten Fügegenauigkeiten einen hohen gerätetechnischen Aufwand bei gleichzeitig niedrigen Stückzahlen, so dass die Investitionskosten nicht viel niedriger als bei günstigen automatisierten Anlagen liegen [91]. Die großen konstruktiven Unterschiede von Produkten verschiedener Hersteller verhinderten bislang auch die Entstehung von Dienstleistern, die kostengünstig derartige Montageaufgaben übernehmen können. Ein weiterer Kostenfaktor ist bedingt durch die manuelle Montage. Es hat sich herausgestellt, dass die AVT die Hauptursache für Funktionsausfälle ist. Diese Montagefehler können direkt beim ersten Test der Komponente oder im Laufe des Lebenszyklus auftreten. Nur durch den Einsatz von durchgehenden Qualitätskontrollen und einer Qualitätssicherung können diese Fehler minimiert werden. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, den Fehler frühzeitig zu erkennen, da die Folgekosten um so größer werden desto später dieser erkannt wird (siehe Abbildung 8.1). Durch eine entsprechende Rückkopplung können häufig Fehler korrigiert werden, bevor das Bauteil als irreversibel defekt einzustufen ist (z.B. kann eine Positionierung korrigiert werden bevor Klebstoff aufgebracht wird oder eine zu geringe Menge an Klebstoff kann entsprechend vergrößert werden). Zu unterscheiden sind hier statistische Fehler, die prozessbedingt sind und nicht verhindert werden können. Diese zu erkennen hilft jedoch das Bauteil ggf. sofort aus der Wertschöpfungskette zu entfernen, so dass keine weiteren Kosten anfallen.

Systematische Fehler (z.B. falscher Montagewinkel, Klebstoffposition, etc.) oder Fehler durch äußere Einflüsse (z.B. Temperaturschwankungen) können im Unterschied zu den statistischen Fehlern ursächlich behoben werden. Somit ergibt sich hier, durch die Einführung einer Qualitätskontrolle, die Möglichkeit Fehler nicht nur zu erkennen und gegebenenfalls zu kompensieren, sondern auch die Suche nach und die Behebung der Ur-

sache. Aus der Forderung nach einer durchgehenden Qualitätskontrolle ergibt sich die Frage nach dem optimalen Automatisierungsgrad. In dem Abschnitt 8.2.2 wird dieser Frage unter anderem nachgegangen. Ideal wäre die Möglichkeit, den Automatisierungsgrad flexibel an die jeweiligen Bedürfnisse anpassen zu können. Will man zum Beispiel nur einige Prototypen eines neuen Produkts manuell fertigen, so könnte dies mit der gleichen Anlage geschehen, die bereits andere Produkte halb bzw. vollautomatisch bestückt. Ein weiterer Aspekt ist die Abstimmung des Produktdesigns auf die Anforderungen der automatisierten Fertigung. Hierzu zählen die Minimierung der Anzahl der zu montierenden Komponenten, die Bereitstellung von integrierten Montage- und Justagehilfen (z.B. Führungsstrukturen und Positionsmarkierungen) und die Vermeidung von Montageschritten, die zwar manuell aber nicht automatisiert durchgeführt werden können.

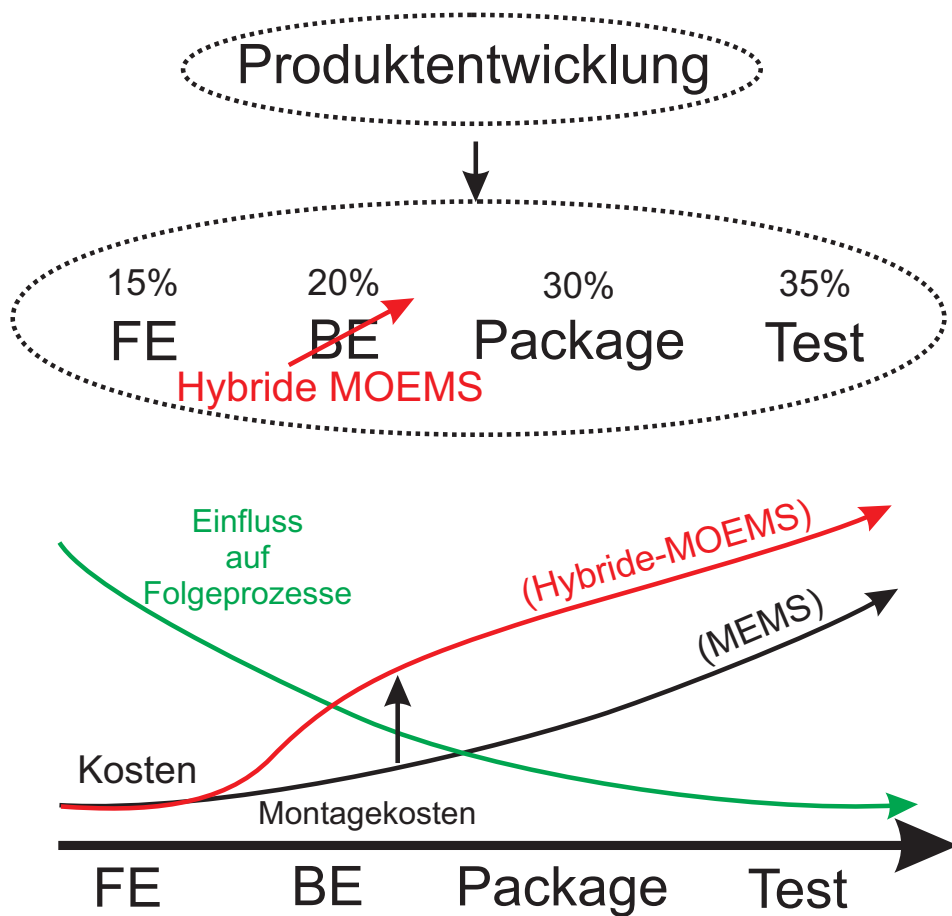


Abbildung 8.1: Kostenverteilung bei der Herstellung von MOEMS Faserschaltern. Die aufwändige Fasermontage kann zu höheren Fertigungskosten als bei MEMS-Produkten führen. Das Produktdesign hat große Auswirkungen auf alle Prozesse. Im Laufe des Zyklus sinkt der Einfluss auf nachfolgende Prozesse. FE: Front End, BE: Back End [90]

In den folgenden Abschnitten wird am Beispiel eines volumenmikromechanisch hergestellten Glasfaserschalters eine automatisierte Montageanlage vorgestellt, die exemplarisch zeigen soll, wie die Montagekosten anhand der genannten Punkte reduziert werden können. Die entwickelte Anlage ist in der Lage Glasfasern aber auch andere Kompo-

nenten, wie zum Beispiel Mikrospiegel, Bauteile für die Mikrofluidik in einer Ebene zu positionieren. Da es bislang nicht gelang passive Führungsstrukturen mit ausreichender Genauigkeit mit integrierten Wellenleitern zu kombinieren (siehe [36]), werden integriert optische Komponenten (insbesondere bei Wellenleitern mit Modenfelddurchmessern von $< 10 \mu\text{m}$) zumeist aktiv montiert. Diese können nicht mit der entwickelten Anlage montiert werden, da sie nur eine passive Montage mit Kameraüberwachung bietet. Für die integriert optischen Komponenten können lediglich die benötigten Faserführungselemente zur Kopplung an Wellenleiter mit Fasern bestückt werden.

Um die Kosten der Aufbau- und Verbindungstechnik möglichst gering zu halten, müssen alle Bereiche aufeinander abgestimmt sein. Das Zusammenspiel von montagegerechtem Entwurf, flexibler, innovativer Montagekonzepte und einer durchgehenden Qualitätskontrolle und -sicherung bei einem optimalem Automatisierungsgrad können die Kosten im Bereich der AVT stark reduzieren [92].

8.1 Mikromechanischer Faserschalter in Silicium

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellte automatisierte Glasfasermontageanlage und die Werkzeuge wurden für einen zuvor in [22] realisierten thermomechanischen Glasfaserschalter entwickelt. Bei dem Schalter werden Glasfasern mit Standarddurchmesser (Primärmantel $d_1 = 125 \mu\text{m}$, Sekundärmantel $d_2 = 250 \mu\text{m}$) eingesetzt. Im Koppelbereich werden nur entmantelte Faserstücke (Durchmesser d_1) verwendet. Es können auch Spezial- oder Multimode-Fasern mit von der SSM-Faser abweichendem Modenfelddurchmesser verwendet werden. Die Aktorstrukturen sind von der Rückseite auf etwa $85 \mu\text{m}$ Dicke ausgedünnt (siehe Abbildung 8.2).

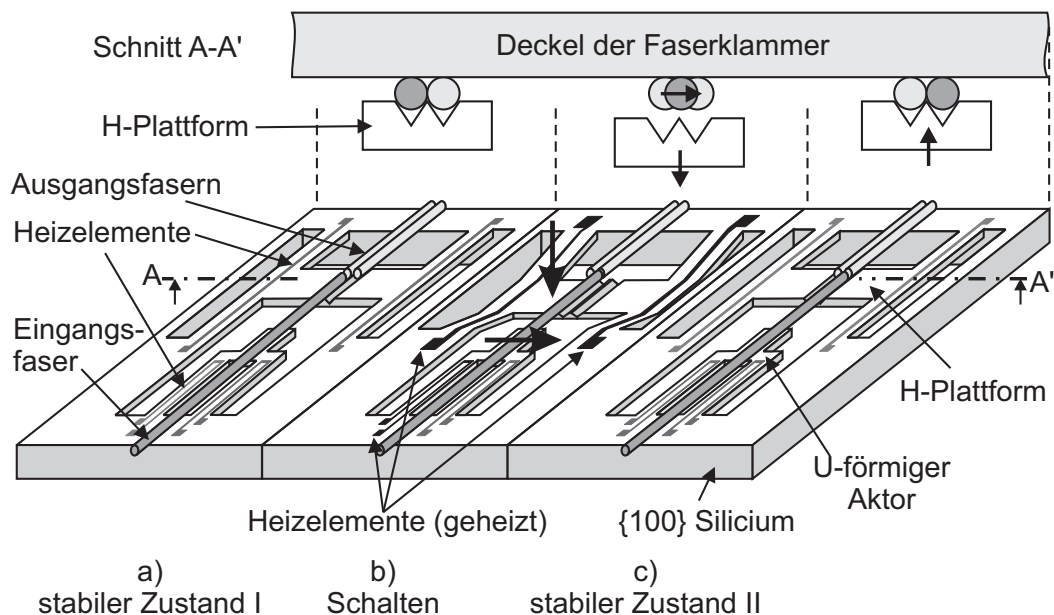


Abbildung 8.2: Aufbau und Funktionsweise eines Glasfaserschalters (aus [22])

Der Faserschalter eignet sich sehr gut als Demonstrationsobjekt, da er folgende kritische Eigenschaften aufweist:

- Unterätzte Aktorstrukturen und nicht unterätzte Bereiche stehen zur Verfügung
- die Länge des Schalters von 52 mm erfordert höchste Ansprüche an die Winkelgenauigkeit bei der Montage
- V-Gruben werden zur Faserführung verwendet
- V-Gruben liegen sehr dicht nebeneinander (Rasterabstand $125\ \mu\text{m}$, so dass spezieller Greifer benötigt wird)
- der montierte Schalter kann erst nach vollständiger Montage auf Durchgangsdämpfung geprüft werden (nur visuelle Kontrolle möglich)

Auf die Herstellung des Schalters soll hier nicht weiter eingegangen werden, da schon in [22] ausführlich darüber berichtet wurde. In Abbildung 8.2 ist der Aufbau und die Funktionsweise des Schalters dargestellt. Der Schalter besteht aus zwei thermisch betriebenen Aktoren. Auf der Eingangsseite befindet sich ein Lateralaktor („U-förmiger Aktor“), der die Endfläche der Eingangsfaser vor den verschiedenen Ausgangsfasern positioniert. Ein Klammermechanismus bestehend aus einer absenkbaren Plattform („H-Plattform“) und einem Glasdeckel sorgen dafür, dass auch beim Abschalten der Energieversorgung der Schaltstatus beibehalten wird (bistabiler Schalter).

Bei der Montage werden zunächst die Fasern der Ausgangsseite sequentiell in die V-Gruben platziert und verklebt. Da sich die H-Plattform absenken können muss, werden die Fasern hier nicht verklebt, sondern nur durch einen Glasdeckel in die Gruben gepresst. Der detaillierte Montageablauf besteht aus folgenden Schritten:

- Ausrichtung des Faserschalters parallel zur Faser im Greifer mit Hilfe von Positionsmarkierungen auf dem Chip (siehe Abschnitt 8.1.1)
- Einlegen der ersten Faser in die V-Grube der Ausgangsseite (mit Hilfe von Positionsmarkierung auf H-Plattform); die Faserendfläche muss sich im ersten Drittel der H-Plattform befinden, damit die Faser der Eingangsseite möglichst lange auf der Plattform geführt werden kann
- Verkleben der Faser, ohne Überlauf des Klebstoffs in benachbarte Grube
- Einlegen der zweiten Faser (die Endfläche muss so ausgerichtet werden, dass sich beide Endflächen auf gleicher Höhe befinden).
- Verkleben der zweiten Faser
- Einlegen der Eingangsfaser (die Faserendfläche muss auf Abstand von $5\ \mu\text{m} < z < 10\ \mu\text{m}$ justiert werden)
- Montage der weiteren Faserschalter auf dem Chip
- Abschließend Glasdeckelmontage

8.1.1 Fertigungsgerechter Entwurf

Um eine effiziente Montage von Mikrokomponenten zu gewährleisten, müssen schon in der Entwurfsphase Fertigungs- und Montageaspekte einbezogen werden [82]. Diese zielen in jedem Fall darauf ab, die einzuhaltenen Toleranzen zu verringern und ein optimales Zusammenspiel zwischen den Werkzeugen und den zu montierenden Komponenten zu ermöglichen. Aus den gewonnenen Erfahrungen mit dem Faserschalter und Beispielen aus der Literatur ergeben sich für einen montagegerechten Entwurf die folgenden vier Bereiche:

- Zur Reduzierung der notwendigen Toleranzen und zur passiven Justage können Führungsstrukturen und Einführhilfen (z.B. konisch zulaufende Bereiche, Fasen, etc.) eingesetzt werden
- Überbestimmungen z.B. durch zwei gegenüberliegende Führungsstrukturen können durch federnde Elemente beseitigt werden
- Für die Optiken der Bildverarbeitung muss genug Raum vorhanden sein. Die optischen Eigenschaften sollten wenn möglich an das Bildverarbeitungssystem angepasst werden (z.B. richtige Wahl der Dicke einer Oberflächenbeschichtung). Zur Positionierung und Vermessung müssen geeignete Strukturen vorgesehen werden.
- Fügehilfen, wie z.B. Klemmvorrichtungen oder Klebstoff-Einfüllhilfen sollten wenn nötig vorgesehen werden.

Ein Beispiel für einen montagegerechten Entwurf eines mikrooptischen Duplexers ist in [93] nachzulesen. Im Folgenden sollen die vier Gesichtspunkte anhand des zuvor beschriebenen Faserschalters erläutert werden.

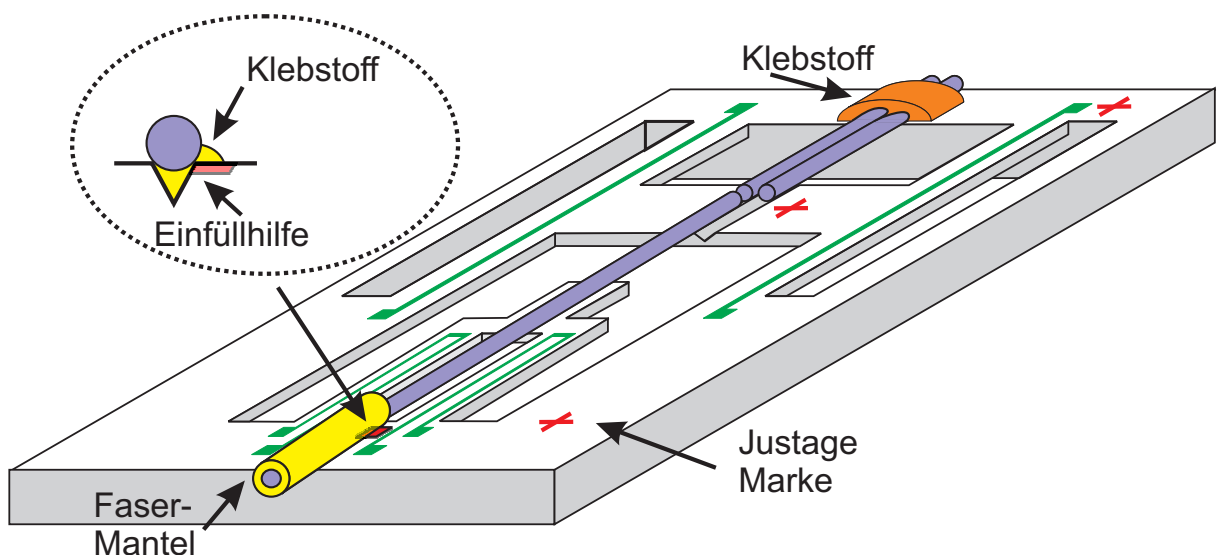


Abbildung 8.3: *Fertigungsgerechter Entwurf am Beispiel des 1x2 Faserschalters*

Die V-förmigen Führungsstrukturen reduzieren die notwendigen Justagetoleranzen und stellen eine Einführhilfe dar. Bei der Verwendung eines Fasergreifers, welcher ebenfalls

eine Führungsstruktur verwendet, kommt es zu einer Überbestimmung. Dies könnte durch lateral nachgebende Strukturen im Greifer vermieden werden. Hier ist es jedoch nicht notwendig, da die Aktoren des Schalters den Zweck erfüllen. Da es sich um einen relativ großen Chip handelt, ist genug Raum für eine herkömmliche Optik. Um jedoch den gesamten Chip mit hoher Vergrößerung überwachen zu können, ist eine bewegliche Kamera notwendig. Kritisch ist die verwendete Oberflächenbeschichtung. Da idealerweise mit Bandbreite-begrenztem Licht beleuchtet wird, um Kanten besser aufzulösen, sollte eine geeignete Dicke und Qualität der Beschichtung gewählt werden. Im schlechtesten Fall kann es zu einer destruktiven Interferenz kommen. Der Kontrast zwischen V-Gruben und Chip-Oberfläche wäre somit zu gering. In Abbildung 8.3 sind weitere Maßnahmen für einen fertigungsgerechten Entwurf dargestellt. Zur exakten Positionierung sind drei Justagemarkierungen notwendig. Idealerweise werden Kreuze verwendet, eines befindet sich nahe des Koppelbereichs und zwei in einer Linie an den äußeren Enden des Chips. Über die Äußeren kann der Winkel justiert und über den mittig angeordneten die exakte Position des Chips während der Montage eingestellt werden. Werden mehrere Kreuze in unmittelbarer Nähe zueinander benötigt, so sollte darauf geachtet werden, dass diese sich klar voneinander unterscheiden, um Verwechslungen zu vermeiden.

Um das Aufbringen des Klebstoffs zu erleichtern, können wannenartige Reservoirs vorgesehen werden, in die der Klebstoff gefüllt wird. An den Chip-Enden muss eine Zugentlastung für die Glasfasern vorgesehen werden. Wird eine einzelne Faser verklebt kann der Fasermantel in eine entsprechend größer ausgelegte Grube eingeklebt werden. Auf der Ausgangsseite muss ein Bereich vorgesehen werden, in welchem sich die Fasern S-förmig verbiegen können. Dies ist notwendig, um einen Ausgleich vom geringen Abstand der entmantelten Fasern zu dem größeren Rastermaß des Faserbereichs mit Ummantelung zu schaffen. Zu diesem Zweck kann eine breite Wanne vorgesehen werden, in welcher nach der Montage Klebstoff gefüllt wird. Eine andere Möglichkeit, welche die Größe des Chips reduziert, besteht darin den Übergangsbereich frei schwebend außerhalb des Chips zu belassen und einen Tropfen Klebstoff auf die Kante des Chips aufzubringen. Auf diese Weise wird die Glasfaser mit Ummantelung zusammen mit dem Chip vergossen.

8.2 Montageanlage

8.2.1 Anforderungen und Zielsetzung

Die im Folgenden beschriebene Glasfaser-Montageanlage erfüllt die Anforderungen des zuvor beschriebenen Faserschalters. Neben diesen technologisch bedingten Anforderungen spielen auch wirtschaftliche Randbedingungen eine Rolle. Die Anlage soll für kleine bis mittlere Stückzahlen geeignet sein (5000-15000 Schalter pro Jahr). Letztlich soll die Herstellung möglichst günstig und effizient sein. Um günstig produzieren zu können, muss die Montageanlage mit möglichst wenigen Komponenten auskommen. Der Grad der Automatisierung muss optimal sein, die Anlage sollte unterschiedliche Produktvarianten oder sogar verschiedene Produkte fertigen können. Durch die Möglichkeit einer automatisierten Qualitätskontrolle werden Produktionsfehler minimiert, wodurch ebenfalls die Gesamtkosten reduziert werden können.

Eine minimale Anlagenkonfiguration umfasst ein Fasermagazin, einen Fasergreifer, eine Montageplattform zur Bereitstellung des Chips, ein Klebstoff-Dosiersystem, ein Visualisierungssystem, sowie mehrere Aktoren zur Überwindung der Wege zwischen den Komponenten. Diese Anlage soll möglichst nicht die Größe eines Tisches überschreiten, um die Kosten für eine staubfreie und klimatisierte Umgebung, gering zu halten.

Zu klären ist, wie viele Motoren benötigt werden und ob mit nur einer Optik eine Fertigung möglich ist. Ein weiterer Punkt ist, ob die Genauigkeit der Montage auch ohne weitere Sensoren (z.B. Abstandssensoren zur Bestimmung der vertikalen Greiferposition) möglich ist. Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung von Fasergrifern, die die Anforderungen an die Genauigkeit und Funktionalität erfüllen und gleichzeitig kostengünstig herstellbar sind. Schließlich gilt es die visuellen Eigenschaften des Faserchips und der Fasern zu untersuchen und geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen für die Justage und Qualitätskontrolle zu entwickeln.

8.2.2 Automatisierungsgrad & Flexibilität

Ein Anstieg des Automatisierungsgrads bewirkt eine Verringerung der Flexibilität der Montageanlage. Längere Umrüstzeiten, die spezielle Anfertigung auf die automatisierte Montage abgestimmter Werkzeuge und die Kalibrierung sowie Programmierung der Anlage sind häufige Nachteile der Automatisierung.

Bei der Glasfasermontage ist der Unterschied des gerätetechnischen Aufwands zwischen einer rein manuellen Montage und einer automatischen nicht groß. Zur Montage werden in jedem Fall genaue Gleitschienen benötigt, um die Werkzeuge präzise bewegen zu können. Die Winkel zwischen Greifer, Magazin und Faser-Chip müssen ebenso wie bei der automatisierten Montage kalibriert werden. Eine Mikroskop-Optik mit Kamera wird zur Montage und zur Qualitätssicherung benötigt. Sogar die Werkzeuge können identisch sein. Eine automatisierte Variante erfordert eine Softwaresteuerung inklusive einer Bildverarbeitung. Die zu bestückenden Komponenten müssen auf die automatisierte Anlage abgestimmt sein. Gelingt es kostengünstige, motorisierte Aktoren zu verwenden und mit einfachen Mitteln eine flexibel anpassbare Software zu entwickeln, so kann der Nachteil der geringeren Flexibilität gemildert werden. Der Vorteil der Automatisierung mit Bildverarbeitung ist die Qualitätskontrolle und -Sicherung. Hierin liegt gerade bei der Fasermontage großes Potential zur Reduzierung des Ausschusses.

8.2.3 Aufbau-Konzepte

Aus einer Vielzahl von möglichen Anlagenkonzepten können die sinnvollen schnell eingegrenzt werden, indem die gegebenen Randbedingungen einbezogen werden. Aus den Forderungen nach geringen Kosten, hoher Flexibilität und einer durchgehenden Qualitätskontrolle aber natürlich auch den technologischen Voraussetzungen ergeben sich folgende Bedingungen:

- Die Glasfaser soll während der Montage festgehalten werden, um ein evtl. Auf-

schwimmen der Faser zu vermeiden (hieraus ergibt sich, dass der Greifer vom Dosierer unabhängig bewegbar sein muss)

- Kamera muss unabhängig von Greifer sein
- wenn nur eine Kamera: in axialer Faser-Richtung bewegliche Kamera erforderlich
- Drehachse zur Winkelkorrektur notwendig
- Höhenverstellung nicht durch Plattform sondern einzeln durch Werkzeuge

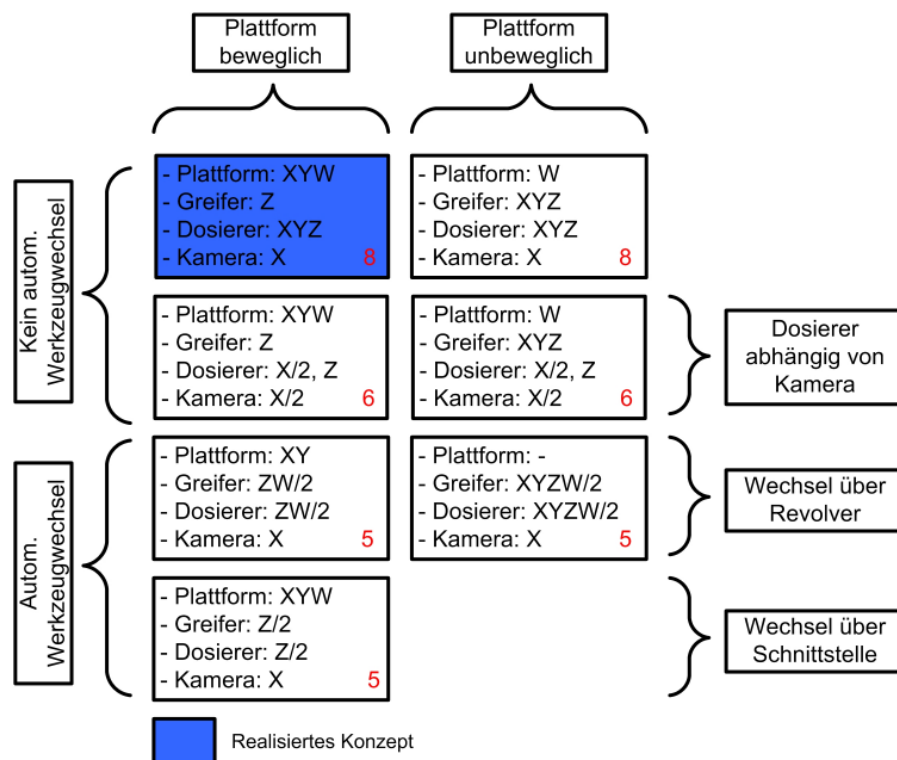


Abbildung 8.4: Übersicht der möglichen Anlagenkonzepte; mit rot gekennzeichnete Zahlen geben die erforderliche Anzahl der Motorachsen wieder; die Minimal mögliche Konfiguration umfasst fünf Motorachsen; Komponenten mit 1/2 gekennzeichneten Motorachsen werden zusammen an einem Motor betrieben

In Abbildung 8.4 sind die verschiedenen Anlagenkonzepte und die resultierende Anzahl von Motorachsen dargestellt. Aus der Forderung, dass die Faser während des Fügevorgangs gehalten werden muss, ergibt sich, dass ein Werkzeugwechselsystem für das Dosiergerät und den Fasergreifer nicht verwendet werden kann. Dieses würde eine weitere Motorachse einsparen.

Die Kamera kann auf vielfältige Weise mit den vorhandenen Werkzeugen kombiniert werden. Eine vollständige Darstellung der Möglichkeiten ist in [94] nachzulesen. Da es sinnvoll ist, vor dem Verkleben die korrekte Position der Faser zu überprüfen, muss die Kamera unabhängig von der Plattform und dem Greifer verfahrbar sein. Ausreichend für eine durchgehende Qualitätskontrolle ist die Verfahrbarkeit in axialer Faserrichtung (X-Achse), da der zu vermessende Bereich nur die unmittelbare Umgebung der Faser umfasst

(siehe Kapitel 9).

Die Winkelkorrektur (W) ist zur Gewährleistung einer genauen Faserpositionierung erforderlich. Wird kein Werkzeugwechselsystem verwendet, so bietet es sich an, die Rotations-Einheit der Montageplattform zuzuordnen. Bei einem Revolver-Werkzeugwechselsystem kann die Dreh-Einheit des Revolversystems für die Justage genutzt werden.

Wie aus Abbildung 8.4 hervorgeht, werden mindestens fünf Motorachsen benötigt. Diese beinhalten die Achsen zur Positionierung in drei Raumrichtungen X, Y, Z , die Drehachse W und eine weitere Achse X für die Kamera. Diese Zahl gilt für Systeme mit nur einem Werkzeug oder mit einem Werkzeugwechselmodul.

Eine Kopplung des Dosierers an das Kamerasystem erscheint sinnvoll, jedoch schränkt der Verzicht auf die Beweglichkeit des Dosierers in Y -Richtung die Flexibilität der Anlage stark ein. Zudem wäre der Dosierer immer im Bildfeld sichtbar. Ein guter Kompromiss liegt in der Verwendung von sieben Motorachsen. Der Dosierer behält alle Freiheitsgrade und ist lediglich an die Kamera gekoppelt.

Für die Realisierung der Anlage wurden jedoch acht Motoren verwendet, so dass der Dosierer vollständig unabhängig verwendet werden kann (siehe Abbildung 8.5). Dies bringt eine größtmögliche Flexibilität mit sich, die für eine Forschungsanlage für wichtig erachtet wurde.

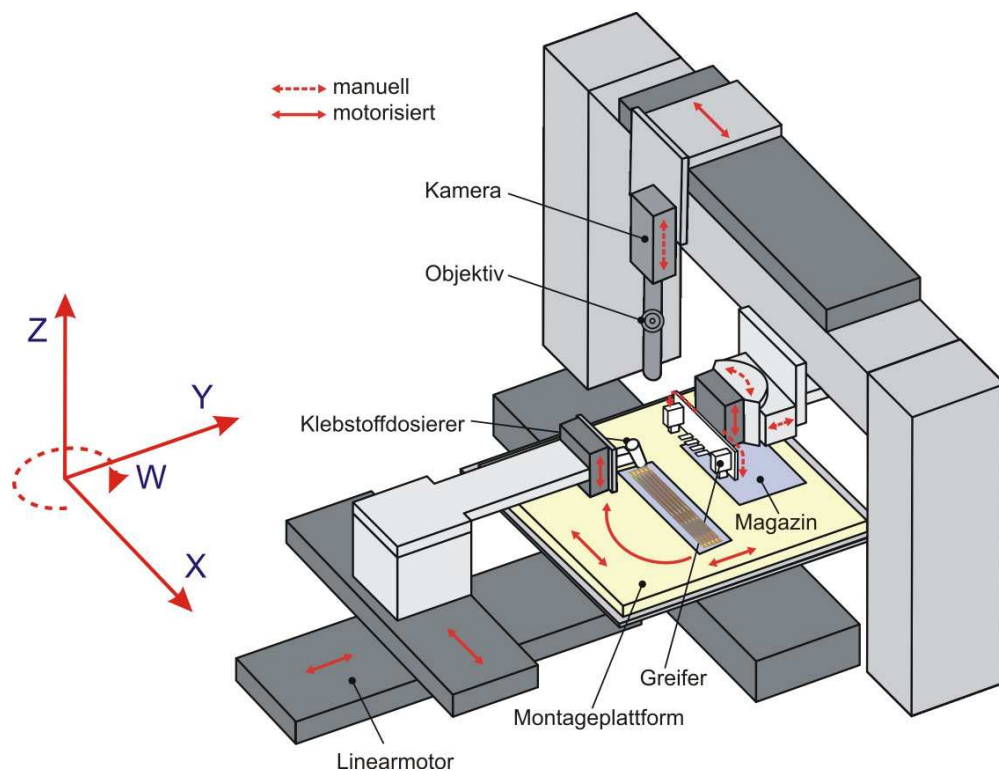


Abbildung 8.5: Skizze der realisierten Montageanlage

8.2.4 Realisierung

Die realisierte Montageanlage umfasst acht Motorachsen, einen Fasergreifer, zwei Faser-Magazine, ein Dosiergerät und eine in axialer Faserrichtung (X-Richtung) verfahrbare Kamera (siehe Abbildung 8.7 und 8.8). Die Montageplattform ist axial und radial zur Faserrichtung (X- und Y-Richtung) beweglich und zudem drehbar. Auf eine Grundplatte kann eine Platte nach DIN-32563 [95][96] aufgelegt werden, welche mit Hilfe von zum Teil exzentrisch befestigten Zylindern eingeklemmt wird. Durch das Wechselsystem wird der Montagefluss gewährleistet und die Plattformen können an unterschiedliche Produkte angepasst werden (Abbildung 8.6). Zur Montage des Faserschalters wurde neben den zwei

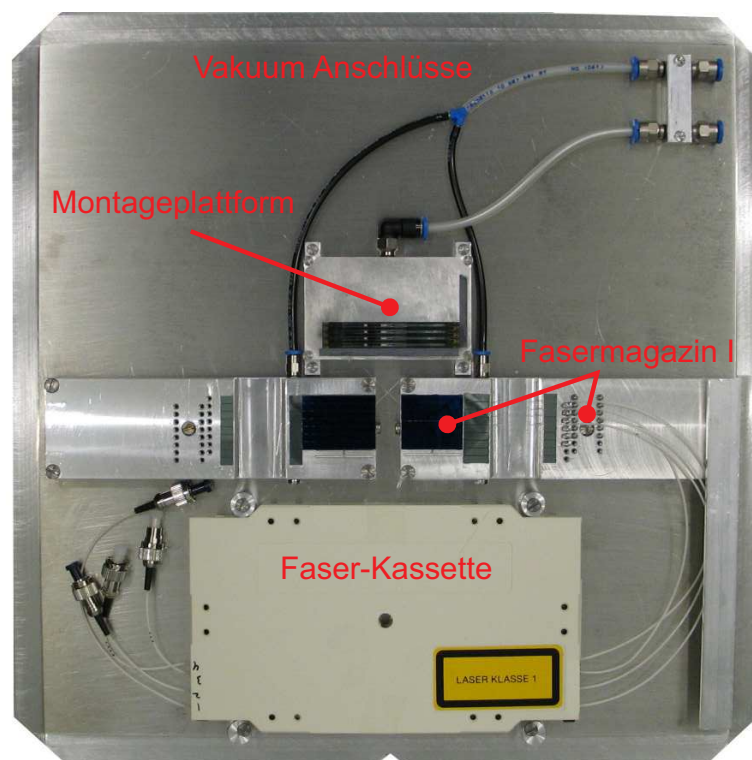


Abbildung 8.6: Wechselsystem nach DIN 32563 mit Fasermagazin und Chip-Halterung

Faser-Magazinen (siehe Abschnitt 8.3.3) eine Plattform mit Vakuumanasugung aufgebaut (siehe Abschnitt 8.3.3). Der Fasergreifer ist an einem U-förmigen Profil befestigt und kann lediglich in der Höhe verstellt werden. Dies vereinfacht die Steuerung der Kamera, welche sich oberhalb des Greifers auf dem U-Profil befindet. Zudem wird für die Kamera nur ein Motor (150 mm Verfahrweg) in axialer Faserrichtung (X-Richtung) benötigt, um den gesamten Montagebereich des Chips überwachen zu können.

Der Klebstoff Dosierer (siehe Kapitel 5.3) setzt auf drei separaten Motorachsen auf, damit ein Höchstmaß an Flexibilität erreicht wird. Eine Alternative, um Motoren einsparen zu können, ist die Anbringung des Dosierkopfes an den Motor der Kamera. Dies wurde jedoch nicht realisiert, da mehr Wert auf Flexibilität gelegt wurde (Abschnitt 8.2.3).

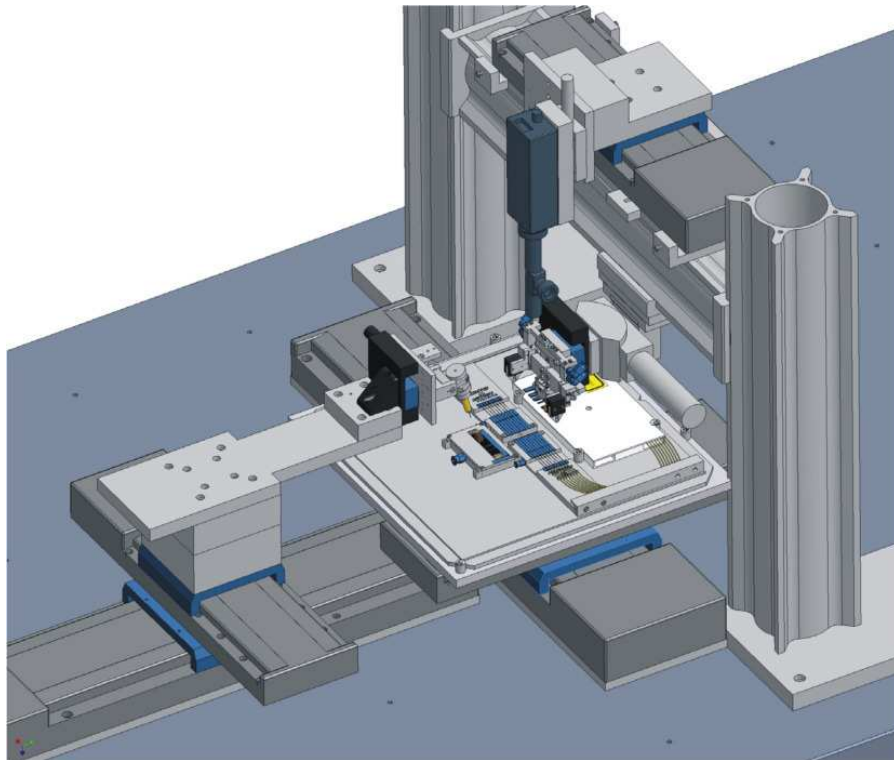


Abbildung 8.7: 3D-Zeichnung der realisierten Faser-Montageanlage

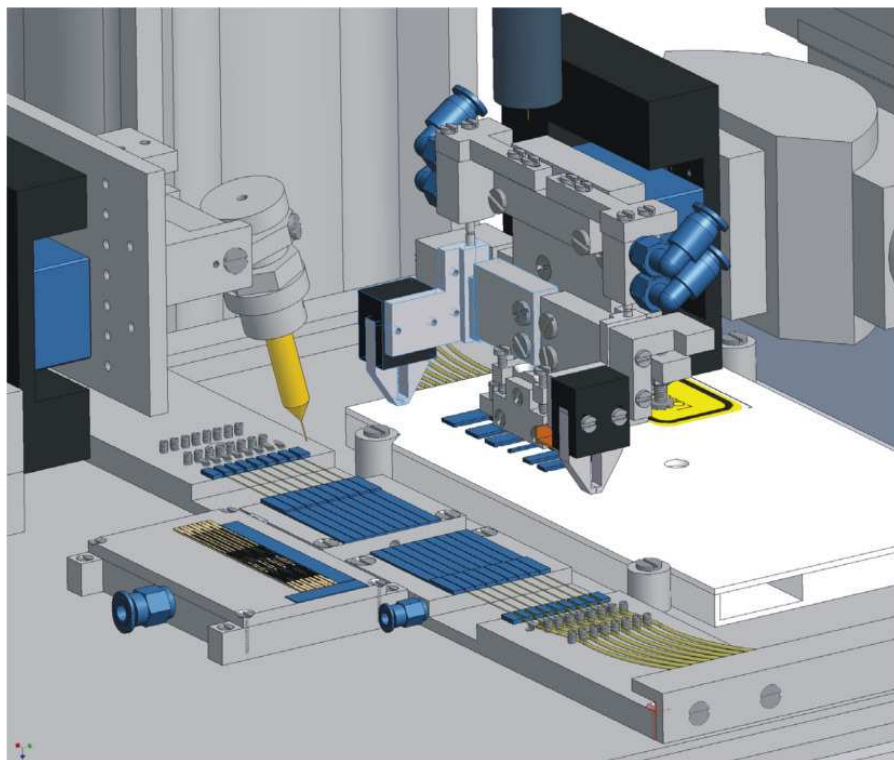


Abbildung 8.8: Vergrößerte Ansicht der 3D-Zeichnung Abbildung 8.7



Abbildung 8.9: Foto der Faser-Montageanlage

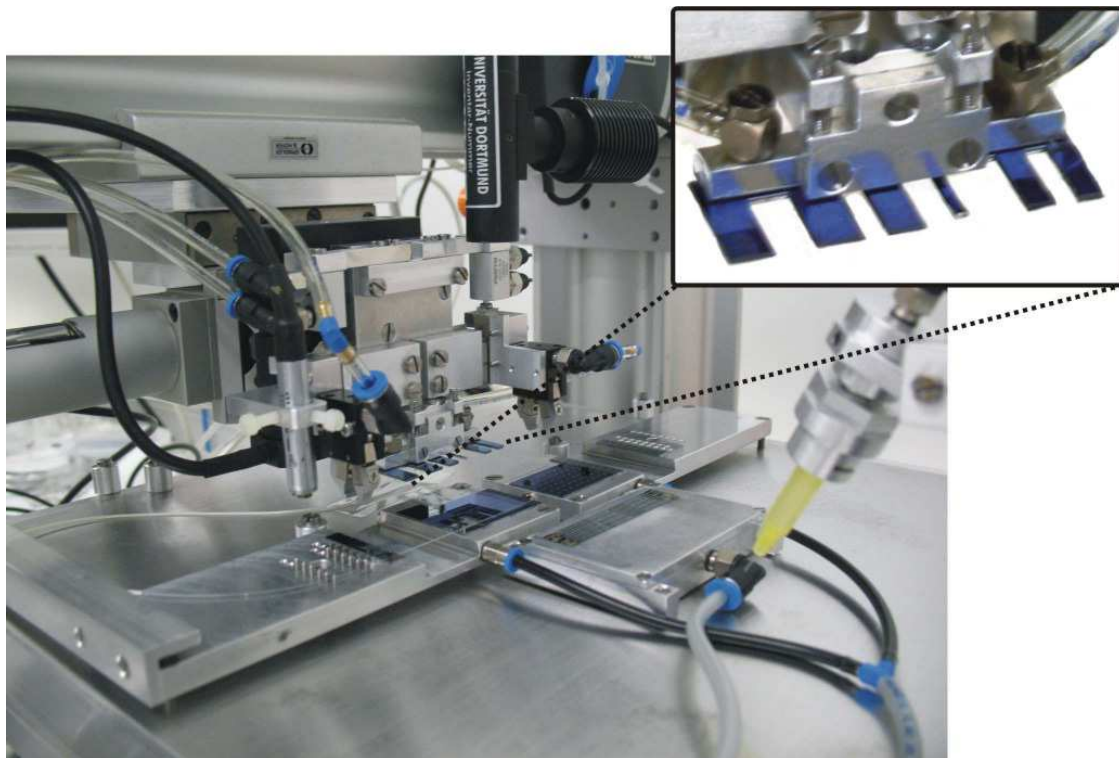


Abbildung 8.10: Foto der Faser-Montageanlage, Ausschnitt mit Fasermagazin, Greifer und Dosierkanüle

Kalibrierung

Ein sehr wichtiger Aspekt, um die geforderte Montagegenauigkeit einhalten zu können, ist die Kalibrierung der unterschiedlichen Bereiche der Montageanlage zueinander. Positionen in der X-Y-Ebene werden mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems vermessen. Zur exakten Bestimmung der vertikalen Abweichungen wird ein induktiver Sensor mit Sub-Mikrometer Genauigkeit verwendet.

Zunächst wird die Plattform des zu montierenden Chips mit den beiden Fasermagazinen in eine Ebene gebracht. Mit Hilfe der an den äußeren Ecken der Bauteile angebrachten Verschraubungen wird der Winkel eingestellt. Die Höhe zueinander wird mit Hilfe einer zentrischen Schraube justiert.

Wenn ein neuer Chip auf die Montageplattform gelegt wird, muss eine Winkelkorrektur durchgeführt werden, so dass der Faser-Chip parallel zur Motorachse der Plattform in X-Richtung ausgerichtet ist. Da der Fasergreifer durch einen manuellen Winkelsteller exakt auf diesen Fall kalibriert wird, ist sichergestellt, dass die Faser immer korrekt in die Führungsstrukturen des Chips eingelegt werden kann. Die Parallelität von Greifer und Silicium-Chip wird ebenfalls durch eine Verschraubung am Greifer eingestellt. Darauf folgt die Kalibrierung der Motorachse der Kamera. Diese wird parallel zur Führungsstruktur des Silicium-Chips ausgerichtet. Damit der Dosierer die Faser entlang fahren kann, ist auch seine X-Achse parallel zur X-Achse der Montageplattform ausgerichtet. Diese Ausrichtung erleichtert die Programmierung des Fügevorgangs, ist jedoch nicht zwingend erforderlich, da bei der Fasermontage nur punktuell Klebstoff aufgetragen wird und nur absolute Positionen angefahren werden.

8.3 Komponenten

8.3.1 Antrieb

Aus den Abmessungen der zu montierenden Chips und der Lage des Glasfasermagazins ergeben sich die notwendigen Verfahrenswege der Anlagenantriebe. Der montierte Faserschalter hat eine Länge von 52 mm und eine Breite von maximal $20,3\text{ mm}$ (8 Schalter pro Chip). Dies sind für Siliciumchips schon relativ große Abmessungen und es wird davon ausgegangen, dass ein Montagebereich von $70 \times 50\text{ mm}$ für die meisten Anwendungen ausreichend ist. Zu diesem Flächenbedarf addiert sich die Größe und Entfernung des Magazins hinzu. Somit ergeben sich notwendige Verfahrenswege von ca. $150 - 300\text{ mm}$ parallel zur Chip-Oberfläche. Zur vertikalen Positionierung des Greifers und der Dosiervorrichtungen werden lediglich wenige Millimeter benötigt.

Auf dem Markt verfügbar sind diverse Antriebskonzepte. In Frage kommen Industrieroboter, Linearmotoren, spindelgetriebene Achsen und parallelkinematiken. Zur Auswahl der geeigneten Komponenten sind Parameter wie die Genauigkeit (Schrittgenauigkeit, absolute Genauigkeit), die Verfahrensgeschwindigkeit und der Preis von großer Bedeutung. Zur Montage der Faserschalter sind die Genauigkeiten, erreichbar mit Hilfe von spindelgetriebenen Linearachsen, ausreichend. Da diese die kostengünstigsten sind, wurden nur solche eingesetzt. Die verwendeten Achsen der Firma Physikinstrumente [97] bieten absolute

Genauigkeiten von $1\ \mu\text{m}$ und relative Schrittweiten von minimal $0,05\ \mu\text{m}$ und $0,5\ \mu\text{m}$ für Achsen kleiner Verfahrswege (M-111.DG) und großer Verfahrswege (M-505.PD, M-531.PD). Nachteil des Spindelantriebs ist, dass sich ein Wechselspiel nicht vermeiden lässt. Wird die Verfahrrichtung geändert, so ergibt sich ein Positionierfehler von $2\ \mu\text{m}$. Da die wirkliche laterale Position der Motorachsen optisch kontrolliert wird, kann diese Ungenauigkeit durch Berücksichtigung in der Software ausgeglichen werden (siehe Abschnitt 9). Eine vertikale Überwachung der Motorungenauigkeit ist nicht zwingend erforderlich (siehe Abschnitt 8.5.1). Variationen der Waferdicke, des Gehäuses und thermische Einflüsse sind eine Größenordnung höher und können durch einen entsprechenden Sensor vermessen werden, wenn dies erforderlich ist.

8.3.2 Bildgebende Systeme

Zur Durchführung der Bildverarbeitung wird ein hochauflösendes optisches System benötigt. Das Objektfeld sollte so groß sein, dass die zu montierende Faser, ggf. eine benachbarte Faser, das Dosiersystem und ein Justagekreuz gleichzeitig betrachtet werden können. Zusätzlich muss ein Toleranzbereich berücksichtigt werden, damit das Justagekreuz trotz Fehlpositionierungen der Motoren oder Chip-Abmessungen sich noch im Objektfeld befindet. Auf dem Faserschalter-Chip befinden sich auf der Ausgangsseite zwei Fasern und ein Justagekreuz mit einer Größe von $120\ \mu\text{m}$. Das Kreuz befindet sich in einem Abstand von $50\ \mu\text{m}$ zu den Fasern. Die maximal zu messenden Positionsabweichungen betragen etwa $70\ \mu\text{m}$. Somit ergibt sich in der Summe ein notwendiges Blickfeld von $520\ \mu\text{m}$.

Bei der Fasermontage muss, während der Greifer die Faser in eine Führungsstruktur drückt, an mehreren Stellen überprüft werden, ob die Faser richtig zum Chip ausgerichtet ist und korrekt in der Führungsstruktur liegt. Da die Montageplattform in dieser Situation nicht bewegt werden darf, müssen entweder mehrere Optiken oder eine verfahrbare verwendet werden, um alle relevanten Bereiche zu überprüfen. Aufgrund der Baugröße herkömmlicher Makroobjektive und Kameras ist eine Verwendung mehrerer Objektive parallel aufgrund des Platzmangels nur bedingt möglich (besonders bei einer senkrechten Ausrichtung der Objektive zur Chip-Oberfläche). Eine Möglichkeit den gesamten Faserbereich zu überwachen besteht darin, eine Kamera durch eine Motorachse verfahrbar zu machen. Hierdurch verliert man jedoch die Möglichkeit der exakten absoluten Positionierung. Die aufgebaute Montageanlage arbeitet aus diesem Grund nur mit einer verfahrbaren Kamera in axialer Faserrichtung, in welcher nur relativ positioniert werden muss.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, so genannte Bildleiter einzusetzen. Diese bestehen aus Faserbündeln, wobei jede Faser einen Bildpunkt bildet. Da die Faserbündel einen sehr geringen Durchmesser haben und flexibel sind, können sie sehr dicht nebeneinander verbaut werden (siehe Abschnitt 8.3.2).

Makro-Objektiv

Gewählt wurde ein Objektiv mit 8x Vergrößerung und eine CCD-Kamera mit 1024×768 Pixeln auf einem $1/2$ zölligen CCD-Chip (Sony XCD700, [98]). Das Objektfeld hat eine

Größe von $800 \times 600 \mu\text{m}^2$. Dies ist ausreichend, um mindestens zwei parallele Fasern und Justagemarkierungen zu erfassen. Die Auflösung liegt bei $0,78 \mu\text{m}/\text{Pixel}$. Das Objektiv (Rodenstock Makro CCD 8 [99]) ist zudem gut geeignet, da es einen geringen Durchmesser (16 mm) bei gleichzeitig großem Arbeitsabstand (75 mm) hat.

Beleuchtet wird mit Hilfe eines teildurchlässigen Spiegels, über welchen das Licht in das Objektiv eingekoppelt wird. Die Hellfeld-Auflicht-Beleuchtung ist sehr gut geeignet um spiegelnde Oberflächen zu beleuchten. Die untersuchten Faserschalter-Chips enthalten V-Gruben, Siliciumnitrid- und Gold-Oberflächen. Durch die Auflichtbeleuchtung erscheinen die V-Gruben vollkommen schwarz, da das Licht durch die perfekt glatten $\{111\}$ -Flächen vom Objektiv weg gespiegelt wird (siehe Abbildung 8.11). Das Gold hingegen reflektiert sehr gut und bildet somit die hellsten Bereiche des Bildes. Die reflektiven Eigenschaften

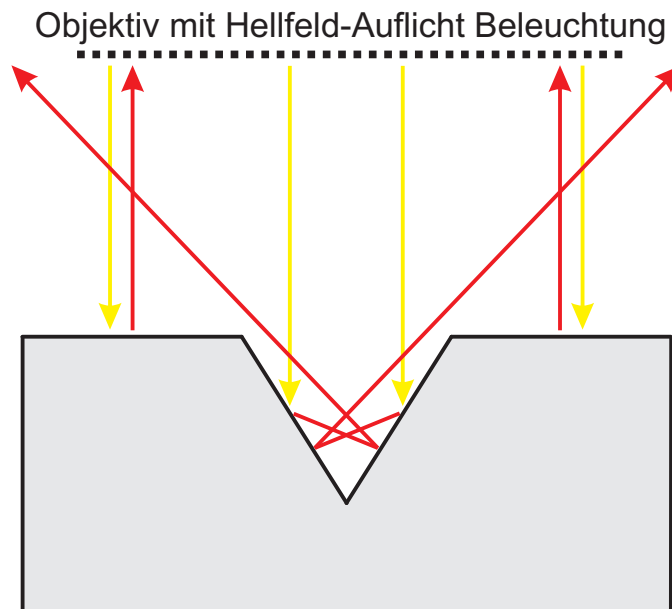


Abbildung 8.11: *Beleuchtung einer V-förmigen Grube mittels Hellfeld-Auflichtbeleuchtung; V-Gruben Flanken reflektieren das einstrahlende Licht sehr schräg, so dass diese dunkel im Bild erscheinen*

des Siliciumnitrids hängen sehr stark von seiner Schichtdicke ab. Diese kann je nachdem welches Herstellungsverfahren verwendet wird Schwankungen unterliegen. Aus diesem Grund ist es nicht immer möglich mit farbigen Filtern oder LEDs zu beleuchten, welche den Kontrast und die Bildschärfe verbessern. Das einstrahlende Licht wird an der Siliciumnitrid- und an der Siliciumoberfläche reflektiert. Durch den Gangunterschied kann bei entsprechender Beschichtungsdicke das Licht destruktiv interferieren. Dies kann konsequenterweise dazu führen, dass kein ausreichend helles Bild für die Durchführung der Montage zur Verfügung steht. In Abbildung 8.12 ist beispielhaft die Reflexion in Abhängigkeit der Si_3N_4 Schichtdicke und der Wellenlänge des beleuchtenden Lichtes für den Spezialfall des senkrechten Lichteinfalls aufgetragen.

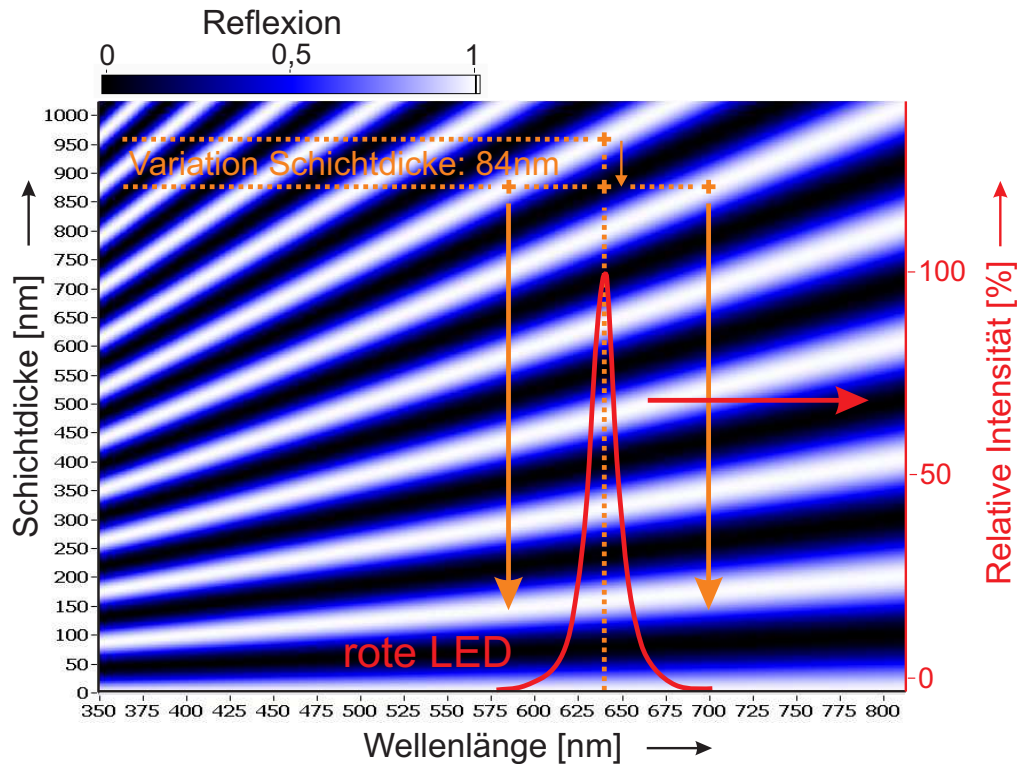


Abbildung 8.12: Reflexion von Licht unterschiedlicher Wellenlänge an einer beschichteten Spiegelfläche. Der Brechungsindex n der Beschichtung wurde mit $n = 2$ angenommen (z.B. Siliciumnitrid).

Um zu verdeutlichen, dass schon bei einer geringen Schwankung der Dicke der Beschichtung sich die reflektiven Eigenschaften von totaler Reflexion zu Absorption verändern, wurden für eine Siliciumnitrid-Dicke von $960 \mu\text{m}$ und einer roten LED-Beleuchtung die maximale Reflexion eingezeichnet. Durch eine Verringerung der Siliciumnitrid Dicke um 84 nm wird kaum noch rotes Licht reflektiert. Bei der Auswahl der Beleuchtung ist folglich die Variation der Dicke zu berücksichtigen. Solche Schwankungen können auftreten, wenn die Oberflächenbeschichtung nicht homogen abgeschieden wird oder durch anschließende Ätzverfahren die Oberfläche durch lokale Ätzrate Schwankungen unterschiedlich schnell geätzt wird. So ist zum Beispiel LPCVD abgeschiedenes Siliciumnitrid besser geeignet als PECVD abgeschiedenes. Sind die Dickschwankungen sehr groß muss mit weißem Licht beleuchtet werden. Die graphische Darstellung verdeutlicht auch, dass bei sinkender Dicke der Verlauf der Maxima und Minima flacher wird. Somit liegt zum Beispiel bei einer Schichtdicke von 80 nm nur ein Maximum im gesamten sichtbaren Frequenzbereich. Bei dieser Schichtdicke liegt ein großer Bereich der Reflexion im blauen Bereich. Bei einer geringen Änderung der Dicke auf zum Beispiel 100 nm verbreitert sich das reflektierte Spektrum, die Farbe verändert sich ins bräunlich-gelbe.

Bildleiter

Im Verlauf der Entwicklung der Montageanlage wurde eine Verwendung von Bildleitern in Betracht gezogen. Bildleiter bestehen aus zusammengeschmolzenen Glasfasern. Jede

einzelne Faser bildet hierbei einen Bildpunkt. Der Vorteil des Bildleiters liegt darin, dass der gesamte Durchmesser des Leiters sehr gering im Vergleich zu herkömmlichen Optiken sein kann und dass die Kamera nicht in einer Achse mit der Optik angeordnet sein muss. Somit ergeben sich einige Vorteile für die Fasermontage. Durch den Einsatz mehrerer Bildleiter kann die Visualisierung parallel erfolgen, was die Geschwindigkeit der Montage erhöht. Werden die Bildleiter in ein Werkzeug integriert (z.B. den Greifer) kann die gesonderte Überwachung der Werkzeugposition entfallen, da die Optik bei einem fehlerhaft positioniertem Werkzeug um den gleichen Betrag verschoben ist.

Der Nachteil der Bildleiter gegenüber herkömmlichen Mikroskop-Optiken liegt neben des

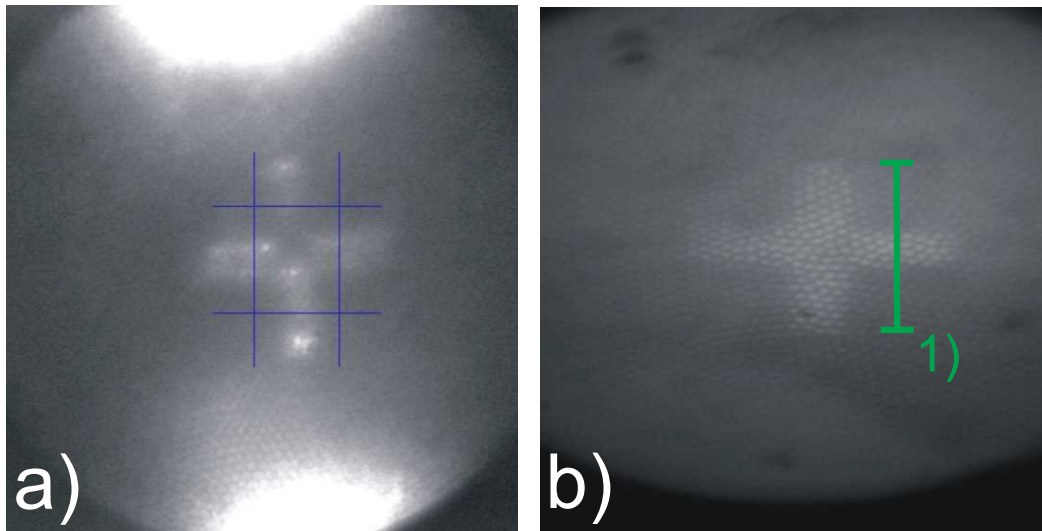


Abbildung 8.13: *Goldkreuz auf Siliciumnitrid mit Bildleiter aufgenommen. Beleuchtung durch lichtleitende Fasern; inhomogene Beleuchtung mit zwei Fasern a), homogenere Beleuchtung durch Erhöhung der Anzahl der Beleuchtungsfasern b). Linienprofil (1) ist in Abbildung 8.14b) dargestellt.*

höheren Preises in der geringeren Ortsauflösung, Kontrast und Lichtempfindlichkeit. Untersucht wurde, ob die Bildleiter grundsätzlich geeignet für die Montage von Faserschaltern sind. Für die Versuche standen Bildleiter der Firma Milasys Technologies zur Verfügung [81]. Die Leiter bestehen aus ca. 3000 Einzelfasern mit einem Durchmesser von jeweils $3\ \mu\text{m}$. Der gesamte Durchmesser des Bündels beträgt ca. $400\ \mu\text{m}$. Mit Hilfe zweier antireflex beschichteter Sammellinsen wird das Objektfeld parallel auf den Bildleiter abgebildet. Eine Mikroskop-Optik mit Kamera dient auf der Ausgangsseite zur Aufnahme des Bildes. Der Brennpunkt der Sammellinsen und somit der Arbeitsabstand beträgt ca. $500\ \mu\text{m}$. Die Beleuchtung erfolgte in ersten Versuchen mit lichtleitenden Fasern, welche direkt neben dem Bildleiter fixiert waren. Durch die reflektierende Oberfläche des Siliciumchips gilt jedoch auch hierbei, dass idealerweise eine Hellfeld-Aufflichtbeleuchtung verwendet werden sollte (siehe Abbildung 8.13). Dies ergab ein homogenes ausgeleuchtetes Objektfeld und eine leichte Kontrastverbesserung (siehe Abbildung 8.14).

Mit Hilfe der koaxial beleuchteten Bildleiter konnten Goldkreuze aufgrund ihres guten Kontrastverhältnisses zur Siliciumnitrid-Oberfläche des Chips, detektiert werden. Die Genauigkeit der Vermessung der Kreuze konnte nicht exakt bestimmt werden, es kann jedoch nicht mit einer Genauigkeit von besser als $3\ \mu\text{m}$ gerechnet werden, da durch eine versetzte Anordnung der Bildfasern Kanten nur sehr grob aufgelöst werden. Andere Objekte wie

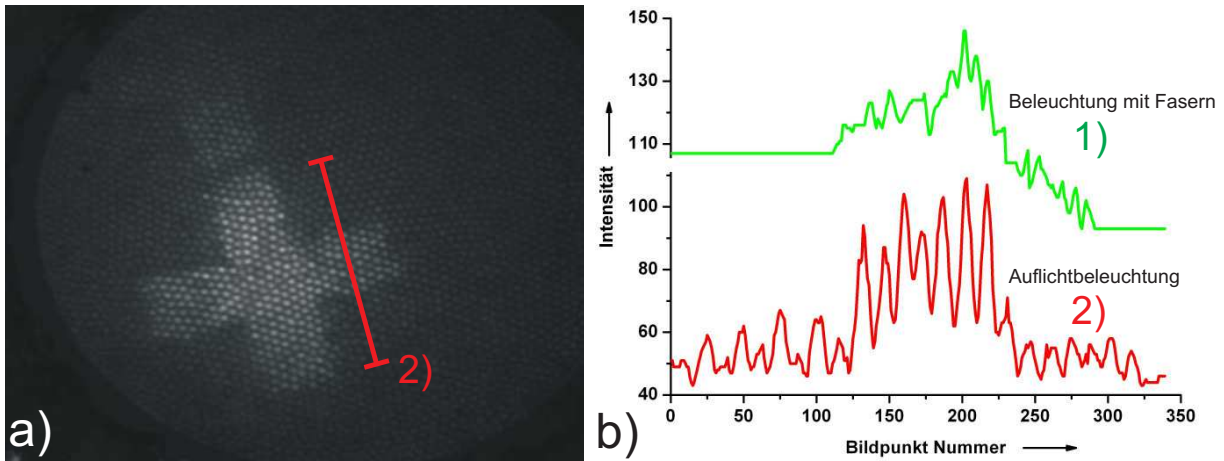


Abbildung 8.14: Goldkreuz auf Siliciumnitrid mit Bildleiter aufgenommen; ko-axiale Aufsichtbeleuchtung durch den Bildleiter führt zu Kontrastverbesserung a); Linienprofile der Kreuzarme für die zwei Beleuchtungsvarianten: Ringlicht mit Beleuchtungsfasern und Aufsichtbeleuchtung b)

zum Beispiel V-Gruben konnten aufgrund des geringen Kontrasts zur Chip-Oberfläche nicht detektiert werden.

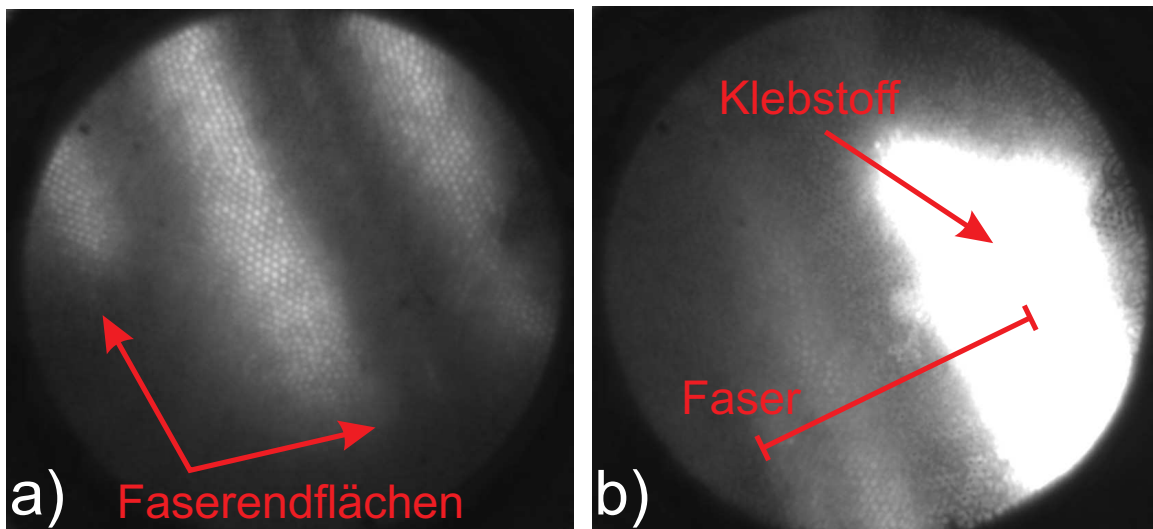


Abbildung 8.15: In Silicium V-Grube eingeklebte Fasern. Aufnahme von Bildleiter mit starker horizontaler Beleuchtung mit Kaltlichtquelle. a) zwei Faserenden b) eine eingeklebte Faser

Ein weiterer Test bestand darin, zu untersuchen, ob Glasfasern und Klebstoff sichtbar gemacht werden können. Dies gelang nur mit Hilfe sehr starker seitlicher Beleuchtung nahezu parallel zur Chip-Oberfläche. Sichtbar wurden vor allem die gewölbten Randbereiche der Fasern und der Klebstofftropfen auf einer Siliciumnitrid-Oberfläche, da das Licht dort z.T. senkrecht nach oben reflektiert wird (siehe Abbildung 8.15).

Die durchgeführten Versuche machten deutlich, dass zum derzeitigen Entwicklungsstand die Anwendung von Bildleitern zur Unterstützung bei der Fasermontage nicht vorteilhaft ist, da mit Hilfe einer konventionellen Optik weitaus bessere Ergebnisse erzielt werden können.

8.3.3 Magazinierung & Zuführung der Glasfasern

Die Faservorbereitung ist nicht Teil dieser Arbeit, da manuelle Werkzeuge und halb- und vollautomatische Anlagen kommerziell verfügbar sind [100][101][102][103][104]. Vor der Montage werden die Fasern auf die benötigte Länge gekürzt. Daraufhin wird der Sekundärmantel und der Primärmantel der Faser auf die richtige Länge gebracht. Zumindest der Primärmantel sollte so lang gewählt werden, dass er noch mit der Komponente verklebt werden kann, da ansonsten keine Zugentlastung vorhanden ist und die Faser am Ende des Silicium-Chips abscheren kann. Nach einer Reinigung der Faser (siehe auch [74], S.25-31) wird eine glatte Stirnfläche durch das so genannte „Cleaving“ erzeugt. Dies geschieht häufig durch ein Spannen, Anritzen und Spalten der Faser mittels einer Diamantschneide. Hierdurch entsteht außen auf der Faser eine kleine Beschädigung, welche allerdings die Übertragungseigenschaften der Faser zumeist nicht beeinflusst. Die Genauigkeit der Vermessung mit Hilfe der Bildverarbeitung kann jedoch hierdurch beeinträchtigt werden. Häufig werden die Fasern zur besseren Handhabung in eine standardisierte Einspannvorrichtung geklemmt (siehe Abbildung: 8.16). Die Faserhalter sind verfügbar für



Abbildung 8.16: *Glasfaser Klemmvorrichtung für die Handhabung der Fasern zwischen Entmantel-, Cleaver- und Spleiß-Geräten*

einzelne Fasern und Faserbändchen unterschiedlicher Breite. Mit Hilfe der Spannvorrichtungen könnten die Fasern auch an ein entsprechendes Fasermagazin der Montageanlage übergeben werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Konzepte zur geordneten Bereitstellung der Glasfasern für den Montageprozess erarbeitet. Das erste hier vorgestellte Konzept beinhaltet alle für die Montage notwendigen Voraussetzungen. Die Einbindung in die gesamte Wertschöpfungskette machte die Erarbeitung eines weiteren Konzeptes notwendig, da kein Faserhalter verwendet wurde (Abbildung 8.16). Dieses wurde im Rahmen einer Masterarbeit und einer Studienarbeit von M. Mohan, M. Pähler und T. Rettig [105][106] in Zusammenarbeit mit Herrn Gayk vom Lehrstuhl Industrielle Robotik und Handhabungssysteme der Universität Dortmund entwickelt.

Das in Abbildung 8.17 dargestellte Fasermagazin stellt bis zu acht Fasern für die Montage zur Verfügung. Damit die Fasern sehr präzise für den Greifer bereitgestellt werden können, werden Führungsstrukturen eingesetzt. Axialen Halt und eine erste laterale Vor-Ausrichtung wird durch kurze, versetzt angeordnete Madenschrauben erreicht. Diese klemmen die Fasern mit der Ummantelung fest. Darauf folgen U-Gruben mit einer Breite von $275\ \mu\text{m}$. Das entmantelte Faserende wird schließlich mit Hilfe einer V-Grube exakt positioniert. Die V-Gruben wurden ebenso wie die U-Gruben aus Silicium mit Hilfe des KOH Ätzverfahrens hergestellt. Die V-Gruben wurden von der Rückseite so angeätzt, dass eine Vakuumanströmung ermöglicht wird. Somit können die Fasern besser in Position gehalten werden.

Dieses Fasermagazin wurde für den Faserschalter zweifach, spiegelförmig angeordnet, damit der zu montierende Chip von zwei Seiten mit Fasern bestückt werden kann, ohne das Magazin oder den Chip drehen zu müssen.

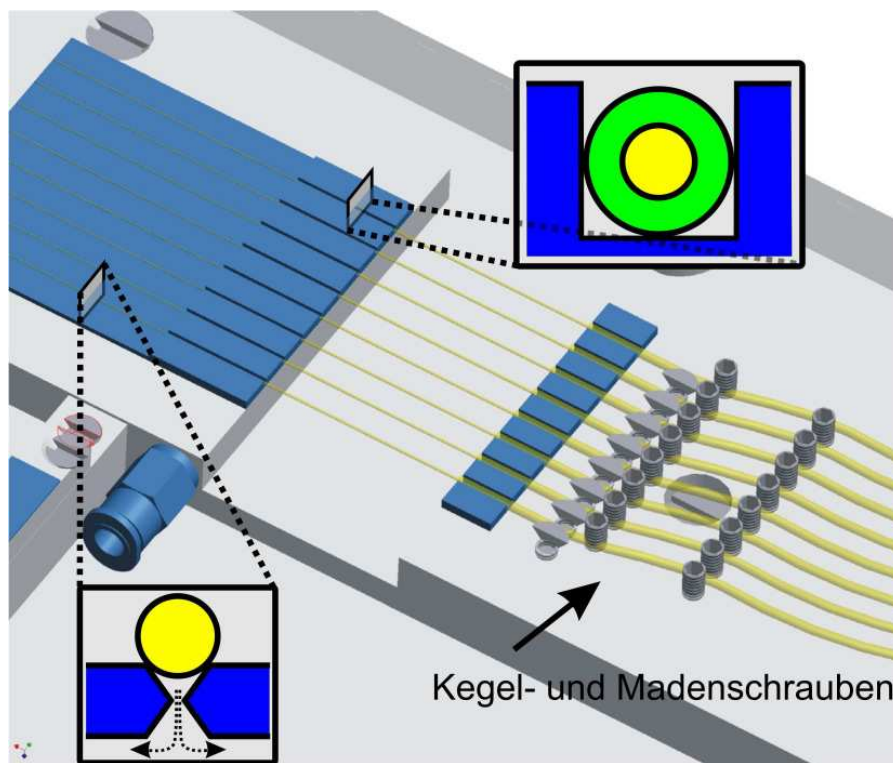


Abbildung 8.17: 3D-Zeichnung eines 8-fach Fasermagazins mit V- und U-förmigen Führungsstrukturen aus Silicium mit Vakuumanströmung.

Dieser Aufbau ist ausreichend, um die Funktion der Montageanlage testen zu können und kann auch für kleinere Stückzahlen verwendet werden. Durch die Befestigung der Montageplattform und des Magazins auf einer Wechselplatte nach DIN 32563 wird eine kontinuierliche Zu- und Abfuhr der Chips und Fasern gewährleistet. Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass die Fasern ohne jegliche Einspannvorrichtung gehandhabt werden müssen. Dies birgt die Gefahr der Beschädigung der Fasern beim Einbringen in das Magazin. Zudem kann es den Materialfluss stören, je nachdem welche kommerziell erhältlichen Werkzeuge zur Vorbereitung der Fasern eingesetzt werden. Mit Hilfe der Bildverarbeitung muss die genaue Position der Faserendflächen gesucht werden, da diese nur auf etwa einen

Millimeter genau in das Fasermagazin eingebracht werden können.

In Abschnitt 8.3.3 wurde bereits erwähnt, dass bei vielen Werkzeugen zur Vorbereitung der Glasfasern standardisierte Faserhalter zum Einsatz kommen. Auf diese Weise kann das bestehende Konzept erweitert werden, indem die Fixierung der ummantelten Fasern mit Hilfe der Faserhalter in Kombination mit einer V-Grube mit Vakuumsaugung erfolgt. Eine Skizze des Magazins ist in Abbildung 8.18 dargestellt.

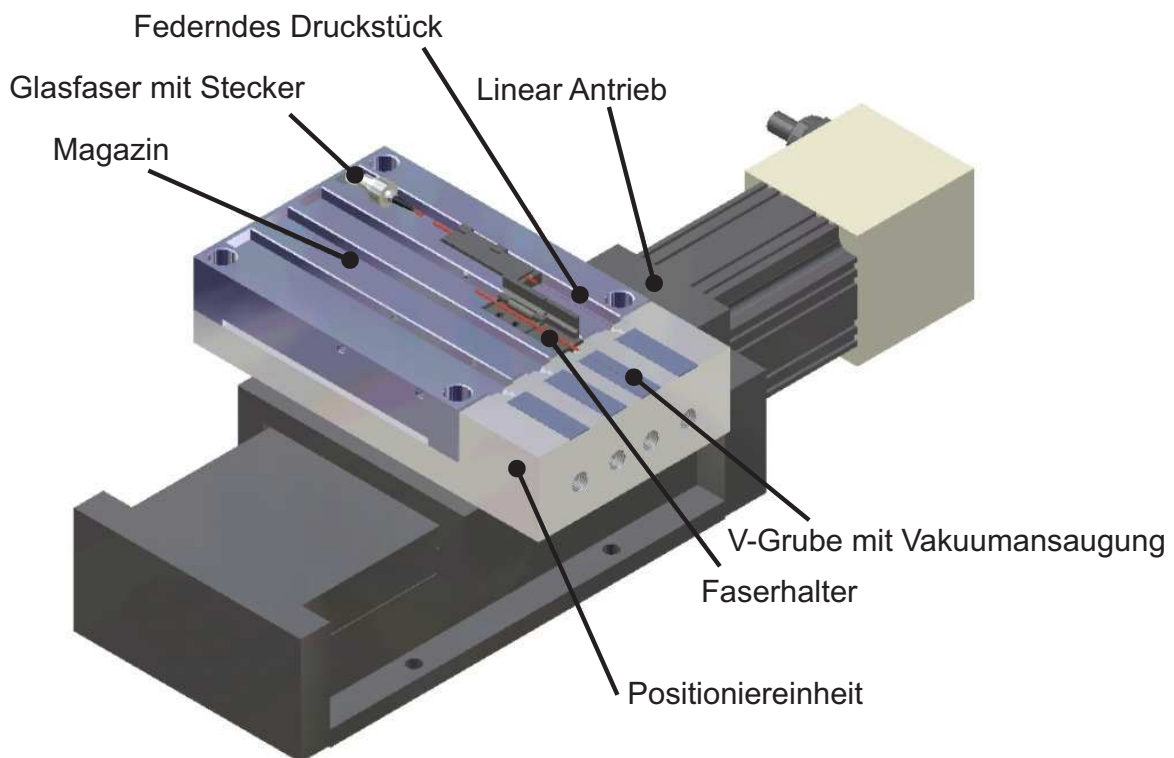


Abbildung 8.18: 3D-Zeichnung eines 4-fach Fasermagazins mit V-förmigen Führungsstrukturen mit Vakuumsaugung und Einbezug der Faser Klemmvorrichtung (aus [106]).

Die kommerziell erhältlichen Faserhalter sind mit einer Einzelfaser Aufnahme ausgestattet. Somit werden für einen Chip mit vier 1x2 Schaltern zwölf Faserhalter benötigt. Diese beanspruchen sehr viel Raum auf der Montage-Grundplatte. Die Entwicklung von Faserhaltern mit mehreren Fasern, welche in einem Rasterabstand angebracht sind, der auf den Fasergreifer abgestimmt ist, wäre folglich sinnvoll. Des weiteren müssen die Deckel der Faserhalter bei Bedarf automatisch zu öffnen sein, da diese erst geöffnet werden dürfen, wenn der Greifer die Fasern gegriffen hat. Bei einer vorzeitigen Öffnung der Deckel besteht die Gefahr, dass die Vakuumsaugung im V-Grubenbereich nicht für eine Fixierung der Fasern ausreicht. Eine Möglichkeit besteht darin, die Magnetverschlüsse nicht klappbar auszuführen, sondern abnehmbar, so dass ein am Fasergreifer angebrachter Elektromagnet die Deckel abnehmen kann. Ein ähnliches Konzept wurde im Forschungsprojekt: „Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen“ zur Fixierung der Fasern eingesetzt ([74], S.19).

Fixierung des Siliciumsubstrats auf der Montageplattform

Die Fertigungsplattform muss eine gute Fixierung des Chips während der Montage sicherstellen. Zudem sollte der Vorgang des Chip-Wechsels schnell und präzise erfolgen können. Eine Möglichkeit ist die Fixierung des zu montierenden Chips auf einem Substrat, welches später als Unterteil der Häusung dient. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Chip direkt auf eine vorhandene Plattform mit Anschlügen oder Führungsstrukturen zu legen. Der Vorteil der Montage in ein Gehäuse liegt darin, dass der fertig montierte Chip sehr gut handhabbar ist. Nachteilig wirken sich die Toleranzen des Gehäuses und der Positionierung des Chips im Gehäuse aus, so dass eine laterale Bildererkennung sowie ein Abstandssensor für das Greifwerkzeug notwendig sind. Ein solches Gehäuse wurde im Rahmen eines Projekts, finanziert durch die Stiftung Industrieforschung [107], von der Firma Euromicron [108] in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Hochfrequenztechnik der Universität Dortmund entwickelt.

Für diese Arbeit wird, statt des Gehäuses, eine glatte Plattform mit Löchern für eine

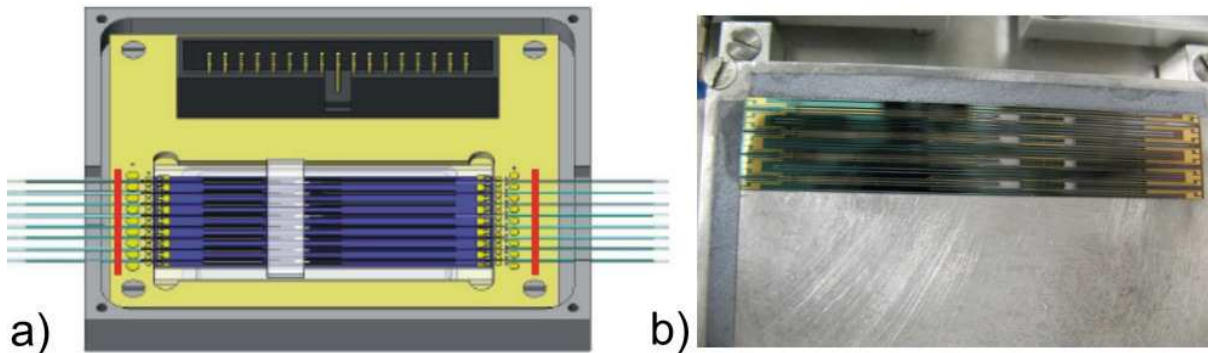


Abbildung 8.19: *Zeichnung eines Faserschalter-Chips montiert in Gehäuse (a) [107]; Foto der Chip-Halterung mit Anschlügen aus Silicium, Höhe der Anschlüsse $200\ \mu\text{m}$, um Abstand zu den Fasern zu gewährleisten (b)*

Vakuumsaugung genutzt, auf welcher der Faserchip direkt aufgelegt wird. Anschlüsse aus $250\ \mu\text{m}$ dickem Silizium dienen der reproduzierbaren Positionierung der Chips. Der Wechsel des Chips ist somit einfach durchführbar.

Die Reproduzierbarkeit des Anlegens eines Chips an die Anschlüsse wurde mit Hilfe der Bildverarbeitung untersucht (siehe Abschnitt 8.5.2). Da die erreichbare Wiederholgenauigkeit nicht für eine passive Montage ausreichend ist, muss mit Hilfe der Bildverarbeitung nachjustiert werden.

8.4 Software-Architektur

Neben dem mechanischen Konzept der Montageanlage spielt der Aufbau der Software und die implementierten Funktionen eine wichtige Rolle, im Hinblick auf Funktionalität und

Flexibilität der Montageanlage.

Die Software der Montageanlage wurde hauptsächlich mit der graphischen Programmiersprache LabView der Firma National Instruments programmiert [109]. Die Programmierung erfolgt mit Hilfe von Blockschaltbildern. Dies erleichtert den Aufbau einer Bibliothek von Programm-Modulen, welche zu einer Applikation zusammen gefügt werden können [92], da die Programmierung anschaulicher ist.

8.4.1 Konzepte

Der Aufbau einer Modul-Bibliothek und somit die spezielle Programmierung einer Applikation für eine Montageaufgabe ist eine gute Möglichkeit die Gegensätze Flexibilität und Spezialisierung auf eine Montageaufgabe zu vereinen. Es zeigte sich, dass diese Art des Programmaufbaus sich besonders für halbautomatische Programmabläufe und den Prototypenbau eignet. Eine weitere Möglichkeit der Software-Gestaltung liegt in einem Rezept basierten Ansatz (siehe Abbildung 8.20). Alle Prozessschritte werden in einer Datenbank, dem Rezept, durch Anlernen oder eine so genannte „Offline“ Programmierung gespeichert (siehe auch [110]). In einem solchen Rezept sind neben den anzufahrenden

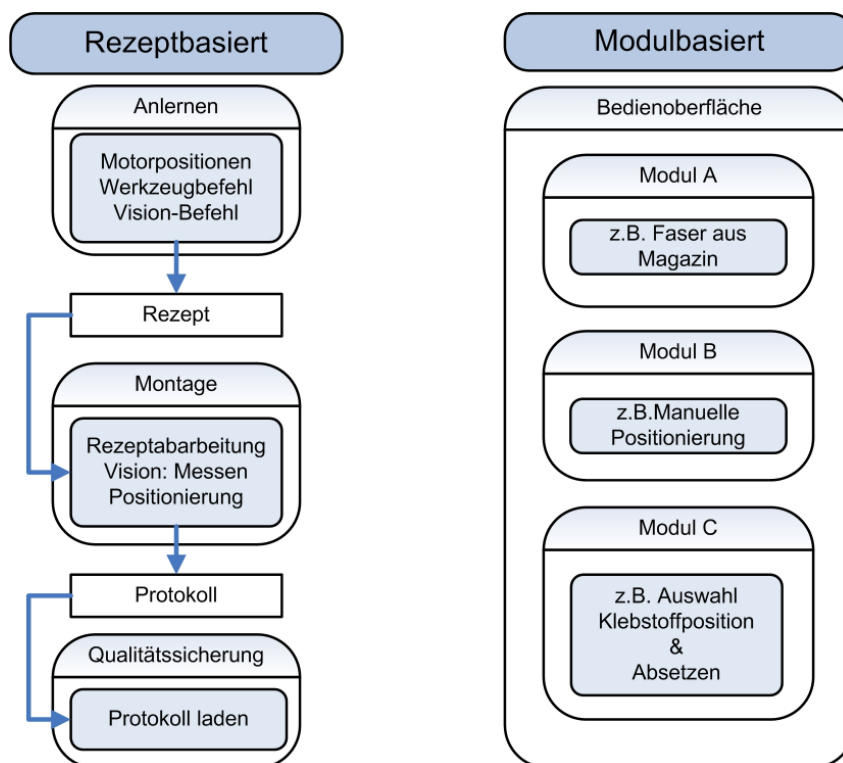


Abbildung 8.20: Der Aufbau der Software kann modular aus einer vorhandenen Bibliothek erfolgen oder eine universelle Anwendung wird durch Rezepte an die jeweilige Anwendung angepasst.

Motor-Positionen auch Anweisungen für die Werkzeuge und Bildverarbeitungsbefehle gespeichert. Zu den einzelnen Anweisungen müssen zusätzlich noch Sollwerte und Parameter angegeben werden. Für die Positionierung anhand einer Justagemarkierung muss

zum Beispiel angegeben werden, welche Markierung im Objektfeld gesucht werden soll (Template) und wo die Markierung im Bild positioniert werden soll. Um eine größtmögliche Flexibilität zu gewährleisten, sollten auch Parameter übergeben werden, die sich von Produkt zu Produkt unterscheiden können. Dies kann, um bei dem Beispiel der Positionierung zu bleiben, der Kontrast zwischen der Chip-Oberfläche und der Justagemarkierung sein. So kann die Kantendetektion an unterschiedliche Oberflächen angepasst werden. Durch das Rezept können neue Funktionen problemlos integriert werden. Das eigentliche Hauptprogramm muss nur die Befehle der Reihe nach abarbeiten und die einzelnen Module, wie zum Beispiel „Faser aus Magazin holen“, „Klebstoff aufbringen in Position X,Y“, aufrufen.

Sehr hilfreich hat sich die Archivierungsfunktion erwiesen. Jeder durchgeführte Prozessschritt wird in einer Datenbank protokolliert. Nützlich ist hier die Speicherung von Aufnahmen der Kamera, Messergebnissen und Bewertungen der einzelnen Funktionen über den Erfolg der ausgeführten Aktion.

8.4.2 Schnittstellen

Bislang wurden zwei wichtige Schnittstellen beschrieben: die Eingabe von Daten mittels eines Rezeptes und die Ausgabe von Daten für ein Protokoll. Im Falle eines modulbasierten Systems, bei welchem kein Rezept verwendet wird, ersetzt die Kombination aus ausgewählten Bedienelementen in der Software und die Interaktion des Benutzers das Rezept. Die Erzeugung eines Protokolls ist in beiden Fällen möglich, jedoch ist eine durchgängige Protokollierung bei teilautomatischen oder rein manuellen Prozessen schwieriger zu realisieren. Eine weitere Schnittstelle ist der direkte Dialog zwischen dem Rechner und dem Anlagenbetreuer. Auf der Bedienoberfläche werden ständig die aktuellen Fotos mit überlagerten Kennzeichnungen der Messpunkte angezeigt. So kann der Benutzer sehr schnell erkennen, ob eine Fehlfunktion der Bildverarbeitung vorliegt. Ein Textfeld zeigt an, welcher Prozessschritt gerade durchgeführt wird. Anhand einer farbigen Kennzeichnung (Rot: Fehler, Gelb: evtl. Fehler, Grün: korrekte Ausführung) wird der Erfolg des Montageprozesses angezeigt. Der Benutzer kann zusätzlich jederzeit die Montage anhalten, abbrechen oder gegebenenfalls manuell korrigieren, falls ein Fehler auftritt.

8.5 Wiederholgenauigkeit der Montageanlage

Die Wiederholgenauigkeit der Einzelkomponenten sowie der gesamten Montageanlage wird im Folgenden ermittelt. Die Messung in Abbildung 8.21 zeigt die Notwendigkeit einer präzisen Positionierung von SMF28-Fasern in V-Gruben. Dargestellt ist eine optische Dämpfungsmessung, bei welcher zwei Fasern in einer V-Grube stoßgekoppelt wurden. Eine Faser wurde angehoben, lateral versetzt und wieder in die Grube gelegt. Die Messung zeigt deutlich, dass die Faser bis zu einem Versatz von $2\ \mu\text{m}$ durch die V-Grube in die korrekte Lage gebracht wird. Größere Ungenauigkeiten können nicht mehr vollständig

durch die V-Gruben korrigiert werden.

Bei der Montage von flexiblen Aktorstrukturen, wie beim Faserschalter (Abschnitt 8.1), sind die Toleranzen größer (etwa $9\ \mu\text{m}$), da die Faserführung hierbei nicht mehr durch die Führungsstruktur des Greifers und des Chips überbestimmt ist.

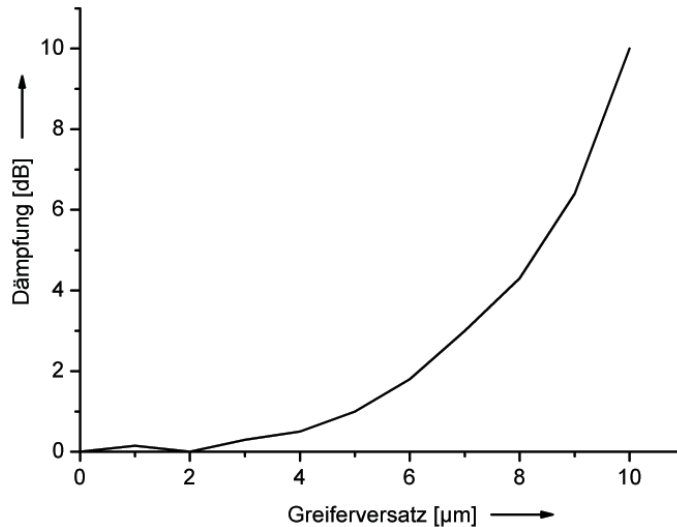


Abbildung 8.21: *Optische Dämpfungsmessungen der Auswirkung eines radialen Greifer Versatzes bei der V-Gruben Montage mit SMF28-Fasern*

8.5.1 Spindelmotoren

Die Genauigkeit der spindelgetriebenen Linearachse M111.1DG der Firma Physikinstrumente [97] wird im Folgenden näher beleuchtet, da dieser unter anderem zur Höhenverstellung des Fasergreifers eingesetzt wird. Die Anforderung an den Motor sind hoch, wenn für einen Chip nur einmal die erforderliche Höhe durch einen Sensor bestimmt werden soll und die Position auf dem Fasermagazin und dem Faserchip während der Montage wiederholt angefahren werden soll. Bei einem achtfach 1×2 Faserschalter mit 24 zu montierenden Fasern muss der Greifer 24 mal über dem Magazin und 24 mal über dem Faserchip positioniert werden.

Zur Bestimmung der Genauigkeit wurde an den Motor eine Dünnkern-Faser befestigt und die Stoßkopplung zu einer weiteren Faser gemessen. Der Motor ermöglicht laut Datenblatt eine absolute Genauigkeit von $1\ \mu\text{m}$. Diese Genauigkeit resultiert aus der Genauigkeit des Referenzsensors und dem Gewindenspiel des Antriebs. In Abbildung 8.22 sind die Ergebnisse zweier Messreihen dargestellt. In Graph a) wurde gezielt darauf geachtet, dass beim erstmaligen einspeichern der Position nur aus einer Richtung an die Sollposition gefahren wurde. Das Gewindenspiel macht sich folglich nicht bemerkbar. Nach einhundert Durchläufen, bei denen fünf Zwischenpositionen und dann die Sollposition angefahren wurde traten nur geringe Variationen der Dämpfungen auf. Die zugehörige Abweichung von der Sollposition lag hierbei immer unterhalb von $0,6\ \mu\text{m}$. Ohne eine gesonderte Verfahrensweise bei der Abspeicherung der Sollposition kann das Gewindenspiel hinzukommen.

In Abbildung 8.22 b) ist ein Graph mit 25 Durchläufen angegeben. Der maximale Fehler betrug $1,4 \mu\text{m}$.

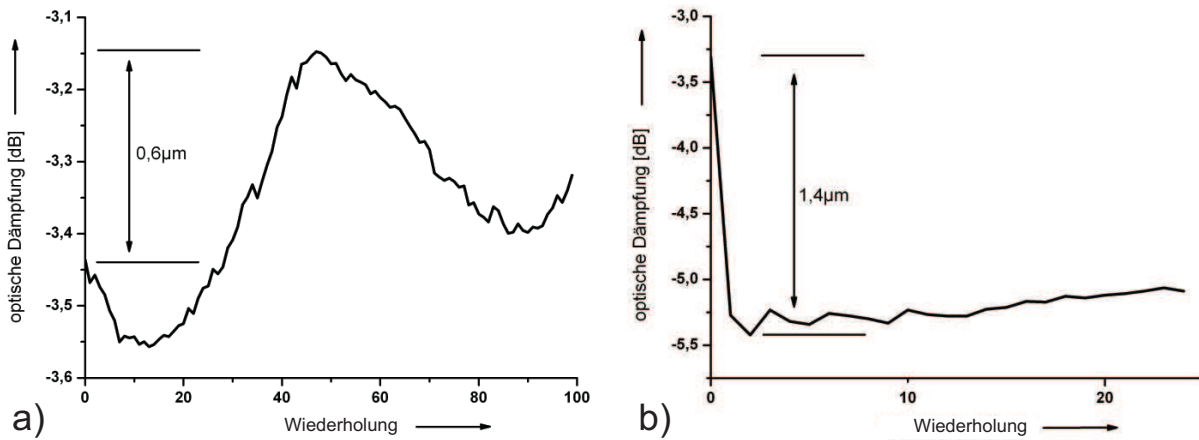


Abbildung 8.22: Verschiebungsmessungen zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit von M111.1DG Linearantrieben, Dämpfungen mit Annäherung an Sollposition von einer Seite beim Speichern (a); Annäherung von beliebiger Seite (b), Gewindespiel des Motors ist vermeidbar durch gezielte Programmierung

8.5.2 Montageplattform

Beim Auflegen eines neuen Chips auf die Montageplattform an die hierfür vorgesehenen integrierten Anschlüsse kommt es häufig zu Fehlern. Selbst bei sehr vorsichtigem vorgehen kommt es durch den manuellen Vorgang zu Positionierfehlern von $8 \mu\text{m}$ in Richtung parallel zu den Fasern. Senkrecht zur Faserrichtung ergab sich ein um $1 \mu\text{m}$ größerer Wert, da der verwendete Chip durch die Strukturierung in dieser Richtung eine Federwirkung aufweist. Zu dieser Fehljustage addiert sich der ungenaue Sägezuschnitt. Um die Abweichungen beim Sägen testen zu können wurden die fertigen Wafer mit einer Wafersäge zerteilt. Chips von unterschiedlichen Wafern wurden nacheinander an die Anschlüsse auf der Montageplattform gelegt und dann die Position der Chips anhand der integrierten Justagemarken auf dem Chip ausgewertet. Durch die Größenvariation der Chips ergaben sich radiale Abweichungen von bis zu $60 \mu\text{m}$ und Winkelungenauigkeiten von bis zu 74mGrad . Für das Verkleben von Glasfasern in Führungsstrukturen würde der Lagefehler einen vollkommenen Funktionsausfall bedeuten. Bei längeren Chipvarianten spielt der Winkelfehler eine zunehmend größere Rolle. Beträgt der Fehler bei einer Grubenlänge von 10mm noch $14,5 \mu\text{m}$, stellt sich bei dem beispielhaft montierten 1×2 Faserschalter (siehe Abschnitt 8.1) bei einer V-Grubenlänge von 35mm eine Abweichung von $50,8 \mu\text{m}$ ein. Folglich muss der Winkel und die Position des Chips kontrolliert und justiert werden.

8.5.3 Gesamtsystem

Die gesamte Genauigkeit der Montageanlage setzt sich aus den in Abbildung 8.23 dargestellten Einflussgrößen zusammen. Startpunkt und Endpunkt der Montage bilden das Fasermagazin und der zu montierende Silicium-Chip. Entscheidend ist, dass diese beiden Punkte exakt definiert sind und reproduzierbar angefahren werden können. So befinden sich V-Gruben zur lateralen Führung der Fasern und Justagemarken für die Bildverarbeitung an diesen Endpunkten. Somit kann der Winkel und die Position der Komponenten mit Hilfe der Bildverarbeitung justiert werden. Die Faserendfläche wird relativ zur Kamera oder relativ zu einer anderen Faser (auf dem Chip) mit der Bildverarbeitung positioniert (siehe Kapitel 9).

Die Wiederholgenauigkeit der Greifer wurde bereits in Abschnitt 7.2 bestimmt. Es wurde

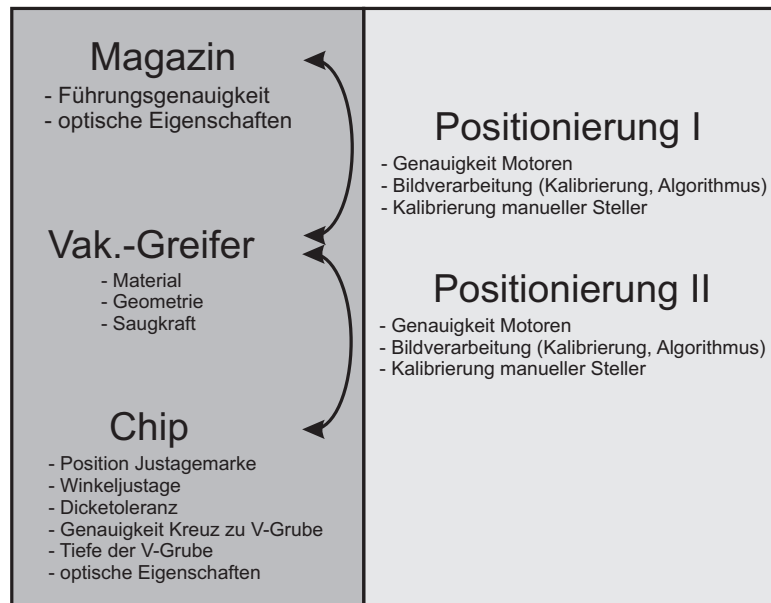


Abbildung 8.23: Einflussgrößen auf die Systemgenauigkeit der Fasermontageanlage

ein maximaler Fehler von weniger als $0,5 \mu m$ gemessen. Da das Fasermagazin die Faser sehr exakt führt und das Magazin mit Hilfe der Bildverarbeitung positioniert wird, ist eine Greifgenauigkeit deutlich unter diesem Wert zu erwarten. Da der Luftstrom des Greifervakuums eine zentrierende Wirkung hat, ist nicht unbedingt davon auszugehen, dass sich Ungenauigkeiten vom Aufnahmevorgang auf den Montagevorgang übertragen und aufsummieren. Die Genauigkeit des Aufnahmevorgangs aus dem Magazin konnte nicht separat bestimmt werden. Die Versuche zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit des gesamten Montagevorgangs zeigten jedoch eine mehr als ausreichende Genauigkeit. Zur Bestimmung der gesamten Wiederholgenauigkeit wurde die aus dem Fasermagazin aufgenommene Faser vor einer weiteren fest montierten Faser auf der Montageplattform stoßgekoppelt.

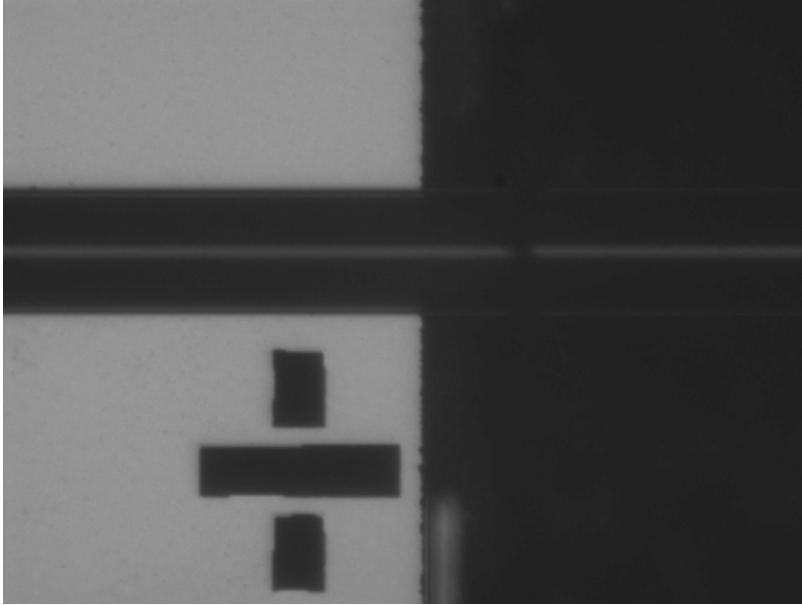


Abbildung 8.24: Foto des Koppelbereichs bei der Bestimmung der Montageanlagengenauigkeit

Diese wurde befestigt, indem sie in eine V-Grube auf einem Silicium-Chip eingeklebt wurde. Die Faserendfläche ragte $100\ \mu\text{m}$ über den Rand des Chips hinaus. Der Chip wurde mit Hilfe der Vakuumsaugung der Montageplattform und der Anschläge in Position gehalten. Die optimale Position der Fasern zueinander wurde gespeichert und konnte in den folgenden Versuchen wiederholt angefahren werden. Über die Durchgangsdämpfung konnte die Abweichung in Dezibel gemessen und dann durch eine zuvor durchgeführte Verschiebungsmessung in Mikrometer umgerechnet werden. Zur Kontrolle wurde nach der Messung mit Hilfe der Motoren das Dämpfungsminimum wieder angefahren. Das Gewindespiel der Motoren ($2\ \mu\text{m}$) konnte durch Ablesen des Messwertes berücksichtigt werden. Es kann bei dieser Verfahrensweise jedoch nur von einer Genauigkeit von $0,5\text{--}1,0\ \mu\text{m}$ ausgegangen werden. Darüber hinaus konnten Verschiebungen unterhalb von $0,5\ \mu\text{m}$ durch die Dämpfungsmessungen nicht erfasst werden, da die Änderungen der Dämpfung nahe des Optimums zu gering sind.

Die gemessene Wiederholgenauigkeit der Montageanlage lag unterhalb von $0,5\ \mu\text{m}$ lateral zur Faser und unterhalb von $2\ \mu\text{m}$ vertikal zur Faser. Unter der Annahme einer Messgenauigkeit von $\pm 0,5\ \mu\text{m}$ liegt die maximal zu erwartende Ungenauigkeit bei $1\ \mu\text{m}$ bzw. $2,5\ \mu\text{m}$. Die vergleichsweise hohe Ungenauigkeit der vertikalen Positionierung wird durch das Gewindespiel des Motors hervorgerufen, da die vertikale Position ohne Sensor angefahren wurde. Durch eine geeignete Abfolge der Motorbewegung, kann das Gewindespiel reduziert werden. Eine solche Messreihe zeigte, dass dann auch bei der vertikalen Genauigkeit ein Wert von $0,5\ \mu\text{m}$ nicht überschritten wird. Ein Sensor zur Bestimmung der vertikalen Position ist somit nicht zwingend erforderlich. Nur bei zu großen Schwankungen der vertikalen Chip-Position sollte ein Sensor eingesetzt werden.

Ein kritischer Punkt ist jedoch der Einfluss von Temperaturschwankungen der Raumluft. In Abbildung 8.25 sind die gemessenen lateralen Verschiebungen von 30 Wiederholungen aufgetragen. Die lateralen Abweichungen liegen anfangs erwartungsgemäß unterhalb von $0,5\ \mu\text{m}$ (da keine präzise Messung unterhalb von $0,5\ \mu\text{m}$ möglich war, wurde für alle

Messwerte kleiner gleich $0,5 \mu\text{m}$ ein Wert von $0,5 \mu\text{m}$ festgesetzt). Die lateral erreichbare Genauigkeit wird durch die sehr gut funktionierende Vermessung mit Hilfe der Bildverarbeitung erreicht. Im Verlauf der Messungen ist ein kontinuierlicher Anstieg der Abwei-

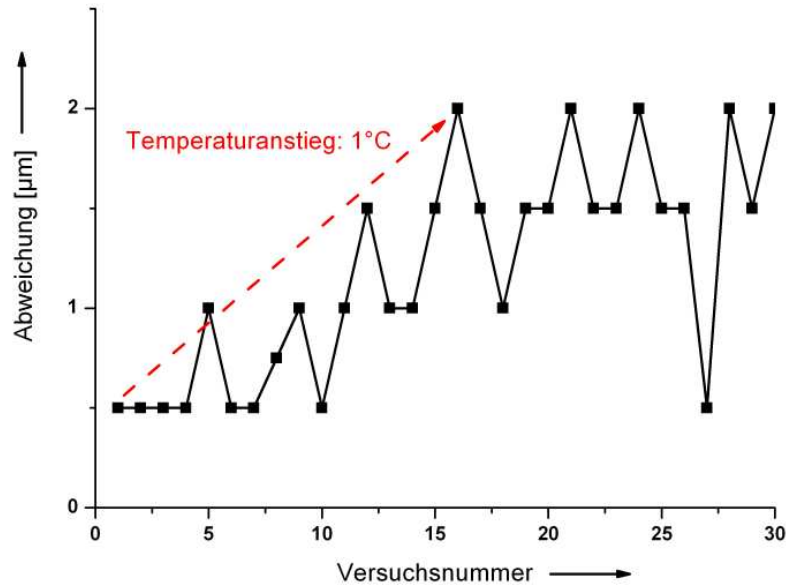


Abbildung 8.25: Messung der lateralen Wiederholgenauigkeit in μm ; Ein Temperaturanstieg von ca. 1°C der Raumluft verursacht eine Drift der Messwerte.

chungen zu beobachten. Durch zusätzliche Versuche konnte ermittelt werden, dass dies eine Folge der Erhöhung der Raumtemperatur um 1°C ist.

Mit Hilfe eines Infrarot-Thermometers und eines Raumlufttemperaturfühlers wurde das Temperaturverhalten der Montageanlage untersucht. Zunächst lässt sich nach dem Einschalten aller Anlagenkomponenten feststellen, dass die Temperatur der Kamera deutlich schneller ansteigt, als der Rest der Anlage. Nach einer Warmlaufphase von drei Stunden stellte sich eine konstante Temperaturverteilung ein. Der wärmste Teil bleibt die Kamera mit etwa 1°C Temperaturdifferenz. Bei einer ungünstigen Klimatisierung der Raumluft, bei welcher folglich die Raumtemperatur ansteigt, konnte ermittelt werden, dass pro Kelvin eine laterale Verschiebung der Greiferspitze um $1,5 \mu\text{m}$ und eine vertikale um $4,0 \mu\text{m}$ auftritt. Die Ursache für diese hohen Verschiebungswerte liegen an dem zumeist verwendeten Aluminium (linearer Ausdehnungskoeffizient: ca. $23 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$).

Verbesserung der Genauigkeit

Zur Verbesserung der Genauigkeit können einige Maßnahmen getroffen werden, welche jedoch den Aufwand und somit auch die Kosten vergrößern. Zur Verbesserung des Temperaturverhaltens der Montageanlage können andere Materialien mit niedrigerem Wärmeausdehnungskoeffizienten verwendet werden. Durch die Verwendung von Granit (Ausdehnungskoeffizient: $\alpha_d = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [111]) kann die Ausdehnung lateral und vertikal auf

ca. $0,7 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ und $1,1 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ reduziert werden. Durch eine geschickte Kombination unterschiedlicher Materialien könnte ebenfalls eine Verringerung der thermischen Verschiebung erreicht werden. Gerade in vertikaler Richtung dehnen sich das große U-Profil und der darunter hängende Greifer in entgegengesetzter Richtung aus.

Zur Reduzierung der Anforderungen an die Positioniergenauigkeit könnte das Vakuum-Greifwerkzeug mit Biegeelementen versehen werden, so dass der Greifer in lateraler Richtung verschiebbar ist (vergleiche Abschnitt 7). Die Anforderung an die Justagegenauigkeit verringert sich, da nun die Faserführung nicht mehr überbestimmt ist durch die gegenüberliegenden V-Gruben des Faserchips und des Greifers. Bei einer Integration in den Silicium-Chip wird es jedoch eine Herausforderung sein das Vakuum an den Greifer-Chip anzuschließen.

Weitere Maßnahmen bestehen darin, die laterale Position des Greifers optisch zu vermessen. Hierdurch wird der Temperatureinfluss auf die laterale Positioniergenauigkeit kompensiert. Die vertikale Greiferposition kann mit Hilfe eines Sensors geregelt werden. Kommerziell verfügbar und einsetzbar sind derzeit induktive Taster und Lasersensoren. Ein vom Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) entwickelter Faserabstandssensor (Weißlichtinterferometer) wurde speziell für die Mikromontage entwickelt [112]. Gegenüber den herkömmlichen induktiven Tastköpfen bietet der Sensor die Möglichkeit einer Berührungslosen Messung wie beim Laser-Sensor. Der Vorteil gegenüber Laser-Sensoren liegt in der geringeren Baugröße und der verbesserten absoluten Genauigkeit.

Kapitel 9

Bildverarbeitung

Die Bildverarbeitung spielt eine Schlüsselrolle im Hinblick auf die Automatisierung der Montageanlage. Die Aufgaben der Bildverarbeitung können in drei Bereiche gegliedert werden:

- Positionsermittlung von Werkzeugen, Halbzeugen und Bauteilen, um diese mittels der Aktorik positionieren zu können
- Überwachung der Qualität der zu fügenden Komponenten und der Fügestelle zur Reduktion des Ausschusses
- Sicherung von relevanten Bildinformationen in einer Datenbank zur Nachverfolgung bei Produktausfällen

Somit leistet die Bildverarbeitung indirekt einen Beitrag zur Reduzierung der Montagekosten sowie die Gewährleistung einer gleichbleibend hohen Produktqualität. An dieser Stelle sei zudem angemerkt, dass bei der Glasfaser- und Chip-Positionierung eine hohe Präzision nur unzureichend durch das menschliche Auge einer Fachkraft zu erreichen ist. Um einen reibungslosen Ablauf der Montageoperationen gewährleisten zu können, müssen die Bildverarbeitungsmodule zum Einen schnell arbeiten und zudem robuste Entscheidungen liefern.

Die Vermessung von Objekten, bildet den Kern der Bildverarbeitung. Hier ist der Rechner dem Menschen stark überlegen. Bei jeder Funktion muss festgelegt sein, ob direkt reagiert werden muss (Korrektur oder Abbruch der Montage) oder ob die Anforderungen erfüllt sind. In beiden Fällen ist es sinnvoll die Daten zu speichern, damit Fehler die in Folgeprozessen oder während des Betriebs auftreten lokalisiert werden können.

Die Bildverarbeitungsfunktionen zur Beurteilung der Qualität der Fügestelle und der zu fügenden Komponenten kommen der Bewertung durch den Menschen nahe. Ein Mensch ist hier häufig den Bildverarbeitungssystemen überlegen, so dass in vielen Anwendungsfällen keine maschinelle Auswertung vorgenommen wird. Die Funktionen dienen einer ersten Analyse des Ist-Zustands. Hier kommt es weniger auf Präzision an, sondern

vielmehr auf die Verschaffung eines guten Überblicks. Muss hierzu ein ganzes Bild ausgewertet werden, kann der Aufwand für ein Bildverarbeitungssystem schnell sehr hoch werden. Die für den geschulten Menschen als einfache Aufgabe geltende Frage: „Wo sind Glasfasern im Foto platziert?“, bedarf eines komplizierten rechnergestützten Verfahrens und eines gewissen Lernprozesses. Um den programmiertechnischen Aufwand gering zu halten und somit auch die Geschwindigkeit der Algorithmen zu maximieren, werden bekannte Größen einbezogen und der Suchbereich wird möglichst klein gehalten.

9.1 Montageablauf

Um die bildgestützte, automatisierte Montage durchführen zu können, müssen eine Vielzahl von Bildverarbeitungsfunktionen vorhanden sein. Häufig kann mit einer Kombination aus der Suche einer gespeicherten Bildvorlage und mehreren Kantendetektionen ein gutes Ergebnis erzielt werden. In Abbildung 9.1 ist eine Skizze des Montageablaufs dargestellt.

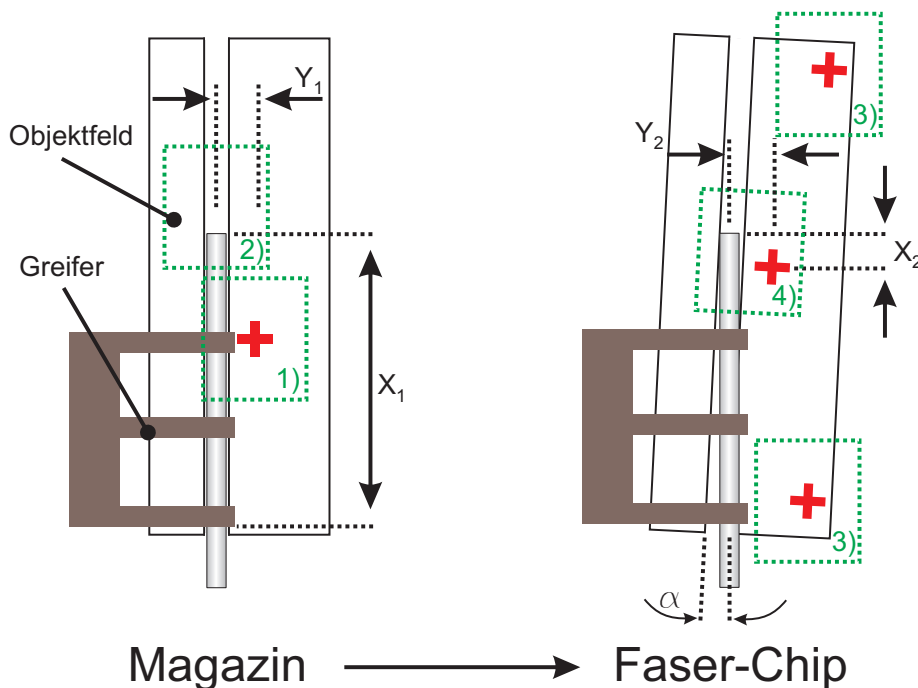


Abbildung 9.1: Skizze des Montageablaufs mit Unterstützung der Bildverarbeitungsfunktionen

Den Ausgangspunkt bildet die bereits vorbereitete Glasfaser im Fasermagazin. Zunächst wird die korrekte Position und falls notwendig der Winkel des Magazins mit Hilfe einer Justagekreuz-Detektion überprüft (siehe Abschnitt 9.2). Dies geschieht immer relativ zur Kamera, welche zuvor kalibriert wurde (Abschnitt 8.2.4). Ist die exakte Lage des Magazins eingestellt worden, so lässt sich der Suchbereich zum Auffinden der Faser auf die V-Grube des Magazins beschränken. Die Position der Faserendfläche ist bei dem realisierten Magazin nicht eindeutig definiert, so dass ein Suchalgorithmus eingesetzt werden

muss. Liegt die Faser korrekt im Magazin kann der Greifvorgang eingeleitet werden. Die gegriffene Faser wird nun ca. $50\ \mu\text{m}$ oberhalb der Montageposition auf dem Faser-Chip positioniert. Zuerst muss wiederum die Position des Faserchips bestimmt und justiert werden. Darauf folgt die Lokalisierung der über dem Chip schwebenden Faser (siehe Abschnitt 9.3). Die Position der Faser wird vor dem Absetzen vermessen (lateral und axial), so dass der richtige Abstand zu einer anderen Faser eingestellt werden kann und die optimale Position zur V-Grube gewährleistet wird. Nach dem Absenken des Greifers muss nochmals die korrekte Lage der Faser überprüft werden. Ist die Justage korrekt verlaufen, kann der UV-härtende Klebstoff aufgebracht werden. Die Dosierkanüle wird beim erstmaligen Gebrauch kalibriert, so dass die Position der Spitze in allen drei Raumrichtungen bekannt ist. Somit kann, unter Angabe der Koordinaten im Kamerabild, der Dosiervorgang beginnen. Neben der erneuten Überprüfung der Kanülenposition muss überprüft werden, ob Klebstoff die Kanüle verlässt (Abschnitt 9.4). Des Weiteren muss überprüft werden, ob der Klebstoff an der Faser entlang, unter die Faser oder über die Faser läuft. Nur wenn die Überprüfung ohne Beanstandung verläuft wird der Klebstoff ausgehärtet und mit der Montage weiterer Fasern begonnen.

Durch die Einführung dieser Vielzahl von Funktionen kann der Montageprozess überwacht werden, wenn nicht größere Fehler auftreten. An dieser Stelle muss abgewogen werden, ob eine weitere Automatisierung notwendig ist. Wenn zum Beispiel die Faser-Suchfunktion keine Faser in der V-Grube des Magazins lokalisieren kann, muss nach obigem Schema der Montageablauf unterbrochen und der Fehler manuell behoben werden. Das Wissen, ob sich die Faser direkt neben der V-Grube befindet, oder ob sie zum Beispiel vergessen wurde in das Magazin zu legen, müssen nicht zwingend automatisiert erfolgen, da die Montageanlage diesen Zustand nicht selbständig ändern kann. Ein Einschreiten des Anlagenbetreuers ist somit unumgänglich. Um die Qualität der gefertigten Produkte zu gewährleisten, können weitere Funktionen hilfreich sein. Eine beschädigte oder falsch getrennte Faserendfläche gilt es zu lokalisieren. Dies wird in Abschnitt 9.3.1 näher erläutert. Zur Programmierung der Funktionen wurde ebenso wie zur Steuerung der Montageanlage die Software LabView von der Firma National Instruments mit der Erweiterung IMAQ für die Bildverarbeitung verwendet [109]. Die modulare Programmierung spielt gerade bei der Bildverarbeitung eine große Rolle. Der gesamte Montageablauf kann zum Beispiel durch die Verwendung eines Rezeptes flexibel an das jeweilige Produkt angepasst werden. Die Bildverarbeitungsfunktionen sind häufig so spezialisiert, dass schon geringe Veränderungen zu Fehlfunktionen führen können. Somit bietet es sich oft an, eine Bildverarbeitungsfunktion aus vorhanden Grundfunktionen an die jeweilige Aufgabe anzupassen.

9.2 Positionserfassung von Magazin & Faserchip

Im Folgenden wird die Positionserfassung des Magazins und des Faserchips relativ zur Position der Kamera beschrieben.

Ursachen lateraler Positionsungenauigkeiten

Um die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit einhalten zu können, ist eine Positionskorrektur mittels Bildverarbeitung unerlässlich. Eine laterale Positionsabweichung entsteht durch folgende Randbedingungen (siehe hierzu auch Abschnitt 8.5 zum Thema Anlagengenauigkeit):

Fehlerart	Maximaler Fehler	Korrektur durch Bildverarbeitung
Wiederholgenauigkeit Motoren	$2 \mu m$	X (lateral)
Sägeungenauigkeit	$60 \mu m$	X
Chip an Anschlag: axial	$8 \mu m$	X
Chip an Anschlag: radial	$9 \mu m$	X
Lithographie (Maske zu Maske)	$\ll 1 \mu m$	-
Greifer Wiederholgenauigkeit	$< 0,5 \mu m$	X

Tabelle 9.1: Liste der Einflussgrößen auf die laterale Positionsabweichung und deren Größe; Mit X gekennzeichnete Größen können mit Hilfe der Bildverarbeitung ausgeglichen werden

Viele der aufgelisteten Positionierfehler können durch eine laterale Überprüfung der Chip-Position korrigiert werden (siehe Tabelle 9.1). Durch die Bereitstellung eines Justagekreuzes in nächster Nähe der Bereiche, wo eine Faser montiert werden soll, können fast alle lateralen Fehler kompensiert werden (siehe Abbildung 9.2). Nicht korrigiert werden können lithographische Toleranzen, die vor allem durch eine ungenaue Ausrichtung der verschiedenen Maskenebenen zueinander auftritt. Dieser Fehler ist bei heutigen Belichtungsanlagen sehr gering, kann jedoch gänzlich nur vermieden werden, indem die Justagemarkierungen in der gleichen Maskenebene liegen, wie die Faser-Führungsstrukturen. Die Justagemarkierungen müssten folglich aus V-Gruben hergestellt werden. Die Wiederholgenauigkeit des Fasergreifers kann nur durch eine Detektion und Vermessung der Glasfaser erfolgen. Die Genauigkeit der Faserdetektion ist geringer als die Vermessung von Justagekreuzen (siehe Abschnitt 9.3.3). Somit sollte die Greifer-Wiederholgenauigkeit möglichst gut sein, um präzise montieren zu können.

Positionserfassung mit Hilfe von Justagemarkierungen

Zur visuellen Vermessung der Chip-Position werden Strukturen benötigt, die einen möglichst großen Kontrast zur Waferoberfläche aufweisen. In Versuchen wurden zwei Arten von Justagemarkierungen untersucht: Goldschichten und mikrostrukturierte V-Gruben. Die Waferoberfläche war in beiden Fällen mit Siliciumnitrid (Si_3N_4 , Dicke ca. $1 \mu m$) beschichtet. Die hergestellten Markierungen sind kreuzförmig. Somit heben sie sich von den übrigen Strukturen, welche sich im Objektfeld der Kamera befinden deutlich ab und können problemlos durch eine entsprechende Objekterkennung (Bildvergleich; engl.

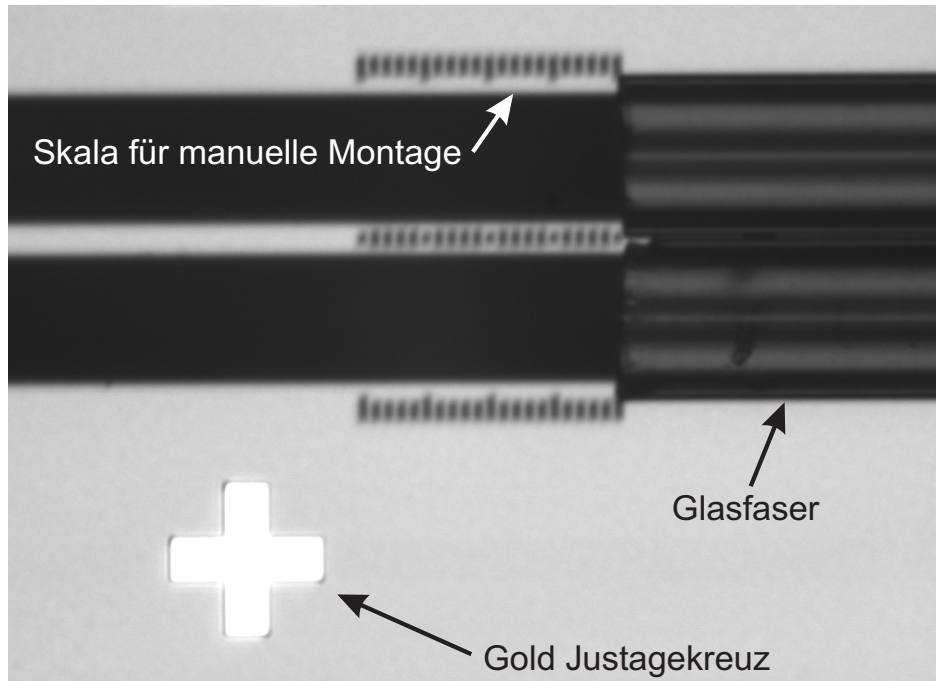


Abbildung 9.2: Foto vom Koppelbereich des Faserschalters.

„Template Matching“ [113], S.411-430) sehr gut lokalisiert werden. Um eine präzise Positionierung durchführen zu können, wurde zuerst das Kreuz durch die Template Matching Funktion von Ni-IMAQ grob lokalisiert und dann eine genaue Positionsbestimmung mittels einer oder mehrerer Kantendetektionen durchgeführt. Ein weiterer Vorteil der Kreuze ist, dass Unterschiede im Kontrast und der Größe des Kreuzes keinen Einfluss auf die Genauigkeit haben, da die gegenüberliegenden Kanten sich entgegengesetzt verschieben.

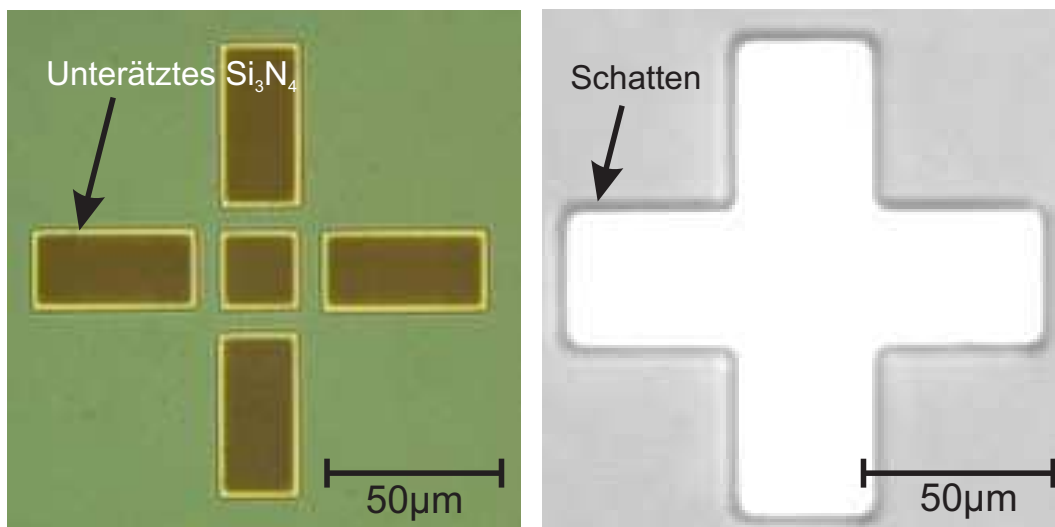


Abbildung 9.3: Lichtmikroskopische Detailaufnahmen von Justagekreuzen. Links: geätzte V-Gruben; Rechts: Metallisierung Gold

9.2.1 Vorlagensuche & Kantendetektion

Wie bereits erwähnt, stehen für die Bildanalyse die Funktionen der Software IMAQ von National Instruments zur Verfügung. Zur Template-Suche wurde die Funktion „IMAQ-Match-Pattern-2“ verwendet, welche nach einer rechteckigen Bildvorlage suchen kann. Die eingesetzte Kantendetektionsfunktion „IMAQ-Simple-Edge-Tool“ kann eine Kante auf zweierlei Arten finden (siehe Abbildung 9.4). Es kann ein absoluter Intensitätswert angegeben werden an welcher sich die Kante befindet oder ein relativer zwischen dem Startniveau und dem Intensitätswert der Kante. Die besten Ergebnisse bei einer Kanten-

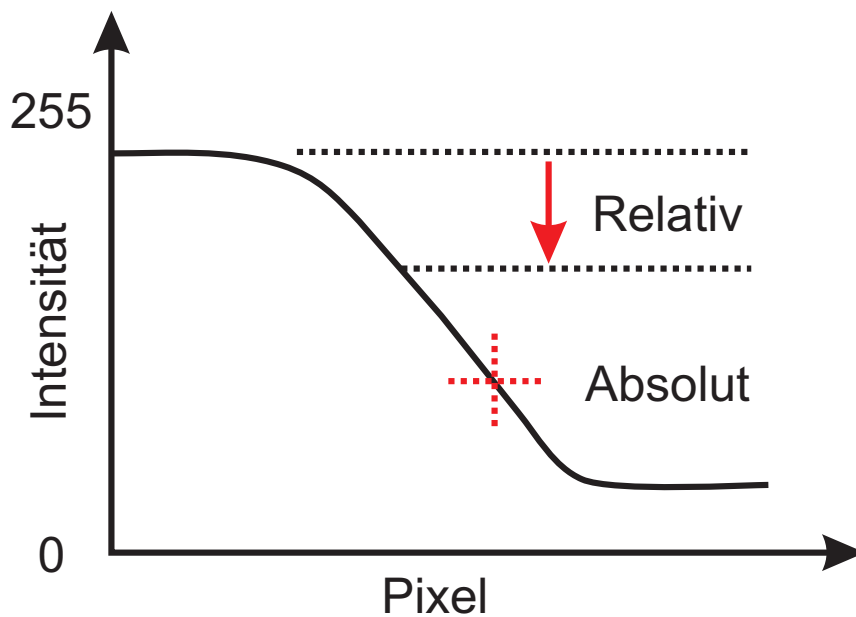


Abbildung 9.4: Darstellung der relativen und absoluten Detektion einer Kante

detektion können erzielt werden, wenn sich der Übergangsbereich der Kante über einen größeren Bereich kontinuierlich ändert. Durch die Aufteilung des Übergangsbereichs auf eine größere Strecke, entsteht bei einer fehlerhaften Intensitätsdetektion ein geringerer Positionsfehler.

Messergebnisse

Zunächst wurde die Kantenqualität mit Hilfe eines optischen Mikroskops untersucht. Da die Goldschicht naßchemisch-isotrop geätzt wurde, weist sie eine höhere Kantenrauigkeit als die V-Gruben auf (siehe Tabelle 9.2). Die Rauigkeit der V-Gruben-Kante lag unterhalb des optisch messbaren. Zur weiteren Bestimmung der erreichbaren Genauigkeit wurde die Beleuchtung so eingestellt, dass ein kontinuierlicher Übergang zwischen Hell und Dunkel zur Verfügung stand. Eine leichte Defokussierung des Objektivs gleicht zudem kleine Intensitätsschwankungen aus.

Dann wurde anhand einer Gold/Nitrid- oder Nitrid/V-Gruben-Kante überprüft, wie stark die Abweichungen an einer Kante sind. Da die Kantenrauigkeit des Goldkreuzes bis zu $0,5\ \mu\text{m}$ betrug, variierten die Positionen der detektierten Kanten in einem ähnlichen

Bereich ($0,46 \mu\text{m}$) bei einer relativen Bestimmung der Kanten. Bei einer absoluten Festlegung der Kante erhöhte sich der Fehler auf $2 \mu\text{m}$. Bei den V-Gruben-Kanten war die absolute Kantenbestimmung etwas genauer als die relative (Absolut $0,4 \mu\text{m}$ Relativ $0,5 \mu\text{m}$). Die etwas besseren Werte der V-Gruben lassen sich auf die geringere Kantenrauigkeit zurückführen. Die Genauigkeit scheint sich allerdings gleichzeitig durch Schwankungen der Siliciumnitrid-Reste, welche nicht durch den Einsatz von Megaschall bei der Herstellung abgebrochen wurden, zu verschlechtern. Somit ergibt sich nur eine leichte Verbesserung zu dem Nitrid/Gold-Übergang.

	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{V-Grube}$	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Gold}$
Rauhigkeit	$< 0,1 \mu\text{m}$	$0,3 - 0,5 \mu\text{m}$
Kontrast	$7 - 175$	$36 - 56$

Tabelle 9.2: Vergleich der Kantenqualität von $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{V-Grube}$ - und $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Gold}$ -Kanten

Eine Verbesserung der Genauigkeit kann durch Mittelung über mehrere Messungen einer Kante sowie über die Mittelung von sich gegenüberliegenden Kanten erfolgen. Wird die Mitte von gegenüberliegenden Kanten, wie zum Beispiel bei einem Arm eines Kreuzes bestimmt, so verbessert sich schon bei zwei sich gegenüberliegenden Kanten die maximale Abweichung auf ein Drittel ($0,14 \mu\text{m}$). Bislang wurde nur die Abweichung der Messergebnisse von sich gegenüberliegenden Kanten untersucht. Zur abschließenden Bestimmung der Vermessungsgenauigkeit wurde der Abstand zwischen zwei lithographisch hergestellten Gold/Nitrid Kreuzen vermessen. Bei einer Messung wurde an zehn Stellen der Mittelpunkt des Kreuzbalkens bestimmt. Werte, die stark vom Mittelwert abwichen wurden aussortiert und ein erneuter Mittelwert gebildet. Die beiden gemessenen Mittelwerte der beiden Kreuze wurden dann voneinander subtrahiert und somit der Abstand der Kreuze bestimmt. Die Messungen wurden auf verschiedenen Chips, aus unterschiedlichen Produktionen durchgeführt. Es ergab sich eine maximale Abweichung der Messungen von $0,062 \mu\text{m}$. Die wirkliche Genauigkeit der optischen Positionsbestimmung kann theoretisch noch unter diesem Wert liegen, da der Maskenhersteller eine absolute Schreibgenauigkeit von $0,2 \mu\text{m}$ angibt, so dass ein Großteil des Messfehlers auf einen fehlerhaften Abstand der Kreuze zurückgeführt werden kann. Da die Kreuze jedoch sehr nahe zusammen liegen, kann vermutet werden, dass die Genauigkeit des Elektronenstrahls besser als der angegebene Wert ist.

Eine Aussortierung von falschen Werten hat sich als sehr wichtig herausgestellt, da es bei den V-Gruben zu Unterätzungen des Siliciumnitrids kommt. Da das überstehende Nitrid abbrechen kann, müssen hierdurch entstehende Fehler erkannt und aussortiert werden. Eine Erkennung kann erfolgen, indem die Abweichung vom Mittelwert kontrolliert wird. Eine noch zuverlässigere Methode besteht darin, eine Sollbreite des Kreuz-Armes zu definieren und Abweichungen hiervon zu eliminieren. Bei metallisierten Kreuzen besteht ebenfalls eine Fehlerquelle. Dadurch, dass das Metall auf die Oberfläche aufgebracht wird, kann es zu einer Schattenbildung um das Kreuz herum kommen (siehe Abbildung 9.5). Dies tritt besonders dann auf, wenn so stark beleuchtet wird, dass der helle goldene Bereich weiß im Bild erscheint, also die Sättigung des Bildsensors erreicht wird. Normalerweise bestünde keine Notwendigkeit so hell auszuleuchten, jedoch benötigt man zur

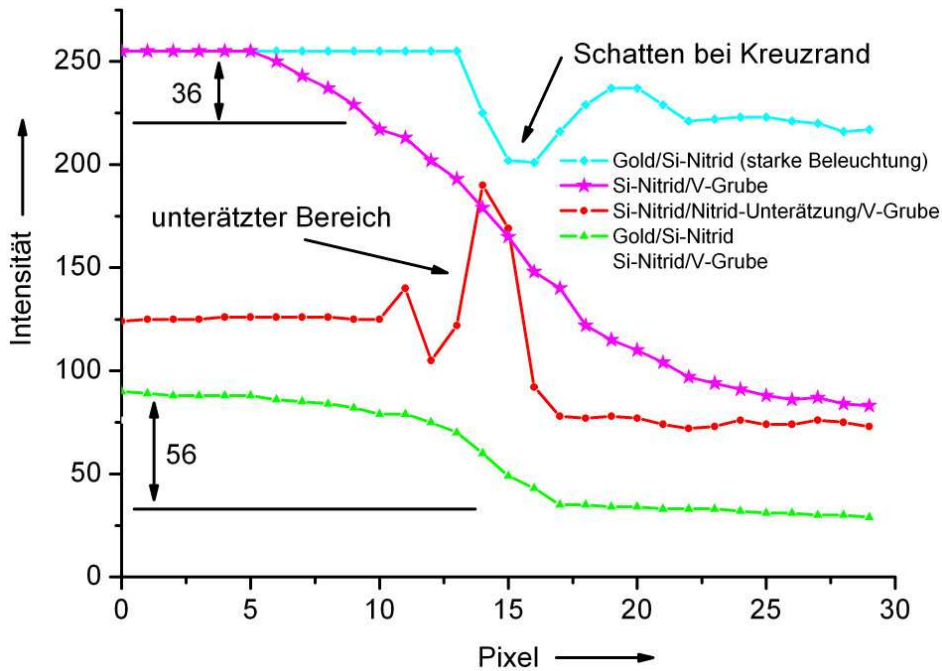


Abbildung 9.5: *Linienprofile von Kanten mit unterschiedlichen Materialien, Unterätzungen sowie eine zu große Beleuchtungsstärke können zu erheblichen Fehlern bei der Kantendetektion führen*

Faserdetektion eine im Vergleich stärkere Beleuchtung. Werden Goldkreuze verwendet muss folglich ein Kompromiss eingegangen werden zwischen optimaler Beleuchtung für die Faserdetektion und eines optimalen Kantenverlaufs für die Positionierung.

In Abbildung 9.6 sind Linienprofile einer Si_3N_4 /V-Gruben-Kante dargestellt. Die Intensität der Beleuchtung wurde variiert. Es zeigt sich deutlich, dass bei zunehmender Beleuchtungsstärke, der Kontrast zwischen der reflektierenden Si_3N_4 -Oberfläche und der V-Grube besser wird. Der größte erreichte Kontrastwert beträgt 175 (siehe Tabelle 9.2). In Abbildung 9.5 sind zum Vergleich die Linienprofile von Si_3N_4 /V-Gruben und Si_3N_4 /Gold dargestellt.

Das Fazit aus diesen Messungen ist folglich, dass V-Gruben besser geeignet sind zur Positionierung, da sie in der gleichen Maskenebene, wie die Faserführungen liegen. Darüber hinaus bieten die sie mehr Flexibilität im Bezug auf die Aussteuerung der Beleuchtung.

9.2.2 Laterale Winkelkorrektur

Mit Hilfe der im vorigen Abschnitt beschriebenen Justagekreuzvermessung kann auf einfache Weise eine Winkelkorrektur des Faser-Chips durchgeführt werden. Dies ist notwendig, um die hohen Anforderungen an die Winkeltreue zwischen Faser und Führungsstruktur einhalten zu können. Die Herkunft der Fehler, welche zu einer Winkelabweichung führen sind in Abschnitt 8.5 aufgeführt. Zur Winkeljustage werden zwei Kreuze möglichst weit entfernt voneinander auf dem Chip integriert. Nach der Detektion von Kreuz 1 wird die Montageplattform in axialer Richtung (X-Richtung) verfahren, um auch das zweite Kreuz

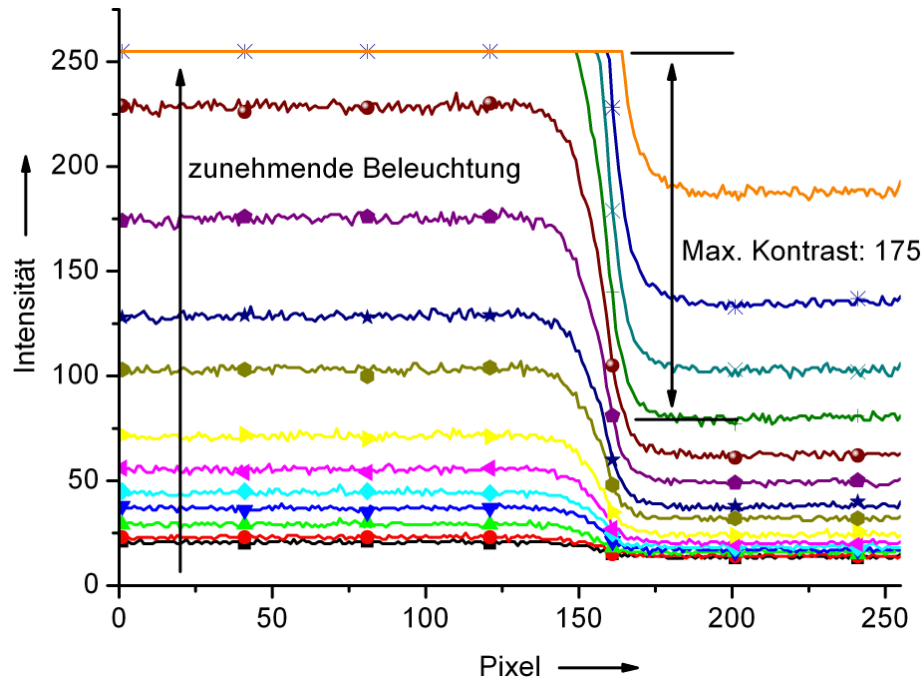


Abbildung 9.6: *Linienprofile einer Kante ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{V}$ -Grube); Eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke bewirkt eine Kontrastverbesserung. Die reflektierende Si_3N_4 -Oberfläche führt bei starker Beleuchtung zur Sättigung des CCD-Sensors.*

zu vermessen. Aus der Differenz der Y-Koordinaten und der Kenntnis des Kreuz-Abstands kann nun die Winkelabweichung sehr genau bestimmt werden. Die erreichbare Genauigkeit ergibt sich rechnerisch aus der Positioniergenauigkeit der Bildanalyse (minimale Abweichung $0,062 \mu\text{m}$). Bei einem Abstand der Kreuze von 40 mm ergibt sich folglich eine erreichbare Abweichung von $0,178 \cdot 10^{-3}$ Grad. Bei der Korrektur muss darauf geachtet werden, dass der Drehpunkt (Pivot-Punkt) bestimmt und berücksichtigt werden sollte, um die Ausführung der Funktion möglichst nicht wiederholen zu müssen.

In der Praxis ist die erreichbare Genauigkeit durch den verwendeten Winkelsteller begrenzt. Verwendet wird ein Steller der Firma Physikinstrumente (M-037.dg), welcher eine minimale Schrittweite von $0,2 \cdot 10^{-3}$ Grad und ein Umkehrspiel von $8,6 \cdot 10^{-3}$ Grad laut Datenblatt leistet [97]. Das Umkehrspiel kann durch eine geschickte Programmierung minimiert werden wie bei dem vermessenen M111.1DG Motor (Abschnitt 8.5.1).

9.3 Glasfaser Detektion

Die Suche und Vermessung von transparenten Objekten ist eine anspruchsvolle Aufgabe für Bildverarbeitungssysteme. Dadurch, dass die Glasfasern in V-Gruben abgelegt werden, verbessert sich die Sichtbarkeit der Faser. Durch Reflexionen des einfallenden Lichts an den Flanken der V-Grube (welche einen nahezu perfekten Spiegel bilden), sind bei korrekter Lage der Faser drei prägnante helle Streifen sichtbar. Um zu klären, ob sich eine Faser in der V-Grube befindet, kann die Existenz heller Streifen in der Grube überprüft

werden. Um den Vorgang robuster zu gestalten (Verunreinigungen unter der Faser kann die Reflexionen unterbinden), kann zusätzlich die Breite der V-Grube vermessen werden. In dem Bereich, wo sich die Faser befindet, wird die Messung eine Verbreiterung ergeben. Bei korrekter Lage der Faser wird dann mit Hilfe von Liniendetektionen entlang der Faser die Endfläche bestimmt. Auch hier sollte zur Sicherheit an der Fasermitte und an den über die V-Grube hinausragenden äußeren Bereichen der Faser gemessen werden. In Abbildung 9.7 sind die Haupt-Strahlengänge der drei inneren hellen Streifen dargestellt. Insgesamt bilden sich fünf Streifen. Die äußeren sind jedoch nicht von belang in diesem Fall, da sie sich so gut wie nicht mit der Position der Faser verändern. Der helle Streifen in der Mitte der Glasfaser rührt von der Reflexion an der V-Gruben Spitze her. Da in der Mitte das Licht hauptsächlich senkrecht auf die Faser trifft, wird es kaum gebrochen und von der V-Gruben Spitze reflektiert. Auch bei einer Verschiebung der Faser in vertikaler oder lateraler Richtung bleibt die Position des mittleren Streifens nahezu unverändert. Das Streifenpaar rechts und links neben der mittleren Position entsteht durch die Reflexion an den V-Gruben Wänden. Im Gegensatz zum mittleren Streifen verschieben sie sich in entgegengesetzter Richtung der lateralen Fehlpositionierung der Faser (Abbildung 9.7 a). Bei einer rein vertikalen Verschiebung der Faser nimmt die Intensität der Reflexionen ab (Abbildung 9.7 c). Außerdem nimmt der Unterschied der Intensität zwischen dem mittleren und den angrenzenden Streifen zu.

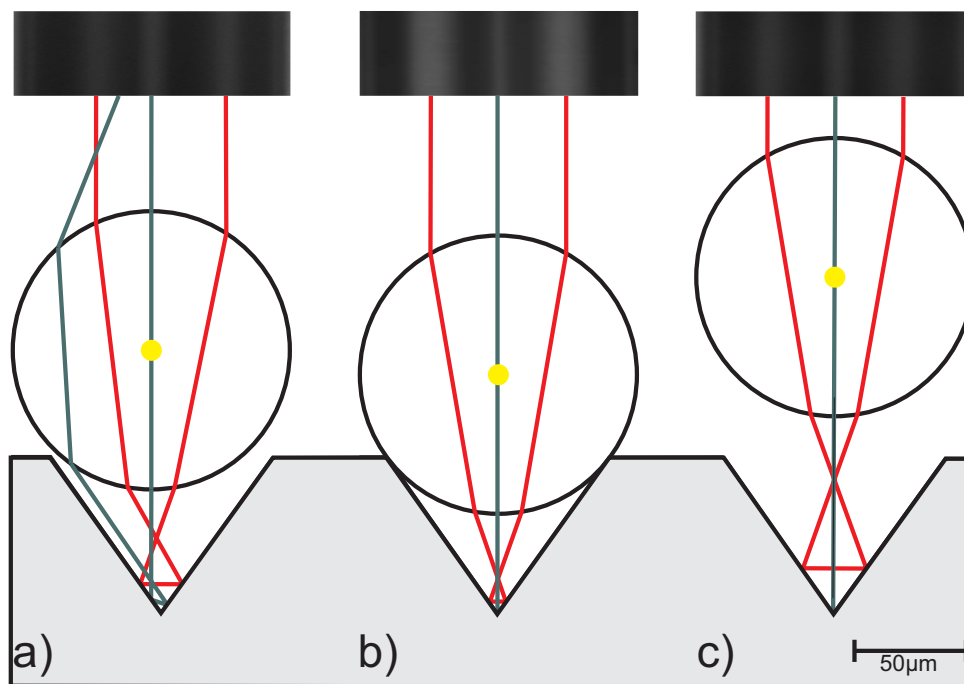


Abbildung 9.7: *Glasfasern in bzw. über V-Gruben mit reflektierenden Oberflächen; die Linien deuten die wichtigsten Strahlengänge an, die für ein charakteristisches Bild sorgen; Fotos oberhalb der Skizzen zeigen die reale Ansicht der Fasern in V-Gruben mit koaxialer Aufsichtbeleuchtung; Verschiebung der Faser $10\ \mu\text{m}$ nach oben und $5\ \mu\text{m}$ zur Seite a), exakte Passform b), nur vertikale Verschiebung c)*

9.3.1 Faserendflächen Vermessung

Die genauen axialen Positionen der Faserendflächen müssen messtechnisch erfasst werden, damit deren Abstand zueinander oder relativ zu einem Bauteil eingestellt werden kann. Zudem könnte durch ungenaue Montage eine Faserendfläche beschädigt werden.

Auffinden der Faserendfläche

Da die Sollposition der Faserführungsstrukturen im Bild der Kamera bekannt ist, ist der Messbereich beschränkt und es muss lediglich geprüft werden, ob sich eine Faser in der Grube befindet. Dies geschieht durch Lokalisierung der hellen Reflexionslinien und durch die Vermessung der Grubenbreite. Da die Fasern breiter als die V-Gruben sind, kann eindeutig entschieden werden, ob sich eine Faser in der Grube befindet. Durch die Kombination dieser beiden Möglichkeiten wird die Funktion robust gegenüber Staubpartikeln und Resten der Faserumantelung, welche sich unter der Faser befinden könnten. Die Staubpartikel verhindern lokal die Bildung der Reflexionslinien und die Software würde dies folglich für eine leere Grube halten.

Wenn nun eine Faser von rechts kommend in der Grube vorhanden sein sollte, so wird mit Hilfe der Suchfunktion die Grube von rechts nach links sukzessive durchsucht, bis zu dem Punkt an welchem die Faserreflexion nicht mehr lokalisiert werden kann. An dieser Stelle wird eine genaue Vermessung mit Hilfe mehrerer Kantendetektionen (relative Vorgabe der Kantenposition, Abschnitt 9.2) durchgeführt. Gute Ergebnisse konnten erzielt werden, indem drei Liniendetektionen parallel zu den Reflexionslinien durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Endfläche wird dann der vorderste Messwert ausgewählt, da durch das Spalten der Fasern Abbrüche an den Faserendflächen die wirkliche Position verfälschen können (siehe Abbildung 9.9). Bei schlechter Qualität der Faserfacette tre-

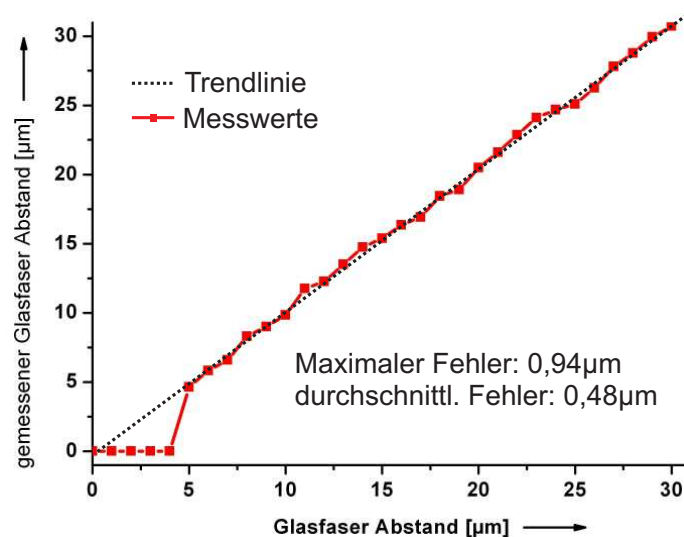


Abbildung 9.8: Abstandsmessungen von zwei stoßgekoppelten Glasfasern in einer V-Grube (wie in Abbildung 9.9 dargestellt) mit Hilfe einer automatischen Kantendetektion

ten zwangsläufig Fehler auf, welche an dieser Stelle nur schwer erkannt werden können.

Liegen die Fasern nicht dicht beieinander, kann die Endfläche auch anhand des Faserteils, welcher über die Grube radial hinausragt bestimmt werden. Gegenüber der hell reflektierenden Chip-Oberfläche wird ein guter Kontrast erzielt. Durch Vermessung der rechten und linken Seite der Faser, wird die Detektion beschädigter oder schräg gespaltener Faserendflächen ermöglicht. Die Messung in Abbildung 9.8 zeigt den variierten Abstand von zwei Faserendflächen zueinander. Unterhalb eines Abstands von $5\ \mu\text{m}$ konnte der Abstand nicht bestimmt werden. Bei größeren Abständen werden die Faserendflächen mit guter Genauigkeit lokalisiert. Durchschnittlich ergab sich ein Fehler von $0,48\ \mu\text{m}$. Der maximal aufgetretene Fehler betrug $0,94\ \mu\text{m}$.

Güte der Endfläche

In Abbildung 9.9 befindet sich ein Detailfoto von zwei stoßgekoppelten Fasern. Beide Fasern weisen Defekte Enden auf, wobei die eine Faser sehr schlecht gespalten wurde, so dass ein Fehler von bis zu $10\ \mu\text{m}$ gemessen werden kann. Durch die Detektion der äußeren Faserseiten kann dies verhindert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Vermessung der drei Streifen und Auswahl des längsten.

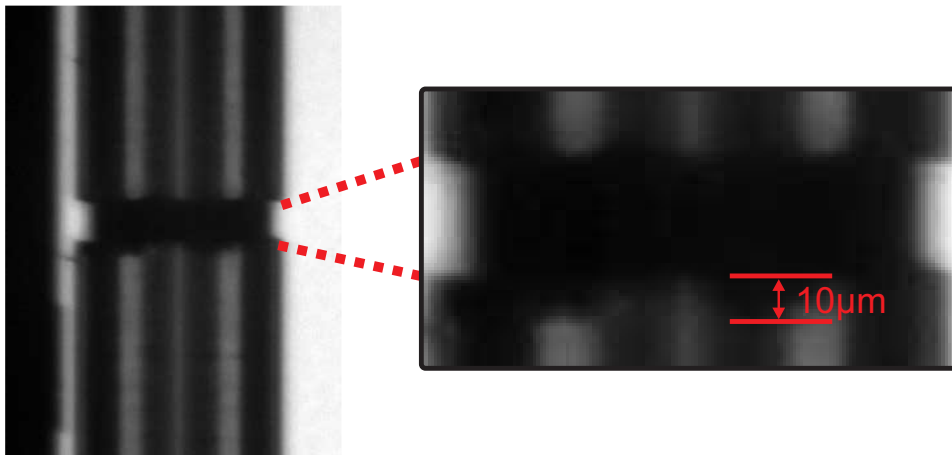


Abbildung 9.9: Zwei Glasfasern in einer Silicium V-Grube, Abstand der Faserendflächen $30\ \mu\text{m}$, schlecht gesplattene Faserendflächen können zu erheblichen Fehlern bei der Faserpositionierung führen

9.3.2 Vertikale Positionsbestimmung

Die vertikale Position der Glasfaser kann mit Hilfe der Änderung des Unterschieds zwischen dem mittleren und den beiden äußeren Streifen bestimmt werden. In Abbildung 9.10 sind Linienprofile von Glasfasern, die in unterschiedlichen Abständen über einer V-Grube schweben dargestellt. Die Intensität der Reflexionen nimmt mit zunehmender Höhe stetig ab und der Unterschied zwischen dem mittleren Maximum und den beiden Äußeren nimmt zu.

Um die maximalen Intensitäten der hellen Streifen zu bestimmen, wird ein Linienprofil

(siehe Abbildung 9.10 quer über die Faser aufgenommen. Zunächst werden die drei Maxima grob bestimmt und anschließend mit Hilfe einer Gauss-förmigen Glockenkurve oder eines Polynoms vierter Ordnung gemittelt. Die polynomiale Funktion erwies sich als besser geeignet, da auch Linienprofile mit stark veränderlichem Verlauf angenähert werden konnten. Somit ist die Funktion robuster gegenüber einer Mittelung mit Gaußprofil. Zur Verbesserung der Genauigkeit wird die Messung fünfmal an verschiedenen axialen Positionen wiederholt.

Abbildung 9.11 zeigt das Ergebnis von acht Messungen, wobei das Verhältnis vom mittleren Maximum (P_2) zu der durchschnittlichen Intensität der zwei benachbarten Streifen (P_1 und P_3) gebildet wurde. Hiermit ließen sich die besten Ergebnisse erzielen. Die Messungen wurden auf unterschiedlichen Chips und V-Gruben durchgeführt. Es wird

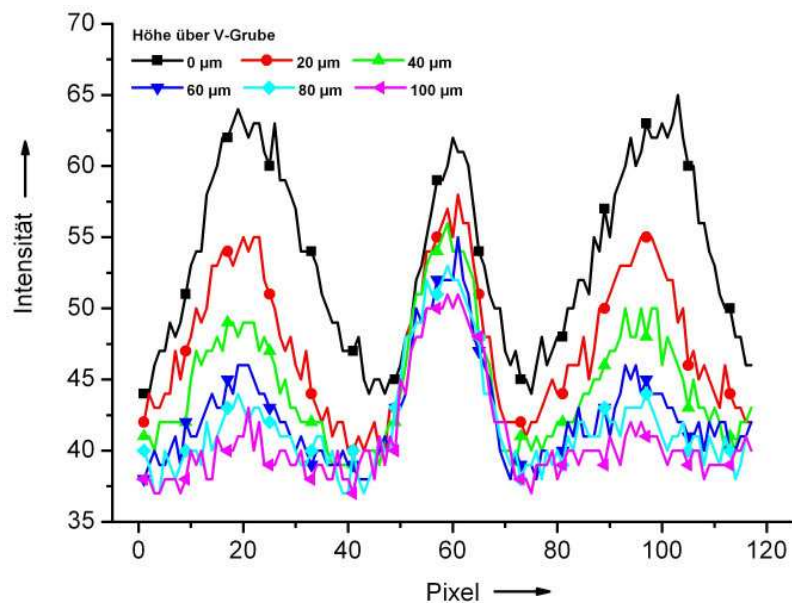


Abbildung 9.10: *Linienprofil einer Glasfaser, welche über einer V-Grube schwebt; Intensität verringert sich bei Vergrößerung des Abstands*

deutlich, dass keine hoch präzisen Messungen der vertikalen Faserposition möglich sind, da sie Schwankungen unterliegen. Die Genauigkeit liegt etwa zwischen 10 und 15 μm je nachdem wie weit sich die Faser oberhalb der Grube befindet (siehe Abbildung 9.11). Da der Unterschied zwischen den drei Maxima geringer wird, je tiefer die Faser in der V-Grube positioniert wird, kann durch schrittweise Annäherung die optimale Position automatisch gefunden werden, was jedoch zeitaufwändig ist.

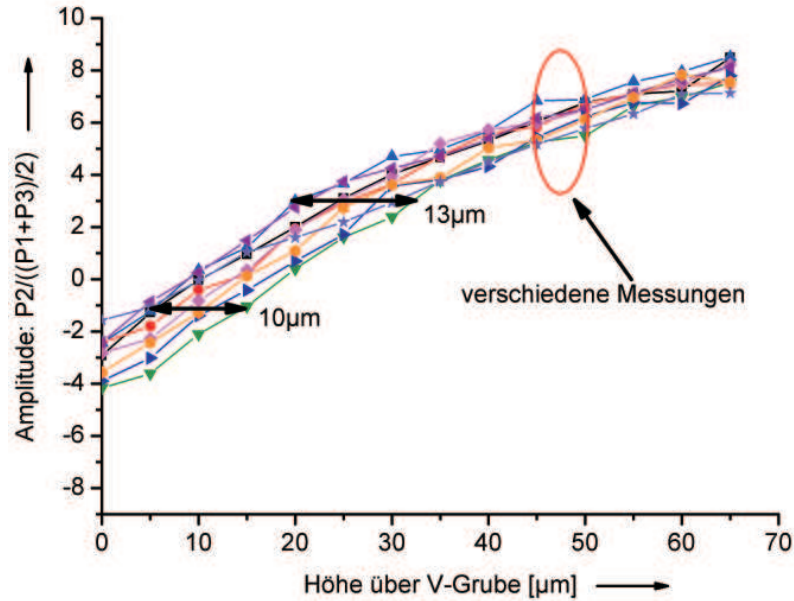


Abbildung 9.11: Vermessung der vertikalen Faserposition über verschiedenen Silicium V-Gruben

9.3.3 Laterale Positionsbestimmung

Die laterale Positionsbestimmung über die Verschiebung der bereits angesprochenen Streifen ist um eine Größenordnung genauer als die vertikale. In Abbildung 9.12 sind exemplarisch drei Linienprofile bei lateralen Verschiebungen von 0, 5 und 10 μm aufgetragen. Es zeigt sich deutlich, dass die Position des mittleren Streifens kaum variiert im Gegensatz zu den benachbarten Streifen.

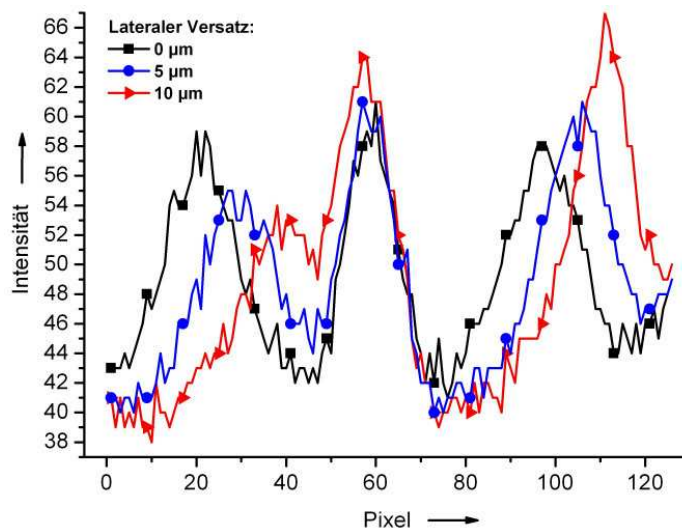


Abbildung 9.12: Linienprofil einer Glasfaser, welche 20 μm über einer V-Grube schwebt; Intensitätsmaxima verschieben sich durch radiale Fehlpositionierung der Faser

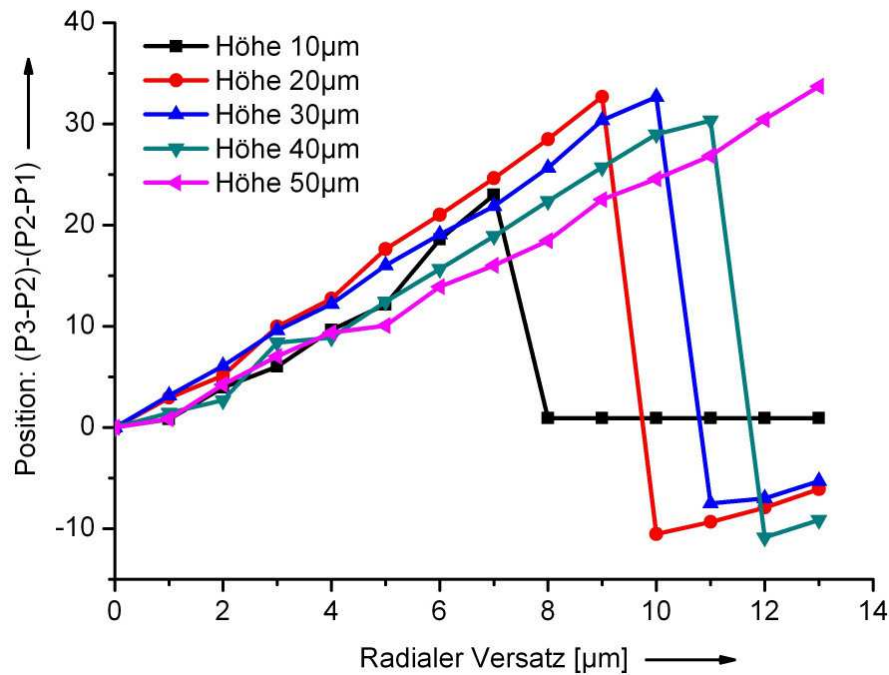


Abbildung 9.13: Vermessung der lateralen Faserposition über einer Silicium V-Grube und Auswirkung des Abstands zwischen Faser und V-Grube

Abbildung 9.13 zeigt die Verschiebung der Streifen zueinander aufgetragen über der lateralen Verschiebung bei verschiedenen Höhen der Faser über der V-Grube. Bei größerem lateralen Versatz spielt die Höhe über der V-Grube eine immer größere Rolle. Die Vermessung des Ist-Zustands kann mit hoher Genauigkeit von besser als $1 \mu\text{m}$ erfolgen. Bei mittlerer Positionierung der Faser sind die beiden äußeren Streifen symmetrisch zum mittleren angeordnet. Die besten Ergebnisse werden bei einem Abstand zur V-Grube zwischen 20 und $30 \mu\text{m}$ erzielt, da dort die Steigung größer ist und auch noch laterale Abweichungen größer als $7 \mu\text{m}$ vermessen werden können. Bei einer Faserhöhe von $10 \mu\text{m}$ liegen ein äußerer und der mittlere Streifen schnell so dicht beieinander, dass eine Vermessung nicht mehr erfolgen kann. In Abbildung 9.14 wurde die radiale Faserposition variiert und mit Hilfe der programmierten Funktion vermessen. Bei geringen Abständen von weniger als $2,5 \mu\text{m}$ können sehr hohe Genauigkeiten erreicht werden. Bei einem Versatz kleiner $1,5 \mu\text{m}$ wird auf diese Weise eine Genauigkeit von $0,08 \mu\text{m}$ erreicht.

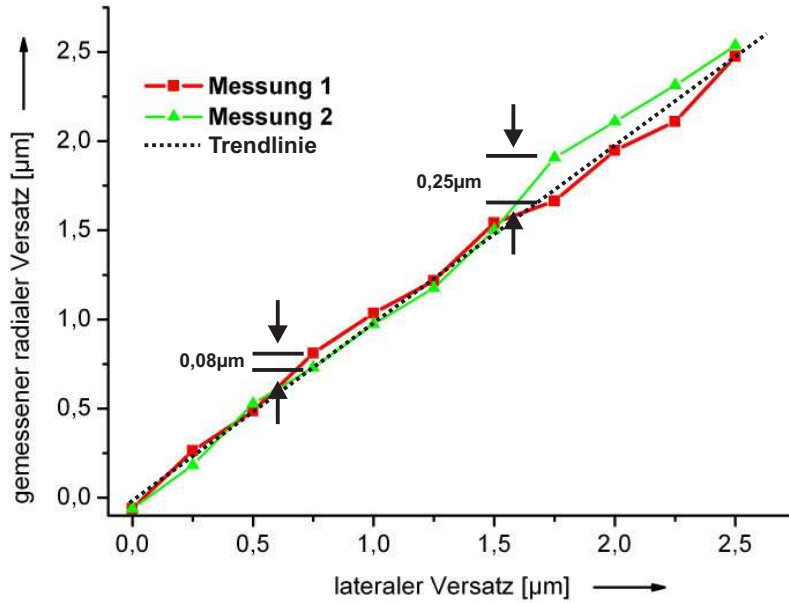


Abbildung 9.14: Vermessung der lateralen Faserposition über einer Silicium V-Grube bei einer Faserhöhe von $20\ \mu\text{m}$

9.4 Klebstoff-Detektion

Die Überwachung des Fügevorgangs ist sehr wichtig, da die aufgebrauchte Menge und Verteilung des Klebstoffs die Festigkeit der Fügeverbindung bestimmt. Um eine erste Faser zu verkleben wird ein Tropfen UV-härtender Klebstoff mit einer Dosiernadel aufgebracht. Wenn die Dosiernadel, wie in diesem Beispiel, in einem Winkel von 45° zum Fügeeteil angeordnet ist, so benetzt der abgegebene Klebstofftropfen einen Teil der Faser und den Spalt zwischen Faser und Chip (siehe Abbildung 9.15).

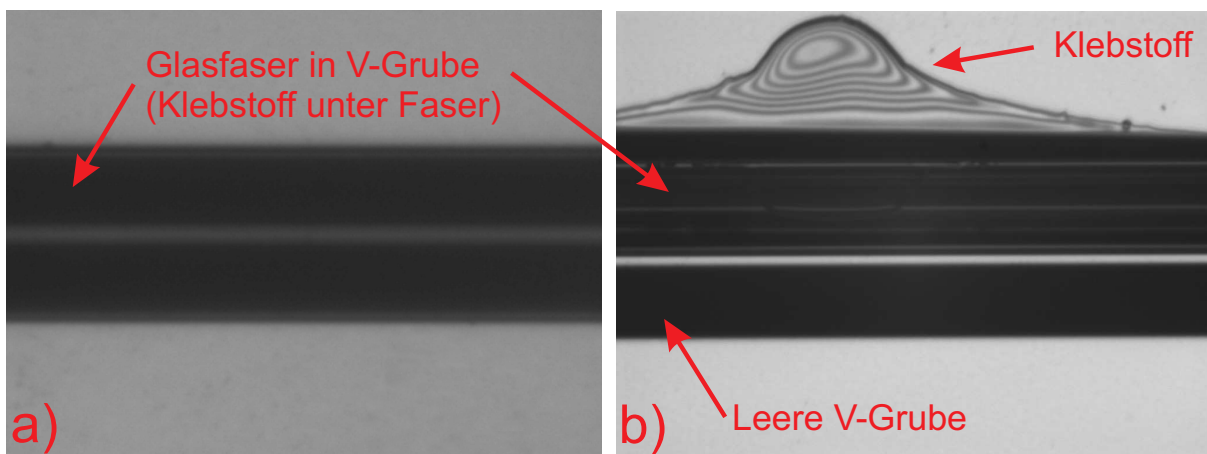


Abbildung 9.15: Glasfaser in Silicium V-Grube mit aufgebrachtem Klebstoff a); Klebstoff hat sich unter der Faser ausgebreitet b) Dosiernadel: Klebstoff ist unter und entlang der Faser gelaufen

Dieser Vorgang lässt sich sehr gut mit dem Visualisierungssystem überwachen. Eine Überwachung der Kanülenposition während des Montageablaufs ist nicht erforderlich, da die Position des Werkzeugs beim Wechsel der Kanüle kalibriert wird (siehe Abschnitt 9.4.1). Zur Dosierüberwachung wird zunächst der Bereich um die Dosiernadel überwacht, ob nach dem unmittelbaren Start des Dosiervorgangs Klebstoff die Kanüle verlässt. Dies ist sehr gut möglich, da der austretende Klebstoff das eintreffende Licht vom Objektiv weg reflektiert. Zur Überprüfung wird folglich die Änderung der Intensität der umliegenden Bildpunkte vor und nach dem Dosiervorgang überwacht.

Nachdem der Klebstoff dosiert wurde wird nun überprüft, ob sich der Klebstoff entlang

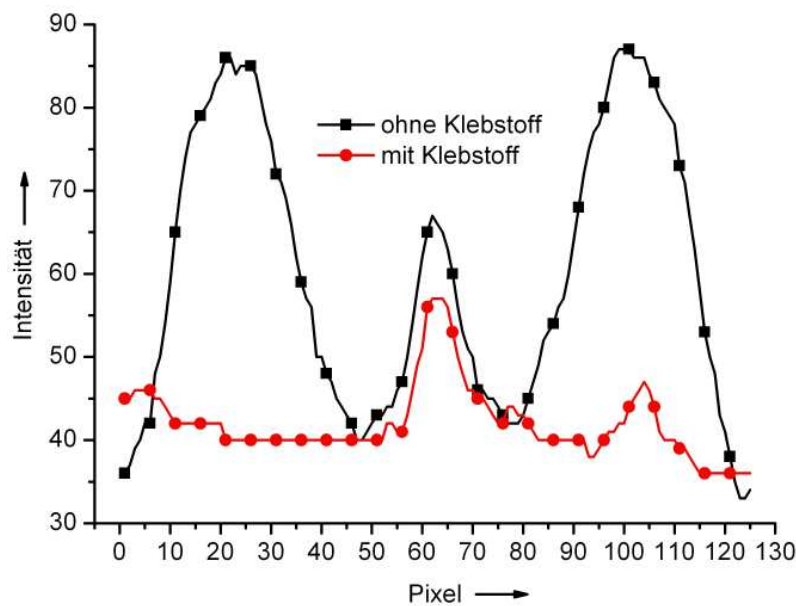


Abbildung 9.16: *Linienprofil von Faser in V-Grube, mit und ohne Klebstoff unter der Faser*

der Faser verteilt hat. Hierzu können zwei Maßnahmen durchgeführt werden. Wie in Abbildung 9.15 a) und b) zu sehen, verschwindet das Streifenpaar, welches um den Mittelstreifen der Faser liegt, wenn Klebstoff unter die Faser läuft. Wenn sich der Klebstoff nicht vollständig verteilt hat, verschwinden die Streifen nicht vollständig. In Abbildung 9.16 ist der Vergleich zweier Linienprofile für Fasern in V-Gruben mit und ohne Klebstoff dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass sich der Klebstoff nicht vollständig unter die Faser gezogen hat, da auf einer Seite der Grube noch ein heller Streifen vorhanden ist. Die zweite Möglichkeit zu überprüfen, ob sich der Klebstoff richtig verteilt hat besteht darin, den Bereich des Übergangs zwischen Faser und Chip zu überprüfen. Wenn Klebstoff die Faser entlang läuft wird die ansonsten hell reflektierende Siliciumnitrid Oberfläche dunkler, da nun das Licht nicht mehr nur senkrecht nach oben reflektiert wird. Die Aufnahme eines Linienprofils entlang der Faser zeigt deutlich die Benetzung der Oberfläche mit Klebstoff an. Die Verklebung einer zweiten Faser direkt neben einer zuvor verklebten ist schwieriger durchführbar (siehe Abbildung 9.17). Der Klebstoff muss zum Einen zwischen die beiden Fasern und am Übergang zwischen Chip und Faser aufgetragen werden. Hierbei muss die Dosierspitze höher positioniert werden, damit die Fasern nicht berührt werden. Eine zu gering dosierte Klebstoffmenge kann wie in Abbildung 9.17 zu einer Tröpfchenbildung auf der Faser führen. Die gewölbte Oberfläche des Klebstofftropfens

führt zu einer lokalen Verschiebung der Reflexionsstreifen. Da es in diesem Fall zu keinem Verschwinden der Streifen kommt, kann das Überwachungssystem feststellen, dass der Dosiervorgang wiederholt werden muss. Im zweiten Schritt wird Klebstoff auf die Fläche neben der Faser aufgebracht. Auch hier kann wiederum der Verlauf an der Faser entlang und die Veränderung unter der Faser überwacht werden.

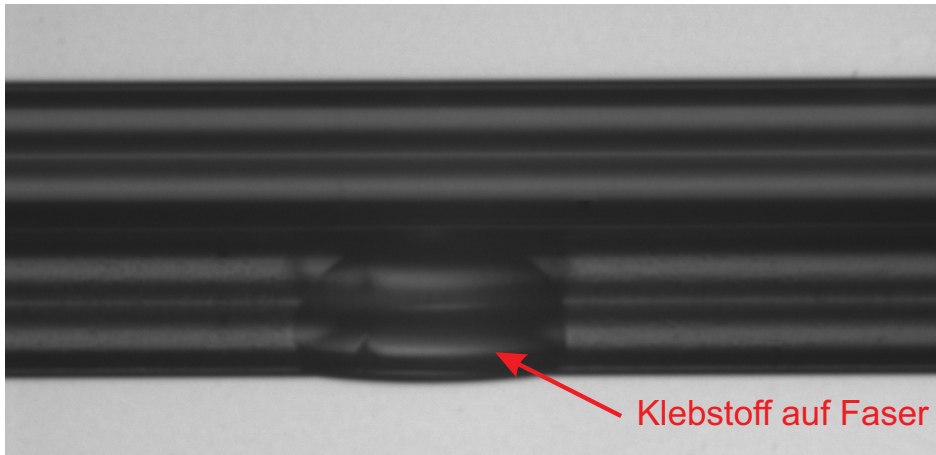


Abbildung 9.17: *Fehlfunktion des Dosiergeräts: kleiner Klebstofftropfen auf Glasfaser in Silicium V-Grube*

9.4.1 Kalibrierung der Dosierkanüle

Wird eine neue Kanüle in den zugehörigen Halter eingesetzt, so muss die Kanülenspitze in allen drei Raumrichtungen kalibriert werden. Dies geschieht am besten oberhalb einer gut reflektierenden Oberfläche. Die Kanüle erscheint bei der Verwendung der Auflichtbeleuchtung dunkel im hellen Bild. Durch die grobe Suche mit Hilfe eines einmal erstellten Fotos der Kanüle und anschließender Kantendetektion wird die Dosierspitze in lateraler Richtung sehr genau vermessen. Die Programmierung wurde so ausgelegt, dass in den folgenden Anlern- und Montageschritten nur die benötigte Koordinate im Bild der Kamera angegeben werden muss, um den Zielpunkt festzulegen.

Die Höhe über der Oberfläche muss ebenfalls kalibriert werden. Hierzu wurde ein automatisiertes Verfahren erarbeitet. Das Verfahren nutzt den Effekt aus, dass sich bei Berührung der Oberfläche die Kanülenspitze nach vorne schiebt. Durch schrittweise Annäherung an die Oberfläche wird der Berührungspunkt sehr genau festgestellt. Damit nicht zu viele Schritte ausgeführt werden müssen, kann über die Kantenschärfe der Kanüle die ungefähre Höhe über der Oberfläche zu Hilfe genommen werden. Bei größeren Abständen zwischen Kanüle und Oberfläche sind die Kanten der Kanüle sehr unscharf. Die Tiefenschärfe des verwendeten Objektivs beträgt jedoch $80\ \mu\text{m}$, so dass die Schärfe des Objekts nicht alleinig zur Kalibrierung verwendet werden kann.

Kapitel 10

Zusammenfassung & Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Bereiche der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik vorgestellt. Zunächst wurden ein- und zweidimensionale Führungsstrukturen für Glasfasern hergestellt. Die technologischen Möglichkeiten für die kostengünstige und präzise Herstellung von durchgehenden Kanälen in Silicium-Wafern mit hohen Aspektverhältnissen wurden vorgestellt. Rauten- und V-förmige Führungen wurden mit Dünnkernfasern bestückt und deren Genauigkeit gemessen. Die V-Gruben-Arrays bestückt mit Fasern wurden dann zur Ankopplung an SiON basierte Wellenleiterschaltungen verwendet. Mit Hilfe dieser Technologie können mehrere Fasern gleichzeitig angekoppelt werden. Im zweiten Teil der Arbeit wurde eine automatisierte Montageanlage entwickelt, welche Glasfasern in Führungsstrukturen platzieren und verkleben kann.

V-Gruben und Rauten-Strukturen konnten wie erwartet in guter Qualität hergestellt werden, da es sich um einen etablierten Prozess handelt. Die Qualität der Rautenarrays ist besser als die der V-Gruben-Arrays. Da jedoch der Montagevorgang für V-Gruben-Arrays genauer durchführbar ist, ist die Positioniergenauigkeit der V-Gruben-Arrays etwas höher als die der Rauten-Arrays. Aus diesem Grund wurden V-Gruben Chips im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet. Fehler durch die lokale Variation der Öffnungsbreite konnten nicht beobachtet werden. Mit Hilfe der entwickelten Montageanlage konnten spezielle Dünnkern-Glasfasern mit einer Genauigkeit von besser als $0,4\ \mu\text{m}$ in V-Gruben positioniert werden.

Die gesägten und polierten V-Gruben-Arrays wurden anschließend vor den Wellenleitern positioniert und verklebt. Der Fügeprozess und die präparierten Stirnflächen der V-Grubenchips erhöhen die Dämpfung im Vergleich zur Stoßkopplung mit Einzelfasern um bis zu $0,7\ \text{dB}$ für zwei Koppelstellen. Dieser Wert lässt sich weiter reduzieren, indem die Stirnflächen exakt orthogonal poliert werden und die Chips parallel zueinander ausgerichtet werden. Hierzu muss die Poliertechnik und die Positionierung der Chips zueinander weiter verbessert werden.

Zur Handhabung von Glasfasern wurden zwei Vakuumgreifer realisiert. Beide werden mit Hilfe des nasschemischen Ätzens mittels KOH hergestellt. Der eine Greifer wird aus {100}-Silicium hergestellt (horizontaler Greifer) und ermöglicht die Ansaugung der Faser an mehreren Stellen gleichzeitig, so dass die Faser sehr präzise geführt wird. Der andere Greifer aus {110}-Silicium ist sehr viel schmaler und bietet nur einen Greifpunkt (verti-

kaler Greifer). Die Haltekräfte betragen $2,5\text{ mN}$ für den horizontalen und $1,1\text{ mN}$ für den vertikalen Greifer. Beide Greifer tolerieren eine vertikale Fehljustage von bis zu $50\text{ }\mu\text{m}$. Die Wiederholgenauigkeit der Greifer liegt bei $0,3$ und $0,5\text{ }\mu\text{m}$. Durch die einseitige Einspannung der Greifer kommt es bei einer vertikalen Fehlpositionierung zu einer lateralen Verschiebung der Fasern. Deshalb sollten die Greifwerkzeuge in Zukunft beidseitig eingespannt werden. Eine Federstruktur, welche eine laterale Bewegung der gegriffenen Faser erlauben würde, wäre ebenfalls von Vorteil, da die Führungen des Greifers und des zu montierenden Chips sich gegenseitig behindern und eine größere Montagegenauigkeit erfordern.

Bei der Entwicklung der Montageanlage wurde Wert auf Flexibilität und geringen Aufwand gelegt. So wurde statt minimal fünf Motoren acht verwendet. Die Montageanlage kommt mit nur einer Optik aus. Mit Hilfe der entwickelten Bildverarbeitungsprozeduren wird die genaue Vermessung der Positionen des Silicium-Chips, der Glasfaser und des Dosiersystems ermöglicht. Lediglich die vertikale Position der Fasern kann nur mit einer geringeren Genauigkeit erfolgen. Die Bildverarbeitungsalgorithmen ermöglichen die Bewertung aller Montagevorgänge. Somit wird eine durchgehende Qualitätskontrolle und -Sicherung ermöglicht. Fehler werden frühzeitig erkannt oder werden zumindest dokumentiert, was einer schnellen Fehlerbehebung zugute kommt.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein provisorisches Fasermagazin verwendet und ein weiterführendes Konzept, dass Faserhalter verwendet, entwickelt [106]. Damit die Anlage hohe Stückzahlen erbringen kann, muss ein Fasermagazin entwickelt werden, welches robust und schnell Fasern dem Fügeprozess zur Verfügung stellt. Die Positionen der Fasereindflächen sollten durch den Spaltvorgang der Fasern festgelegt werden, um ein Suchen der Endfläche durch das Bildverarbeitungssystem zu vermeiden.

UV-härtender Klebstoff wurde mit Hilfe des Druckluft-Dosierverfahrens aufgebracht. Erste Versuche mit einem viel versprechenden neuen Ansatz, dem berührungslosen Aufbringen von Klebstoff mit Hilfe des Elektrospray-Verfahrens, wurden durchgeführt. Berührungslose Dosierverfahren sind am Markt verfügbar. Mit Hilfe des Elektrospray-Verfahrens könnte Klebstoff an schwer zugänglichen Stellen aufgebracht werden, da er sich entlang der elektrischen Feldlinien ausbreitet.

Die in dieser Arbeit entwickelten festen Faser-Chip-Verbünde zeigen, dass dämpfungsarme Koppelverbindungen von Dünnkernfasern und Wellenleitern möglich sind. Die entwickelte Fasermontageanlage erfüllt die gewünschten Genauigkeiten. Das Ziel, die automatisierte Überwachung des gesamten Montageprozesses mit nur einer Kamera, wurde erreicht. Nach Verbesserungen im Bereich des Fasermagazins, ermöglicht die Anlage die Montage von Glasfasern in V-förmige Führungsstrukturen bei mittleren bis geringen Stückzahlen.

Anhang A

Formelzeichen und Abkürzungen

α	Winkelfehler zwischen optischen Komponenten
α_d	linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient
α_v	spitzer Winkel Silicium V-Grube
A_Δ	Flächeninhalt Querschnitt V-Grube
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
CVD	Chemical Vapor Deposition
DRIE	Deep Reactive Ion Etching
d	axialer Faserabstand
FEM	Finite Elemente Methode
FTTH	Fibre To The Home
k_0	Wellenzahl
KOH	Kaliumhydroxid
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MFD	Modenfelddurchmesser
MOEMS	Micro Opto Electro Mechanical Systems
n	Brechzahl eines dielektrischen Mediums
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PWG1-XP	Dünnkernfaser der Firma Nufern

P_1, P_2	Ein- und Ausgangsleistung
r	radialer Abstand zwischen Modenfeldern
REM	Raster Elektronen Mikroskop
RIE	Reactive Ion Etching
Si	Silicium
Si_3N_4	Siliciumnitrid
SiO_2	Siliciumdioxid, Quarzglas
$SiON$	Siliciumoxinitrid
SMF28	Standard Einmodenfaser der Firma Corning
SSMF	Standard Single Mode Fibre
T	Temperatur
UHNA4	Dünnkernfaser der Firma Nufern
UV	Ultraviolett
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
w_0	Fleckradius
w_e, w_a	Fleckradien von Ein- und Ausgangsmode
w_x, w_y	horizontale und vertikale Abmessungen des Wellenleiterkerns
z_0	Rayleigh-Länge
η	Kopplungseffizienz
λ	Wellenlänge
$\langle hkl \rangle$	gleichwertige Kristallrichtungen, hkl sind Millersche Indizes
$\{hkl\}$	gleichwertige Kristallebenen, hkl sind Millersche Indizes

Literaturverzeichnis

- [1] Maxim Fadel, *Hochbrechende integriert-optische Siliciumoxinitrid- Wellenleiter für faseroptische Systemanwendungen*, Dissertationsschrift, Universität Dortmund, 2007, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8322-6047-7.
- [2] Wikipedia, „Aufbau- und Verbindungstechnik,” <http://de.wikipedia.org/wiki/AVT>, Stand: 21. Februar 2007.
- [3] FG Mikrosystemtechnik Wolfgang Wehl, HS Heilbronn, „Teilgebiete der Mikrosystemtechnik,” <http://www.mm.hs-heilbronn.de/wehl/mst/sys-tech.htm#AVT>, Stand: 21. Februar 2007.
- [4] Edgar Voges Martin Hoffmann, Peter Kopka, „All-Silicon Bistable Micromechanical Fiber Switch Based on Advanced Bulk Micromachining,” *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, Bd. 5, Nr. 1, S. 46–51, 1999.
- [5] HiTec Hitachi „V-Groove silicon platforms,” URL: <http://www.hitachi-hitec.com/products/oc/products/parts/v-groove/index.html>, Stand: 21. Februar 2007.
- [6] Corning, „Fiber Array Product Brochure PI107,” <http://www.corning.com/docs/specialtymaterials/pisheets/PI107.pdf>, Stand: 2. Januar 2007.
- [7] ZOoptics, „V-Groove Assemblies,” http://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0083.pdf, Stand: 2. Januar 2007.
- [8] Auxora, „Fiber Array,” http://www.auxora.com/expertise/fiber_array/, Stand: 2. Januar 2007.
- [9] K. Peters U. H. P. Fischer, S. Zech, „Transmitter modules with reusable fiber-chip coupling method for optical communications systems,” TechOnline: URL: http://www.techonline.com/community/ed_resource/tech_paper/14811, Stand: 13. März 2001.
- [10] *Mikrosystemtechnische Konzepte in der optischen Datenübertragung: Neuartige abstimmbare DFB-Laser und Bragg-Filter*, Proceedings Workshop ORT, Hagen, Germany, September 2000. H. Hillmer, C. Prott, M. Strassner.

- [11] M. Fadel R.B. Gentemann, „Coupling tolerances of high-index silicon-oxynitride waveguides with small bending radii,“ *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, Bd. 61, S. 168–171, 2007.
- [12] *TE-TM coupling of a standard fiber to a Si-wire waveguide*, Conf. Proceedings European Conference on Integrated Optics (ECIO), Copenhagen, Denmark, April 2007. R. Costa, G. Cusmai, A. Melloni.
- [13] P. Dumon G. Roelkens, „Efficient Silicon-On-Insulator Fibre Coupler Fabricated Using 248-nm-Deep UV Lithography,“ *Photonics Technology Letters*, Bd. 17, Nr. 12, S. 2613–2615, 2005.
- [14] *Compact Couplers between Optical Fibres and Silicon-On-Insulator Photonic Wire Waveguides with 69% Coupling Efficiency*, Bd. 5, Paper PDP15 von *Optical Fiber Communications Conference Post deadline Papers*, Anaheim, USA, 2005. Van Laere, G. Roelkens.
- [15] *Compact Focusing Grating Couplers Between Optical Fibers and Silicon-on-Insulator Photonic Wire Waveguides*, Bd. Paper OWG1 von *Optical Fiber Communications Conference*, Anaheim, USA, 2007. Van Laere, W. Bogaerts, D. Taillaert.
- [16] J. Jahns, *Photonik*, Oldenbourg Verlag, 2001, ISBN 3-486-25425-1.
- [17] E.-G. Neumann, *Single-Mode Fibres - Fundamentals*, Springer Verlag, 1988, ISBN 3-540-18745-6.
- [18] Martin Hoffmann, *Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems on Silicon for Optical Communications Systems*, Habilitationsschrift, Universität Dortmund, 2002.
- [19] U. Fischer, *Optoelectronic Packaging*, VDE, 2002.
- [20] Corning Incorporated, „SMF-28e,“ URL: <http://www.corning.com>, Stand: 6. März 2006.
- [21] Nufern, „Specialty Single-Mode High NA,“ URL: <http://www.nufern.com>, Stand: 22. Februar 2007.
- [22] Peter Kopka, *Optische Wellenleiterschaltungen und Mikrostrukturierung auf Silicium*, Dissertationsschrift, Universität Dortmund, 2001.
- [23] Edgar Voges Martin Hoffmann, „Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems,“ *J. Micromech. Microeng.*, Bd. 12, S. 349–360, 2002.
- [24] K.E. Petersen, „Silicon as a mechanical Material,“ *Proc. IEEE*, Bd. 70, Nr. 5, S. 420–457, 1982.
- [25] D. Nüsse E. Voges M. Hoffmann, P. Kopka, „Fibre-optical MEMS switches based on bulk silicon micromachining,“ *Microsystem Technologies*, Bd. 9, S. 299–303, 2003.
- [26] Editiert von: R. Hull, *Crystalline Silicon*, INSPEC, 1999, ISBN 0-85296-933-3.
- [27] P. Bley W. Menz, *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, VCH, 1993, ISBN 3-527-29003-6.

- [28] All Resist, „ARU-4040,” URL: <http://www.allresist.de/deutsch/frameset.html>, Stand: 16. März 2006.
- [29] Micro Chemicals GmbH, „AZ-1518,” URL: <http://www.microchemicals.de/photoresists/produkte>, Stand: 16. März 2006.
- [30] Dirk Nüsse, *Elektrostatistische Faserschalter in Silicium-Volumenmikromechanik*, Dissertationsschrift, Universität Dortmund, 2007, Der Andere Verlag, ISBN: 3-89959-567-X.
- [31] A. Heuberger, *Mikromechanik*, Springer Verlag, 1989, ISBN 3-540-18721-9.
- [32] W. Sansen B. Puers, „Compensation structures for convex corners micromachining in silicon,” *Sensors and Actuators*, Bd. A21-A23, S. 1036–1041, 1990.
- [33] D.D. Cho B. Kim, „Aqueous KOH etching of silicon <110>: Etch characteristics compensation methods for convex corners,” *J. Electrochem. Soc.*, Bd. 147, Nr. 7, S. 2499–2508, 1998.
- [34] Gerhard Franz, *Niederdruckplasmen und Mikrostrukturtechnik*, Springer Verlag, 2004, 3. Auflage, ISBN 3-54040765-0.
- [35] I.W. Rangelow, „High-resolution tri-level process by downstream-microwave RF-biased etching,” *SPIE Proc.*, Bd. 1392, S. 180–184, 1990.
- [36] J. Bellermand, *Selbstjustierende Aufbautechnik zur Ankopplung von Glasfaser-Arrays an integrierte optoelektronische Schaltkreise*, Dissertation, TU München, 1997.
- [37] *Surface Quality of Anisotropically Etched Groves in CMOS Silicon Wafers with Intrinsic Gettering - the role of the Initial Oxygen Content*, Micromechanics Europe, MME 1998, Ulvik in Hardanger, Norwegen, 3.-5. Juli 1998. T. Müller, T. Feichtinger, A. Benktitsch, O. Brand und H. Baltès.
- [38] Veeco Instruments, „Optical Profilers,” URL: <http://www.veeco.com>, Stand: 22. Februar 2007.
- [39] T. Pampel, *Entwicklung einer dämpfungsarmen Faserverbund - Wellenleiter - Kopplung*, Diplomarbeit, Universität Dortmund, & LS Hochfrequenztechnik, 2006.
- [40] David L. Stokes Tuan Vo-Dinh Leonardo R. Allain, Mino Askari, „Microarray sampling-platform fabrication using bubble-jet technology for a biochip system,” *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, Bd. 371, Nr. 2, S. 146–150, 2004.
- [41] J. Hopkins J.R. Pink H. Ashraf A. A. Chambers, „Water-guided laser cuts precisely,” *Advanced Packaging*, Bd. 14, April 2005.
- [42] S. Kopecz A. Neyer B. Wittmann, S. Lehmacher, „Optical Interconnects on and in Printed Circuit Boards,” *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, Bd. 55.
- [43] Lutz Hoppe, *Faseroptische Verbindungen zwischen integrierten Schaltkreisen zur Überwindung der Verbindungskrise in der VLSI-Technik*, Dissertation, Friedrich Schiller Universität Jena, 2005.

- [44] C. Compare M.M. Strasser, T. Ammer, „Optischer Mehrfach-Faserverbinder für Singlemode Anwendungen,” in *Workshop Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik*, Berlin, 2005, ITG (VDE).
- [45] M. Jöhnck A. Neyer, B. Wittmann, „Plastic-Optical-Fiber-Based Parallel Optical Interconnects,” *IEEE J. OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM EL.*, Bd. 5, Nr. 2, S. 193–199, 1999.
- [46] A. Neyer M. Jöhnck, B. Wittmann, „64 channel 2D POF-based optical array inter-chip interconnect,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, Bd. 1, S. 313–316, 1999.
- [47] Protron Mikrotechnik GmbH, „Präzisions Faser-Arrays,” <http://www.protron-mikrotechnik.de/>, Stand: 11. April 2006.
- [48] Protron Mikrotechnik GmbH, „Vorrichtung zur Positionierung optischer Fasern, Verbinder mit derartiger Vorrichtung sowie optisches Kabel mit derartigen Verbinder,” Patentschrift: DE 103 04 977 A1, August 2004.
- [49] H. Bartelt L. Hoppe, J.M. Köhler, „Zweidimensionales Faserarray und Verfahren zu seiner Herstellung,” Patentanmeldung beim Deutschen Patentamt, Pat. Nr.: 199 25 015.4.
- [50] A. Schumacher H.-J. Wagner M. Alavi, S. Büttgenbach, „Fabrication of microchannels by laser machining and anisotropic etching of silicon,” *Sensors and Actuators A*, Bd. 32, S. 299–302, 1992.
- [51] K. Temmen M. Hoffmann R.B. Gentemann, D. Teufer, „3D-fibre channels in silicon by electrical breakdown - New opportunities for optical fibre alignment and microfluidics,” 2007, Bd. 61, S. 172–176.
- [52] Protron Mikrotechnik GmbH, „Vakuum Fasergreifer,” <http://www.protron-mikrotechnik.de/>, Stand: 11. April 2006.
- [53] Ulrich klug, „Laserzentrum Hannover,” führte die Versuche mit einem Femtosekunden-Laser durch.
- [54] Marc Baumeister, „Laserzentrum FH Münster,” führte die Versuche mit einem Pikosekunden-Laser durch.
- [55] Synova SA, „The Water Jet Guided Laser,” <http://www.synova.ch/>, Stand: 10. April 2006.
- [56] OLE, „Water-guided laser cuts precisely,” *Optics and Lasers Europe*, S. 10, September 2004.
- [57] „Institut für Mikrostrukturtechnologie und Analytik, Universität Kassel Author = Burckhard Volland, Ivo Rangelow, note = führten die Versuche mit einer ICP Ätzanlage durch,” .
- [58] Daniel Teufer, *Herstellung zweidimensionaler Silicium-Führungsstrukturen für die Aufbau- und Verbindungstechnik*, Studienarbeit, Universität Dortmund, LS Hochfrequenztechnik, 2006.

- [59] „Silicon Sensor GmbH,” <http://www.silicon-sensor.de/ger/index.htm>, Juni 2005.
- [60] *Polycrystalline silicon films by aluminium-induced crystallisation: growth process vs. silicon deposition method*, Bd. 451-452.
- [61] T. Anthony H. Cline, „Migration on fine molten wires in thin silicon wafers,” *Journal of Applied Physics*, Bd. 49.
- [62] B. Morillon et al. G. Gautier, S. Kouassi, „Deep trench etching combining aluminum thermomigration and electrochemical silicon dissolution,” *APPLIED PHYSICS LETTERS*, Bd. 88.
- [63] Schott AG, „Low Temperature Bonding for Precision Optics,” URL: http://optics.nasa.gov/tech_days/tech_days_2004/docs/18%20Aug%202004/23%20Schott%20Low%20Temperature%20Bonding.pdf, Stand: 21. Februar 2007.
- [64] Matthias Niemand, *Eignung des Low Temperature Bonding Verfahrens für die Volumenmikromechanik*, Studienarbeit, Universität Dortmund, LS Hochfrequenztechnik, 2006.
- [65] Delo Industrieklebstoffe GmbH, *Bond It*, Delo GmbH, F. Leibinger, 2002, ISBN 3-00-010310-4.
- [66] Panacol Elosol GmbH, „Datenblätter Vitralit 1505, 1507 etc.,” URL: <http://www.panacol.de>, Stand: 25. April 2006.
- [67] A. Battermann, *Entwicklung spezifischer Klebstoffe für die Faser-Chip Kopplung*, VDI/VDE, 1997, Verbundprojekt: Aufbau- und Verbindungstechniken für faser- und integriert-optische Sensoren, Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 51.
- [68] Markus Möller, *Mikroapplikation von ungefüllten Klebstoffen*, Dissertation, Universität Aachen, 2001, ISBN 3-8265-9772-9.
- [69] Gesellschaft für Löttechnik mbH, „Datenblatt Ultra Dosiernadeln,” URL: <http://www.glt-pforzheim.de>, Stand: 16. Februar 2007.
- [70] Nabih Othman, *Entwicklung eines Verfahrens zum präzisen Punkt- und Linienauftrag von hochviskosem Leitleber mit einem geregelter Mikrodosiersystem*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005, ISBN 3-936947-73-2.
- [71] Wikipedia, „Elektrospray,” <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrospray>, Stand: 19. April 2007.
- [72] G. Bona M. Spühler, B. Offrein, „A Very Short Planar Silica Spot-Size Converter Using a Nonperiodic Segmented Waveguide,” *Journal of Lightwave Technology*, Bd. 16, S. 1680–1685, 1998.
- [73] C. Bott J. Hester N. Aust, N. Boos, *Automatisierte Montage von V-Gruben-Arrays*, Projektgruppe, Universität Dortmund, LS Hochfrequenztechnik, 2005.

- [74] FZ-Karlsruhe U. Gengenbach, „Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen,” Abschlussbericht, Verbundprojekt, 1995-1997, Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 60, ISBN 3-89750-071-X.
- [75] R. Fischer, *Entwicklung von Greif- und Spannvorrichtungen für die automatisierte Montage von Mikrobauteilen*, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1997, ISBN 3-18-329201-7.
- [76] S. Hesse, *Greifer-Praxis: Greifer in der Handhabungstechnik*, Vogel, 1991, 1. Auflage, ISBN 3-8023-0476-4.
- [77] F. Bauer, *Maßnahmen und Methoden zur Flexibilisierung pneumatischer Greifsysteme*, Dissertation, RWTH Aachen, 2002.
- [78] U. Schweigert, „Noch nicht praxiserprobt: Greiferkonzepte für die automatisierte Montage,” *Schweizer Maschinenmarkt*, Bd. 17, S. 20–23, 1992.
- [79] Milasys Technologies GmbH, „CombiGRIP Horizontal,” Produktbroschüre, Stand: 3. März 2004.
- [80] M. Erdmann R. Fearing M. Moll, K. Goldberg, „Aligning parts for micro assemblies,” *Assembly Automation*, Bd. 22, S. 46–53, 2002.
- [81] Milasys Technologies GmbH, „” <http://www.milasys.de/>, Stand: 21. April 2006.
- [82] C. Duncheon, „Product miniaturization requires automation - but with a strategy,” *Assembly Automation*, Bd. 22, S. 16–20, 2002.
- [83] E. Voges R.B. Gentemann, „Anisotropically etched silicon fibre-grippers,” *Microsystem Technologies*, 2007, DOI: 10.1007/s00542-007-0410-5.
- [84] C. Peschke C. Brecher, „Methods for highly accurate gripping of flexible micro parts,” *Microsystem Technology*, Bd. 12, S. 598–603, 2006.
- [85] CadFem GmbH, „Ansys Simulationssoftware,” <http://www.cadfem.de/>, Stand: 07. August 2006.
- [86] U. Mescheder, *Mikrosystemtechnik*, Teubner, 2000, 1. Auflage.
- [87] C. Peschke C. Brecher, „Flexible und modulare Handhabungstechnik zur prozesssicheren Montage miniaturisierter Bauteile,” *Werkstattstechnik online*, Bd. 94, S. 395–399, 2004.
- [88] B. Petersen, *Flexible Handhabungstechniken für die automatisierte Mikromontage*, Dissertation, 2003, ISBN 3-8322-1815-7.
- [89] M. Tolbert S. Ragona, „The Road to Recovery of the Optoelectronic Component Industry,” in *Workshop Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik*. ITG (VDE), Mai 2003.

- [90] S. Michaelis, *Entwicklung von mikromechanischen Schaltern für neuartige MEMS Produkte unter Aspekten industrieller Fertigungsprozesse*, Dissertation, Universität Bremen, 2001.
- [91] T. Scheller, *Untersuchungen zu automatisierten Montageprozessen hybrider mikrooptischer Systeme*, Dissertation, Universität Ilmenau, 2001.
- [92] E. Voges R.B. Gentemann, „Flexible Montage optischer Mikrosysteme - Visuelle Positionierung und Prozesskontrolle,“ in *National Instruments VIP*, Fürstenfeldbruck, April 2005.
- [93] P. Ruther R. Scharnowell D. Seidel U. Gengenbach, F. Engelhardt, „Montage hybrider Mikrosysteme,“ Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6080, 1998, 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik.
- [94] M. Höhn, *Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme*, Dissertation, TU München, 2001, ISBN: 3-8316-0012-0.
- [95] „DIN-Fachbericht 65, Mikrosystemtechnik,“ Beuth Verlag, Berlin 1997.
- [96] DIN 32563, „Fertigungsmittel für Mikrosysteme- Klassifizierung für Mikrobauteile,“ Berlin 2000.
- [97] Physikinstrumente GmbH, „Spindelmotoren M-531.PD, M-505.PD, M-111.DG, M-067.PD,“ <http://www.physikinstrumente.de/>, Stand: 11. April 2006.
- [98] Sony, „XCD 700/710,“ <http://www.sonybiz.net/odw/vision>, Stand: 30. August 2006.
- [99] Stemmer Imaging, „Rodenstock Makro CCD 8,“ <http://www.stemmer-imaging.de/>, Stand: 30. August 2006.
- [100] SAE Technologies, „z.B. Autoprep II,“ <http://www.3sae.com>, Stand: 09. November 2006.
- [101] Schleuniger, „Fibre Optic Stripper,“ <http://www.schleuniger.de>, Stand: 09. November 2006.
- [102] Nyfors, „AutoStripper,“ <http://www.nyfors06.com>, Stand: 09. November 2006.
- [103] Cooke Corporation, „Automatic Fibre Optic Cleaner,“ <http://www.cookecorp.com>, Stand: 09. November 2006.
- [104] Ericsson-Corporation, „Electronic Fiber Cleaner & Cleaver,“ <http://archive.ericsson.net/service>, Stand: 09. November 2006.
- [105] M. Mohan, *Design of a fibre magazine for the automated assembly of mono-mode fibre modules*, Masterarbeit, Universität Dortmund, LS Industrielle Robotik und Handhabungssysteme & LS Hochfrequenztechnik, 2005.
- [106] T. Rettig M. Pähler, *Konstruktion eines Glasfaser-Magazins für die automatisierte Montage von Mikrokomponenten*, Studienarbeit, Universität Dortmund, LS Industrielle Robotik und Handhabungssysteme & LS Hochfrequenztechnik, 2006.

- [107] R. B. Gentemann, „Werkzeugintegration einer visuellen Positionierung und Prozesskontrolle für die flexible Montage von optischen Mikrosystemen,” Abschlussbericht Forschungsvorhaben S 598 Stiftung Industrieforschung, Oktober 2004.
- [108] „Euromicron Werkzeuge GmbH, Im Seifen 12, D-35756 Mittenaar,” <http://www.euromicron-fo.de/>.
- [109] National Instruments Corporation, „LabView,” <http://www.ni.com/labview>, Stand: 22. März 2007.
- [110] F. Engelhardt R. Scharnowell U. Gengenbach, J. Göttert, „Ein System zur Montage von Mikrosystemen,” Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 5670, 1995, 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik.
- [111] „Iris FMG Diorite: Technische Eigenschaften,” <http://www.irisfmg.com/D0000033.asp>, Stand: 24. April 2007.
- [112] C. Bosbach, *Miniaturisiertes Weißlichtinterferometer mit hoher Messfrequenz für die absolute Abstandsmessung*, Dissertation, RWTH Aachen, 2003, Shaker 2003 Bd. 13, ISBN 3-8322-1544-1.
- [113] M. J. Burge W. Burger, *Digitale Bildverarbeitung*, Springer, 2006, 2. Auflage, ISBN-10 3-540-30940-3.