

Untersuchungen zu automatisierten Montageprozessen hybrider mikrooptischer Systeme

Dissertationsschrift
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Torsten Scheller
aus Jena

| | |
|-----------------------------|--|
| Hauptgutachter: | Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. H. Wurmus |
| Nebengutachter: | Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schilling Dr.-Ing. habil. V. Guyenot |
| Tag der Einreichung: | 01.08.2000 |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 26.07.2001 |

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF) in Jena.

Meinem Betreuer an der Technischen Universität Ilmenau Herrn Professor Dr.-Ing. habil. H. Wurmus danke ich für die hilfreiche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Besonderer Dank gilt auch Frau Dr. rer. nat. R. Eberhardt sowie Herrn Dr.-Ing. habil. V. Guyenot für die konstruktiven Hinweise bei Aufbau und Durchführung der Arbeit.

Für viele weiterführende Diskussionen möchte ich außerdem Herrn Dr. rer. nat. G. Tittelbach, Herrn Dipl.-Ing. Ch. Damm, Herrn Dipl.-Ing. A. Gebhardt sowie den Kollegen und Kolleginnen der Abteilung Feinwerktechnik danken.

Nicht zuletzt gebührt ein herzliches Dankeschön meiner Familie und Heidi für den großen Rückhalt, die stete Ermunterung und die großen zeitlichen Zugeständnisse.

Jena, Juli 2000

Torsten Scheller

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 2 |
| | |
| 1 Einleitung | 6 |
| 1.1 Entwicklungstendenzen in der Mikrosystemtechnik..... | 6 |
| 1.2 Ziel der Arbeit | 7 |
| | |
| 2 Grundlagen und Stand der Technik | 9 |
| 2.1 Grundlagen..... | 9 |
| 2.2 Montage makrooptischer Systeme..... | 13 |
| 2.3 Montage / Justierung mikrooptischer Bauteile..... | 17 |
| 2.4 Montageumgebung für automatisierte Prozesse | 19 |
| 2.4.1 Positioniersystem | 19 |
| 2.4.2 Peripherie | 20 |
| 2.5 Zusammenfassung zum Stand der Technik..... | 25 |
| | |
| 3 Aufstellung von Lösungen für die automatisierte Montage mikrooptischer Systeme | 26 |
| 3.1 Positionierung mit Hilfe von Fügevorrichtungen | 26 |
| 3.2 Justierung anhand charakteristischer Konturmerkmale | 27 |
| 3.3 Justierung anhand der optischen Funktion | 28 |
| | |
| 4 Charakterisierung des Demonstratorsystems | 30 |
| | |
| 5 Fehlerbetrachtung automatisierter Montageprozesse | 33 |
| 5.1 Theoretischer Ansatz zur Fehlerbetrachtung bei Montageprozessen..... | 33 |
| 5.1.1 Fehlerbetrachtung von Messgrößen..... | 34 |
| 5.1.2 Toleranzbetrachtung der Maßverkörperung von Prozesskomponenten..... | 37 |
| 5.2 Übertrag der Fehler- und Toleranzbetrachtung auf automatisierte Montageprozesse | 39 |
| 5.3 Experimentelle Bestimmung der Abweichungen von Demonstratorsystem und Montageumgebung | 41 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3.1 | Bestimmung der Fertigungsabweichungen der optischen Komponenten | 41 |
| 5.3.2 | Bestimmung der Abweichungen von Vorrichtungen und Greifwerkzeugen | 44 |
| 5.3.3 | Positionierfehler des Positioniersystems..... | 46 |
| 5.3.4 | Bestimmung des Messfehlers des Bildverarbeitungssystems..... | 46 |
| 5.4 | Bestimmung der Montageabweichungen bei Einsatz von Fügevorrichtungen zur Positionierung von mikrooptischen Bauteilen | 47 |
| 5.5 | Bestimmung der Montageabweichungen bei Einsatz bildverarbeitender Justierverfahren | 49 |
| 5.5.1 | Justierung anhand charakteristischer Konturmerkmale..... | 49 |
| 5.5.2 | Justierung anhand der optischen Funktion..... | 52 |
| 5.6 | Vergleich der theoretisch ermittelten Abweichungen mit den Vorgaben des Systems | 54 |
| 6 | Experimentelle Untersuchungen..... | 60 |
| 6.1 | Experimenteller Aufbau der Montageumgebung /-peripherie | 60 |
| 6.1.1 | Positioniersystem | 60 |
| 6.1.2 | Magazinierung..... | 61 |
| 6.1.3 | Werkzeugwechsellvorrichtung | 61 |
| 6.1.4 | Greifwerkzeuge | 62 |
| 6.1.5 | Montageplattform | 63 |
| 6.2 | Experimentelle Versuchsstände zur Beurteilung der Montageprozesse..... | 64 |
| 6.2.1 | Positionierverfahren mit Hilfe von Fügevorrichtungen..... | 64 |
| 6.2.2 | Justierung anhand charakteristischer Konturmerkmale..... | 67 |
| 6.2.3 | Justierung anhand der optischen Funktion..... | 71 |
| 6.3 | Charakterisierung der gefügten Baugruppen | 76 |
| 6.3.1 | Charakterisierung anhand geometrischer Merkmale | 76 |
| 6.3.2 | Charakterisierung der optischen Funktion..... | 77 |
| 7 | Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen | 80 |
| 7.1 | Charakterisierung der gefügten Baugruppen | 80 |
| 7.1.1 | Geometrische Messungen..... | 80 |
| 7.1.2 | Koppeleffizienz der gefügten Baugruppen..... | 85 |
| 8 | Diskussion | 89 |

| | |
|--|------------|
| 8.1 Vergleich der Untersuchungsergebnisse | 89 |
| 8.2 Anwendungsbereiche der untersuchten Montageprozesse in der automatisierten Montage mikrooptischer Systeme | 93 |
| 8.3 Optimierung der Montageprozesse..... | 95 |
| 8.3.1 Allgemeine Optimierungsansätze | 95 |
| 8.3.2 Optimierung bei der Positionierung mit Fügevorrichtungen: | 96 |
| 8.3.3 Optimierung für bildverarbeitende Verfahren..... | 97 |
| 9 Zusammenfassung und Ausblick..... | 98 |
| 10 Verzeichnis der Formelzeichen..... | 102 |
| 11 Literaturverzeichnis | 104 |
| 12 Veröffentlichungen..... | 111 |
| 13 Anhang | 113 |

1 Einleitung

1.1 Entwicklungstendenzen in der Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik wird sowohl von der Wissenschaft als auch von der Industrie, als eine der entscheidenden Zukunftstechnologien zur Entwicklung neuer Produktgenerationen bezeichnet. Laut Definition bedeutet Mikrosystemtechnik die Verbindung von miniaturisierten, mikrostrukturierten Komponenten und geeigneter Sensorik und Aktorik zu intelligenten Systemen [1]. Vorbild für die Entwicklung der Mikrosystemtechnik ist die Mikroelektronik, die sich den Zugang zu Massenmärkten vieler Lebensbereiche erobert hat. Der Grund für diese Entwicklung in der Mikroelektronik ist der Einsatz von Produktionsverfahren wie der Dünnschichttechnik und der Si-Mikromechanik, die eine kostengünstige Verarbeitung in Batch-Prozessen ermöglicht. Die bereits in großen Stückzahlen produzierten Produkte der Mikrosystemtechnik, wie Drucksensoren und Beschleunigungssensoren, basieren zum großen Teil auf diesen Technologien. Die Überführung weiterer mikrotechnischer Produkte vom Labormuster in die industrielle Anwendung verläuft aber langsamer als erwartet.

Eine entscheidende Voraussetzung, um die Überführung weiterer Produkte zu ermöglichen und so neueste positive Marktprognosen für die Mikrosystemtechnik zu bestätigen [2], sind neue Technologien zum Aufbau von komplexen hybriden Mikrosystemen. Hauptforderungen an diese Technologien sind, Mikrosysteme dreidimensional zu gestalten, die Integration vielfältiger Materialpaarungen in den Systemen zu realisieren und so die Eigenschaften verschiedener im System vereinigter Komponenten für Sensorik und Aktorik gleichermaßen zu nutzen. Nur auf dieser Basis wird sich die Mikrosystemtechnik weitere Anwendungsbereiche in der Verkehrstechnik, dem Maschinenbau sowie der Medizin- und Analysetechnik erschließen können.

Die Montage hybrider Mikrosysteme ist vor allem mit hohen Forderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) verbunden. Der Montageprozess ist allgemein sehr komplex und beinhaltet die Zuführung, Handhabung, Positionierung, Justierung und das Fügen der Systemkomponenten. Neben den Fügeverfahren zum Verbinden der unterschiedlichen Materialien sind die geforderten Fügegenauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer die größte Herausforderung bei der Montage von Mikrosystemen. Ein Anwendungsgebiet mit einer Vielzahl hybrid aufgebauter Systeme ist die Mikrooptik, insbesondere in Systemen der Kommunikationstechnik und der Optoelektronik. Hier sind die hohen Fügegenauigkeiten Voraussetzung, um die Parameter zu erfüllen, die durch ein optisches Design der Baugruppe vorgegeben werden. Zur Kompensation der Bauteilabweichungen und der Abweichung von optischem und geometrischem Zentrum kann der Fügevorgang durch eine Justierung der Komponenten unterstützt werden. Mit zunehmender Miniaturisierung der Komponenten, steigenden Stückzahlen und den gegebenen Genauigkeitsforderungen in der Mikrooptik kann die bisher eingesetzte manuelle Montage die Reproduzierbarkeit der Produktqualität nicht mehr garantieren.

Zur Lösung dieser Problemstellung werden neue Verfahrensansätze für die Montage mikrooptischer Systeme benötigt. Ein Lösungsansatz zum ökonomischen Aufbau mikrooptischer Systeme in den geforderten Genauigkeiten und Stückzahlen ist die Entwicklung automatisierter Prozesse. Positionier- und Handhabungssysteme in diesem Genauigkeitsbereich sind bereits am Markt erhältlich und werden stetig verbessert. Andere Teilprozesse der Montage, wie zuverlässige Greiftechniken sind Schwerpunkte in der Entwicklung an institutionellen Forschungseinrichtungen, sind aber für den industriellen Einsatz noch nicht geeignet oder werden aufgrund der fehlenden Nachfrage der Industrie noch nicht kommerziell vertrieben. Aufgrund der Bauteilempfindlichkeit besteht der größte Entwicklungsbedarf bei der Umsetzung der Optikmontage in automatisierte Prozesse in der Zuführung, der Aufbau- und Verbindungstechnik und insbesondere in der Justierung der Systemkomponenten. Die Entwicklung eines geeigneten Montageprozesses und der zugehörigen Montageumgebung ist dabei abhängig von der jeweiligen Aufgabe, d.h. von den enthaltenen Einzelkomponenten und deren Anordnung zu einem optischen System.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Kernproblem bei der Montage optischer und mikrooptischer Systeme ist das Erreichen der Positioniergenauigkeit, die nötig ist, um die Funktion der Optikbaugruppe zu erfüllen. Zur Lösung dieses Problems ist es erforderlich, Verfahren und Anordnungen in die Montageprozesse zu integrieren, die eine Ausrichtung der Komponenten durch eine hochgenaue Positionierung bzw. Justierung erreichen. Die Verfahren der konventionellen Optikmontage lassen sich jedoch aufgrund der geringen Abmessungen der Bauteile und den damit verbundenen kleinen Flächen zum Halten der Bauteile nicht oder nur bedingt auf die Mikromontage übertragen.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der Aufgabe, neue, technologisch und ökonomisch geeignete Montageverfahren zur Bauteilpositionierung und Bauteiljustierung für die automatisierte Mikromontage zu entwickeln, die den Forderungen an die Montage mikrooptischer Systeme mit Fügegenauigkeiten von 0,1-10 μ m gerecht werden.

Die entwickelten Montageprozesse werden innerhalb der Untersuchungen bzgl. der auftretenden Fehlergrößen der Einzelprozesse analysiert und diese Zusammenhänge theoretisch beschrieben. Aus diesen Berechnungen ergibt sich eine Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten für unterschiedliche Montageprozesse. Zur Verifizierung dieser theoretischen Abschätzung werden mit den untersuchten Prozessen Baugruppen gefügt und charakterisiert und anhand der experimentellen Ergebnisse deren Einsatzfähigkeit für die automatisierte Mikromontage qualifiziert und quantifiziert. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen beziehen sich beispielhaft auf eine komplexe mikrooptische Baugruppe (Abb. 1.1), eine Strahlformungsoptik zur effizienten Einkopplung des Strahls eines Breitstreifen-Diodenlasers in eine Multimodefaser. Im Gegensatz zu Montageaufgaben, die auf einer geometrisch einfachen und sehr genauen Positionierung (<1 μ m) zylindrischer Bauteile (z.B. Fasern) in Kanälen oder Si-V-Gruben beruhen, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Montage komplexerer Systemstrukturen, die beispielsweise für Anwendungen mit hoher Strahleffizienz bzw. Abbildungsgüte eingesetzt werden. Das verwendete Demonstratorsystem entspricht einer solchen komplexen mikrooptischen Baugruppe. Aufgrund der steigenden Einsatzgebiete von Strahlformungsoptiken im Bereich von Hochleistungslaserdiodensystemen, die beispielsweise in der Drucktechnik und beim Anregen

anderer Laserquellen eingesetzt werden, werden zukünftig zunehmend automatisierte Fertigungsprozesse zur Gewährleistung reproduzierbarer Fügegenauigkeiten benötigt. Diese Marktentwicklung unterstreicht die Bedeutung dieser Untersuchungen.

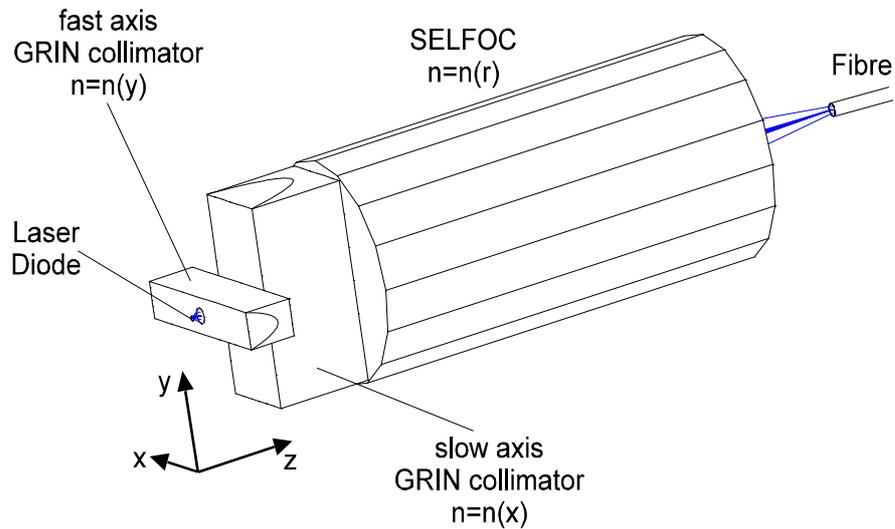


Abb. 1.1 Schematischer Aufbau des Demonstratorsystems [63]

Als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen wird ein Variantenvergleich der Montageprozesse angestrebt, der folgende Aussagen liefert:

- Ein Analysekonzept, das für eine gegebene Montageaufgabe anhand eines theoretischen Berechnungsansatzes eine Abschätzung der erreichbaren Fügegenauigkeiten für verschiedene Montageprozesse vorgibt und diesbezüglich die Auswahl des geeigneten Prozesses ermöglicht.
- Die Verifizierung dieser Berechnungen für das untersuchte mikrooptische System, indem diese mit den experimentellen Fügeergebnissen der verschiedenen Montageprozesse verglichen werden. Aus diesem Vergleich lässt sich eine allgemeine Aussage über die Eignung und Integrationsfähigkeit der Prozesse in eine automatisierte Montageumgebung erstellen.
- Eine Ableitung geeigneter Einsatzbereiche der untersuchten Montageprozesse anhand der erzielten Ergebnisse.

Hauptkriterien für diesen Vergleich sind die realisierbaren Montageabweichungen für die untersuchten Verfahren und das Verhältnis des jeweils benötigten Montageaufwands zur Produktivität. Desweiteren soll eine Aussage zur Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere mikrooptische Systeme und Systeme anderer Bereiche der Mikrosystemtechnik getroffen werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Grundlagen

Betrachtet man den Stand der Technik hinsichtlich der Montage und Justierung optischer Systeme, muss man zwischen zwei Bereichen, makro- und mikrooptischen Systemen, unterscheiden. Bei der Fertigung konventioneller makrooptischer Systeme besteht aufgrund jahrzehntelanger Erfahrungen in der Entwicklung industrieller Produktintegration großes Know-how bzgl. der verschiedenen Montageprozesse. Diese sind größtenteils auf manuelle Prozesse beschränkt und beruhen auf der Verwendung gefasster Linsen. Mit der zunehmenden Miniaturisierung der Produkte, wächst auch die Notwendigkeit, optische Teilsysteme zu verkleinern. Für diese Entwicklung bestehen nur geringe Erfahrungen hinsichtlich des Montageprozesses, da der direkte Übertrag der makrooptischen Prozesse und Erfahrungswerte in den Bereich mikrooptischer Systeme nur begrenzt realisierbar ist.

Die Funktion optischer Systeme fordert Systemkomponenten, die genau zueinander ausgerichtet sind. Deshalb ist der Montagevorgang einer der wichtigsten Prozesse innerhalb des Produktionsablaufes. Der Montageprozess lässt sich nach VDI-Richtlinie 2860 [3] in die Einzelprozesse/-schritte Zuführung, Handhabung, Positionierung / Justierung, Fügen und die Qualitätskontrolle unterteilen. Abbildung 2.1 zeigt diese Klassifizierung mit einer Aufschlüsselung der Einzelprozesse.

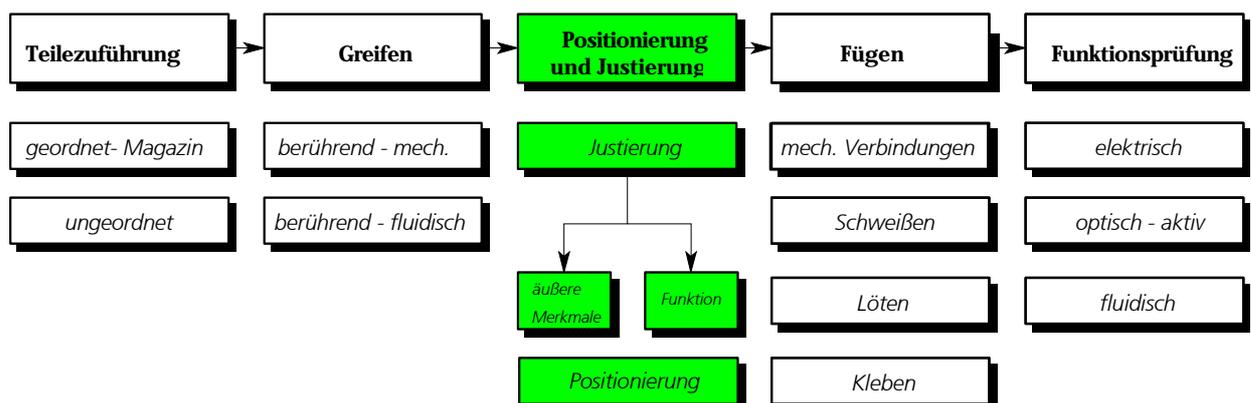


Abb. 2.1 Einzelprozesse des Montageablaufes nach VDI-Richtlinie 2860 [3]

Die optischen Komponenten eines optischen Systems bestehen aus Glas bzw. abgeformten Polymeren. Beide Materialien weisen bzgl. des Montageprozesses ungünstige Eigenschaften auf, da Glas aufgrund des amorphen Charakters sehr spröde ist und Polymere aufgrund der geringen

Härte oberflächenempfindlich sind. Eine ungünstige Beanspruchung beider Werkstoffe muss daher während des Montageprozesses vermieden werden. Neben den optischen Komponenten werden bei den Montagevorgängen Fassungen, Hilfs- und Funktionsbauteile verwendet, die aus anderen Werkstoffen bestehen. Die Kombination der verschiedenen Einzelbausteine zu einem Gesamtsystem ermöglicht die Funktion der Baugruppe, beinhaltet aber gleichzeitig besondere Forderungen bzgl. der einzelnen Montageprozesse wie die Handhabung und die AVT.

Die besonderen Forderungen innerhalb des Montageprozesses optischer Systeme beschreibt Tab. 2.1 mit charakteristischen Merkmalen makrooptischer Bauteile [4] sowie die in die Systeme integrierten nichtoptischen Komponenten, wie Fassungen oder Funktionsbauteile.

Ergänzend hierzu wurde in dieser Arbeit eine Charakterisierung mikrooptischer Bauteile erarbeitet, die in Tab. 2.2 dargestellt ist. Dies ist nötig, um unterschiedliche Forderungen, die makro- und mikrooptische Baugruppen an die Montage und die zugehörige Montageumgebung stellen, vergleichend gegenüberstellen zu können und daraus nötige Entwicklungen für die Mikrooptikmontage abzuleiten.

| Eigenschaft | Linsen (alle Bauformen) | Prismen u.a. Planoptik | Fassungen |
|---|--|--|---|
| Grundform | zylindrisch | prismatisch | unregelmäßig |
| Charakteristische Abmessungen [mm] | >5mm in allen Dimensionen | >5mm in allen Dimensionen | >5mm in allen Dimensionen |
| Werkstoff | Glas, Kristall Polymer | Glas, Polymer | (Glas)keramik, Metall, Polymer |
| Oberflächenbeschaffenheit (aktive Fläche) | ▽▽▽▽ | ▽▽▽▽ | ▽▽ |
| Empfindlichkeit | Schmutz, mechanische Beanspruchungen | Schmutz, mechanische Beanspruchungen | mechanische Beanspruchungen |
| Handhabungsflächen | 1-5 | 1-5 | 1-2 |
| Fügeverfahren | | | |
| Optik – Optik | Stoffschlüssige Verbindung (Kleben ¹ , Ansprengen ²) | Stoffschlüssige Verbindung (Kleben, Ansprengen) | |
| Optik - Fassung | stoffschlüssige bzw. formschlüssige Verbindung ³ | stoffschlüssige bzw. formschlüssige Verbindung | stoffschlüssige bzw. formschlüssige Verbindung |

Tab.2.1: Charakterisierung makrooptischer Komponenten für den Montageprozess

¹ Kleben wird definiert als die Nutzung von Klebstoff (in der Optik häufig fälschlicherweise als Kitt bezeichnet) zur Verbindung der Komponenten, das Eingießen mit Klebstoff, kittartigen Stoffen sowie Gips.

² Das Ansprengen ist ein Haftungsmechanismus zwischen optischen Gläsern, deren Makro- und Mikrogeometrie weitgehend übereinstimmen. Die Makrogeometrie muss erfahrungsgemäß innerhalb 0,5 Newtonringen übereinstimmen, der Traganteil in Abhängigkeit vom Polierzustand bzw. der Mikrogeometrie soll hoch sein. Der Vorgang ist wissenschaftlich wenig untersucht.

³ Hierunter sind die Verbindungsarten Schrauben, Klemmen, Druckring, Feder, Bördeln/Gratfassung zu verstehen.

| Eigenschaft | GRIN-Linsen | Linsen (alle Bauformen) | Prismen u.a. Planoptik | Faserkomponenten | Fassungen | Si-Bauteile, Laserdiode |
|--|------------------------------|------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Grundform | quaderförmig | zylindrisch | prismatisch | biegeschlaff | unregelmäßig | unregelmäßig |
| Charakteristische Abmessungen (in drei Dimensionen) [mm] | l:1-5 b:0,3-2 h:0,3-2 | Ø:0,5-2 l:1-4 | l:0,3-5 b:0,3-5 h:0,5-3 α: n. def. | Ø 0,05-0,8 l:<1m | Ø:1-7 l:2-20 | l:0,5-10 b:0,5-10 h:0,1-2 |
| Aspektverhältnis | 4-9 | 4 - 9 | 4-9 | > 100 | 4 - 9 | 4 - 9 |
| Werkstoff | Glas | Glas, Kristall Polymer | Glas, Polymer | Verbindung Glas/Polymer | (Glas)keramik Metall, Polymer | Halbleiterwerkstoff |
| Masse | >0,5 mg | >3 mg | >3 mg | — | >100 mg | >20 g |
| Oberflächenbeschaffenheit (aktive Fläche) | ▽▽▽▽ | ▽▽▽▽ | ▽▽▽▽ | ▽▽▽▽ | ▽▽ | ▽▽ |
| Beschichtung | möglich | möglich | möglich | möglich | nein | möglich |
| Empfindlichkeit | Schmutz, mech. Beanspruchung | Schmutz, mech. Beanspruchung | Schmutz, mech. Beanspruchung | Schmutz, mech. Beanspruchung | mech. Beanspruchung | Schmutz, mech. Beanspruchung |
| Handhabungsflächen | 1-5 | 1-5 | 1-5 opt. inaktive Bereiche | 1 | 1-2 | 1-3 |
| Fügeverfahren | | | | | | |
| Optik - Optik | Kleben | Kleben | Kleben | Kleben | | |
| Optik - Fassung | Kleben | Kleben | Kleben | Kleben, Löten | Kleben, Löten | Löten, formschl. Verbindung |

Tab.2.2: Charakterisierung mikrooptischer Komponenten für den Montageprozess

Für die Montage optischer Bauteile lassen sich aus diesen Tabellen folgende allgemeine Forderungen ableiten:

- Die Empfindlichkeit der Bauteiloberflächen bzgl. Verschmutzungen und Beschädigungen ist sehr hoch. Dies bedingt besondere Forderungen an die Handhabung der Bauteile, die Bauteilreinigung und die Montageumgebung (zunehmend Reinraumbedingungen). Diese Prozesse müssen gewährleisten, dass die Bauteile während der Montage nicht kontaminiert werden.
- Die Greifprinzipien sind abhängig von den zur Verfügung stehenden Greifflächen und der Bauteilbeschaffenheit.

Diese Forderungen müssen bei der Gestaltung der Montageumgebung, d.h. des Positioniersystems, der benötigten Vorrichtungen und der Handhabungswerkzeuge, berücksichtigt werden. Neben diesen allgemeinen Forderungen weisen makro- und

mikrooptische Komponenten und Systeme Charakteristiken auf, die voneinander differieren und sich unterschiedlich auf die Montage und die Montagefähigkeit der Systeme auswirken.

In der Feinoptik werden zwei Verfahren eingesetzt, Linsensysteme zu montieren,

- unregelmäßige Fügeverfahren zur Positionierung der Bauteile mit Hilfe von Fügevorrichtungen bzw. eingelernten Prozessen (Teach-In-Verfahren)
- geregelte Fügeverfahren bei denen die Einzelkomponenten anhand deren optischer Funktion bzw. anhand äußerer, charakteristischer Merkmale zueinander justiert werden.

Hauptziel eines Fertigungsprozesses ist eine kostengünstige Produktion bei Realisierung der vorgegebenen Qualität. Dies kann durch das *Positionieren* der Bauteile beim Montageprozess gewährleistet werden. Dabei werden die Bauteile durch möglichst einfache und preiswerte Vorrichtungen bzw. Verfahren innerhalb der Genauigkeitsvorgaben zueinander ausgerichtet und montiert. Um dieses Ziel zu realisieren, muss die geforderte Genauigkeit in mindestens einem der Montageschritte gewährleistet werden. D.h. die Genauigkeiten werden entweder durch sehr geringe Fertigungsabweichungen der Systemkomponenten und des Vorrichtungsbaus für den Montageprozess erreicht, oder das für den Fertigungsprozess verwendete Positioniersystem muss bzgl. der geforderten Genauigkeiten ausgelegt sein. Mit zunehmenden Genauigkeitsforderungen sind diesem Verfahren Grenzen gesetzt, da die Genauigkeiten fertigungs- bzw. prozesstechnisch nicht mehr realisiert werden können.

Kann die Genauigkeit durch einen Positioniervorgang nicht erreicht werden, werden insbesondere in der Optik *Justierverfahren* zum Ausgleich Abweichungen im Montageprozess eingesetzt [5,6,7]. Hierbei wird die Position der Bauteile anhand einer definierten Regelgröße [8,9] so verändert, dass die Funktion des Gesamtsystems erfüllt wird. Die Art der Regelgröße ist abhängig vom verwendeten Justierverfahren. In Montageabläufen sind zwei Justierprinzipien gebräuchlich, die sich folgendermaßen unterscheiden:

- Prinzip 1 – direkte Messung: Es erfolgt die direkte Messung der Bauteillage anhand deren *äußerer Kontur* bzw. charakteristischer Bauteilmerkmale (Abb. 2.2). Das Bauteil wird mittels eines Bildverarbeitungssystems bzgl. Position und Orientierung bestimmt, mit vorgegeben Soll-Werten verglichen und die Korrekturdaten zur Bewegung des Bauteils an die optimierte Fügeposition ermittelt.
- Prinzip 2 - indirekte Messung der optischen Funktion: Die optische Funktion wird durch die Justierung einzelner oder mehrerer optisch wirksamer Komponenten mit Freiheitsgrad 1...6 hergestellt und optimiert. Der Zusammenhang von Stellgröße und optischer Funktion ist im allgemeinen nicht linear und hängt erheblich von den Material- und Oberflächeneigenschaften des optischen Bauelements ab. Der notwendige, zielführende Algorithmus einer Optikjustierung gehört zu den innovativen Vorgängen in der Prozessgestaltung. Vorteilhaft ist die Funktionsnähe der Regelung und somit die Erfüllung anspruchsvoller Justiervorgaben. Nachteilig ist der hohe Prozess- bzw. apparative Aufwand.

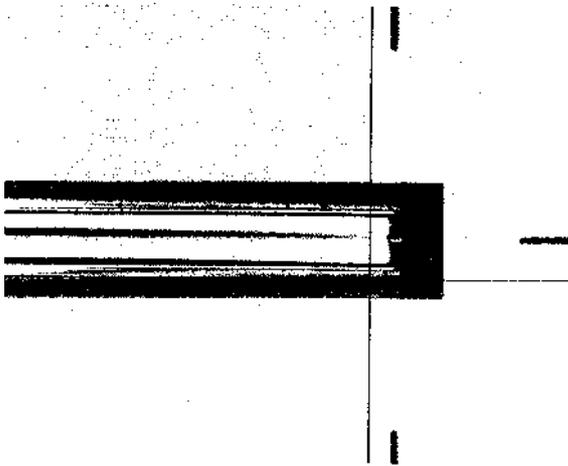


Abb. 2.2 Justierung anhand äußerer Merkmale (Ausrichtung des Faserendes in einer V-Nut nach Justiermarken) [26]

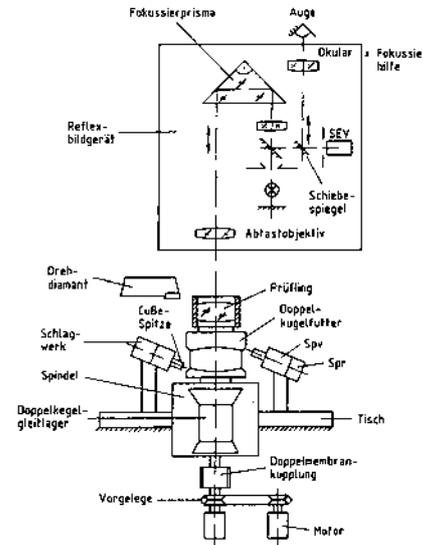


Abb. 2.3 Komplexer Aufbau einer Justieranordnung zur Messung des optischen Signals (Reflexbild) [8]

Jedes der beschriebenen Verfahren weist Vor- und Nachteile hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeiten, der für das Verfahren nötigen Justieranordnung sowie deren Realisierbarkeit bei der Integration in eine automatisierte Montageumgebung auf.

2.2 Montage makrooptischer Systeme

Vergleicht man die Charakterisierung der Systemkomponenten der Tabellen 2.1 und 2.2, leiten sich daraus für den Montageprozess folgende Forderungen und Verfahrensweisen ab:

- Die Bauteile weisen ausreichend große optisch inaktive Flächen auf, an denen diese gehalten und in Fassungen fixiert werden können; das Auftreten von mechanischen Kantenspannungen und daraus resultierende Beschädigungen der Bauteile wird dadurch reduziert.
- Die Forderungen des optischen Systemdesigns an die Fertigungsabweichungen der Bauteile liegen in der Regel in einem Bereich größer 0,01mm [10], welche durch konventionelle Montagetechniken realisiert werden können. Ausnahmen bilden Bauteile der Hochleistungsoptik, die mit höherer Genauigkeit gefertigt werden (Flächenpasse $< \lambda/10$) und anhand von Auswahlpaarungen hohe Systemgenauigkeiten aufweisen.
- Innerhalb des Systemdesigns sind vielfach Linsenfassungen integriert, die für mechanische Fügeverfahren benötigt werden.
- Alternative Fügeverfahren zur mechanischen Fixierung makrooptischer Komponenten untereinander sind das Kitten und Ansprengen der Bauteile.

Beim Aufbau von zentrierten optischen Systemen aus Linsen und Linsenbaugruppen sind während des Fügeprozesses zwei Grundforderungen zu erfüllen:

- Die Krümmungsmittelpunkte der optisch wirksamen sphärischen Flächen und die Achsen beteiligter asphärischer Flächen definieren die optische Achse der einzelnen Komponenten. Die Funktion des optischen Systems erfordert eine hohe Übereinstimmung der einzelnen optischen Achsen der Komponenten, so dass eine Ausrichtung auf eine gemeinsame Bezugsachse notwendig ist. Diese kann als optische Systemachse bezeichnet werden.
- Die Linsen und Linsenbaugruppen sind in axialer Richtung so anzuordnen, dass die vorgeschriebenen Scheitelabstände eingehalten werden.

Als Maß der zulässigen Abweichungen gilt nach DIN 3140-6 und DIN 58170 [11,12] der Kippwinkel der betreffenden optisch wirksamen Fläche. Im Falle des Kittens muss die Kittschicht deshalb keilfrei sowie frei von Verunreinigungen und Blasen sein. Die Dicke der Kittschicht liegt im Bereich $<100\ \mu\text{m}$.

Diese Forderungen lassen sich in einem realen Montageprozess aufgrund von Materialfehlern und Fertigungsabweichungen der zu montierenden Einzelteile nur bedingt einhalten. Darüber hinaus unterliegt der Montageprozess Umgebungseinflüssen, wie Temperaturschwankungen und mechanischen Spannungen, die das Ergebnis folgendermaßen beeinträchtigen:

- Beim Einspannen der Linse werden über die Haltevorrichtung Kräfte in die Linse eingeleitet, welche die optisch wirksamen Flächen deformieren und Spannungsdoppelbrechungen hervorrufen können.
- Von außen eingeleitete mechanische Belastungen können eine Beeinflussung der Lagestabilität der montierten Linsen verursachen und dadurch die Abbildungsqualität des Systems mindern.

Diese Effekte verstärken die grundsätzlich vorhandenen Abbildungsfehler wie Astigmatismus, Koma und Verzeichnungen eines optischen Systems. Zur Vermeidung bzw. Kompensation dieser Montageeinflüsse auf die Optikbaugruppe werden industriell [13] beispielsweise folgende Montageprinzipien eingesetzt (Abb. 2.4). Diese werden in Tabelle 2.3 beispielhaft bzgl. der Übertragbarkeit auf die Montage mikrooptischer Baugruppen miteinander verglichen. In der Optikmontage sind die Begriffe kaum definiert, deshalb wird auf die von Hancke [13] zurückgegriffen. Neben den im folgenden kurz beschriebenen Fassungsvarianten gibt es weitere, in Wissenschaft und Industrie bevorzugte, Lösungen [14].

Die *Passspielmontage* (Abb. 2.4a) ist durch das Passspiel zwischen den Linsen und dem Fassungszyylinder gekennzeichnet. Das vorzugebende Passspiel beeinflusst den Zentrierzustand, die Lagestabilität, die Montagefähigkeit und den Temperatureinsatzbereich des montierten Systems.

Eine wesentliche Verbesserung des Symmetriezustandes und der Lagestabilität der zu fügenden Linsen wird durch das *Elsomontageverfahren* (elastische spielfreie Optikteilemontage Abb. 2.4b) erreicht. Dabei befinden sich zwischen den Linsen und dem Fassungszyylinder elastische Kunststoffrippen, die so dimensioniert sind, dass die Linsen auch bei extremen Umweltbelastungen lagestabil in der zentrierten Position gehalten werden. Die sich durch

Fertigungsabweichungen und Temperatureinfluss ergebende effektive Spaltbreite zwischen Linse und Fassung wird von elastischen Rippen kompensiert.

Bei der *Alfa-Montage* (Abb. 2.4c) wird die Linse durch eine Justierung anhand der optischen Funktion positioniert. Nach dem Positionieren wird der konstruktiv vorgegebene Ringspalt zum Fixieren der Linse mit einem Kunststoff ausgefüllt, der nach dem Aushärten elastisch bleibt. Mit dieser Methode lassen sich optische Systeme herstellen, die extremen Umwelteinflüssen ausgesetzt werden können.

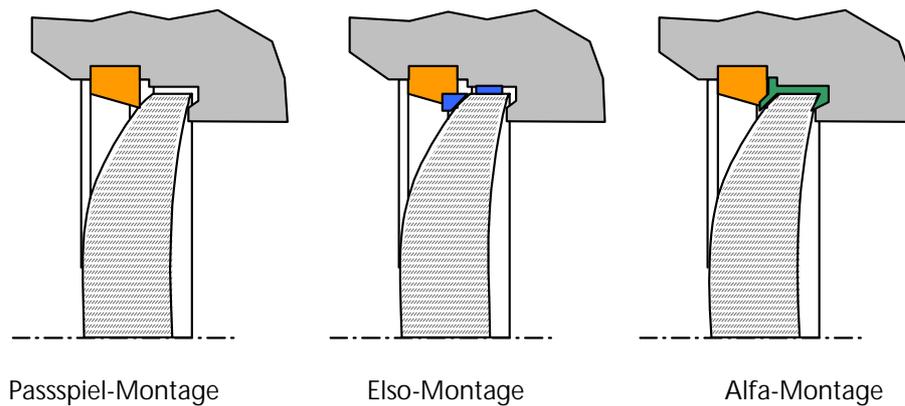


Abb. 2.4 Beispiele für Montageprinzipien der konventionellen Optik

| Charakterisierung | Passspiel-Montage | ELSO-Montage | Alfa-Montage |
|---|--|---|--|
| Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> • minimaler Raumbedarf • einfache Montagetechnik • leichte Demontierbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> • spielfreie und zentrierte Position der optischen Bauteile | <ul style="list-style-type: none"> • hohe optische Qualität der Linsensysteme aufgrund von Justierverfahren • geringer Einfluss von Fertigungsabweichungen der Linsenzentrierung und Zylinderdurchmesser |
| Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> • geforderter Symmetrie-zustand nicht garantiert • Lageinstabilität der montierten Linsen innerhalb des Passspiels | <ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Bauteile erhöhen den Montageaufwand und den Fertigungsaufwand für Vorrichtungen | <ul style="list-style-type: none"> • technisch hoher Aufwand |
| Einsatzpotential in der Mikromontage | <ul style="list-style-type: none"> • Eine Übertragung dieses Montageverfahrens auf die Mikrooptik ist durch das Passspiel, welches zusätzliche geometrische Fehler in das Linsensystem einbringt, ungünstig. • Verfügbare Halteflächen sind in der Mikrooptik zu klein | <ul style="list-style-type: none"> • Die Entwicklung von geeigneten Kunststoff-rippen für die Mikrooptik ist nicht bekannt. | <ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund der Justierung anhand der optischen Funktion ist dieses Verfahren prinzipiell auf die Montage mikrooptischer Systeme übertragbar. |

Tab.2.3: Charakterisierung verschiedener Fassungsprinzipien bzgl. der Einsatzfähigkeit in der Mikromontage

Neben der Halterung von Linsen in Fassungen werden in der industriellen Fertigung zwei weitere Verfahren zur Fixierung optischer Komponenten eingesetzt:

- das Kleben bzw. Kitten [15,16] der optischen Bauelemente bzgl. anderer optischer Elemente, Substrate oder Fassungen
- und das „Ansprengen“ von Bauteilen der Planoptik bzw. der Präzisionsoptik [17], das auf der Verbindung durch reine Molekularkräfte (Adhäsion) ohne zusätzliche Bindemittel beruht. Hierfür müssen die Bauteile sehr genau geschliffene, polierte und gereinigte Oberflächen mit gleichem Radius aufweisen.

Diese Fügeverfahren sind auf automatisierte Mikromontageprozesse nur bedingt übertragbar, da die Voraussetzung von ausreichenden Fügeflächen nicht gegeben ist, die vorhandenen Geräte und Vorrichtungen nicht an die Forderungen der Mikromontage angepasst sind und die Prozesse in der jetzigen Form nicht in einen automatisierten Prozess integrierbar sind.

Innerhalb des Justierprozesses soll nach Definition [68] „das Funktionselement so verändert werden, dass die geforderten Parameter zur Funktionserfüllung des Gesamtsystems erreicht werden.“ Hierzu werden die Bauteile in einer Justieranordnung mit Hilfe von Justiereinheiten bzgl. einer Justierbasis ausgerichtet. Dabei bezeichnet

- die Justieranordnung die Gesamtheit aller zur Durchführung der Justierung notwendigen Komponenten
- die Justiereinheit unter anderem die für die Manipulation der Bauteile benötigten Justier Vorrichtungen
- und die Justierbasis das für die Justierbewegungen feststehende Bezugssystem

Die definierte mechanische Verstellung der Bauteile bzgl. der Justierbasis kann nach folgenden Prinzipien erfolgen:

- durch eine direkte Ausrichtung der Bauteile über Linear- und Drehachsen; Beispiele für manuelle Prozesse sind Mikrometerschrauben sowie Positioniereinheiten für automatisierte Prozesse [18,19]
- durch das Prinzip des „Justierschlagens“ [20]. Hierbei liegt das Bauteil bereits in gefasstem, vorgespanntem Zustand vor und wird mittels definierter Impulsschlagmuster (manuell: Hammer; automatisiert: Vorrichtung) ausgerichtet.

Die Genauigkeiten bei der Justierung makrooptischer Linsensysteme sind von der Empfindlichkeit der eingesetzten Justieranordnung sowie der Justier Vorrichtung zur Ausrichtung der Bauteile abhängig. Beim Einsatz des Justierschlagens werden für die Kopplung von Faser zu Faser und bei Hochleistungsobjektiven Genauigkeiten unter einem Mikrometer erreicht. Nachteilig für alle Verfahren ist der hohe mechanische Aufwand, hohe Kosten und der große Raumbedarf durch die Integration des Justieraufbaus in die Montageumgebung.

2.3 Montage / Justierung mikrooptischer Bauteile

Kapitel 2.2 verdeutlicht, dass der Einsatz von Fassungselementen eine Basistechnologie der Optikmontage darstellt. Tabelle 2.2 zeigt aber, dass mikrooptische Systeme aufgrund der sehr geringen Abmessungen, der geringen Anzahl an Halteflächen und der hohen Bauteilempfindlichkeit nur bedingt aus den vorgestellten Funktionselementen aufgebaut werden können.

Für die Montage mikrooptischer Systeme müssen deshalb angepasste Prinzipien entwickelt werden, um die Bauteile sicher handhaben und ausrichten zu können. Gleichzeitig müssen diese einen Schutz der gefügten Systeme gegenüber Umgebungseinflüssen gewährleisten. Im folgenden werden Montageprinzipien und -systeme vorgestellt, die bereits zur Montage mikrotechnischer und mikrooptischer Baugruppen eingesetzt werden.

Manuelle Montage:

Der derzeitige Stand der Technik in der Herstellung mikrooptischer Systeme wird bis auf wenige Ausnahmen durch manuelle Montageprozesse repräsentiert und ist wesentlich durch die geringen Stückzahlen bei der Kleinserienfertigung optischer Systeme bedingt. Dies gilt sowohl für die optische Industrie als auch für die institutionelle Forschung, die sich mit der Entwicklung und dem Aufbau optischer Systeme beschäftigt. Beispiele hierfür sind der Aufbau von Dioden- oder Festkörperlaser-Systemen und die Fertigung von Endoskopen.

Die manuelle Montage kann in vielen Fällen ökonomisch sinnvoll sein, beinhaltet aber Einschränkungen bzgl. der Forderungen in der Mikrotechnik:

- Die vom optischen Design geforderte Fügegenauigkeit und insbesondere die Reproduzierbarkeit beim Aufbau der Systeme kann durch eine manuelle Fertigung nur bedingt gewährleistet werden.
- Die Justierung der Komponenten in diesen Genauigkeiten erfordert auch bei der manuellen Montage einen hohen gerätetechnischen Aufwand. In Verbindung mit der geringen Produktivität ist dieser Prozess ebenfalls kostenintensiv.

Automatisierte Montage:

Ein Ziel bei der Fertigung von Mikrosystemen ist daher die Entwicklung automatisierter Montageprozesse. Die Konzeption und der Aufbau dieser Montagesysteme sind abhängig von der Stückzahl der zu fertigenden Mikrosysteme.

Eine mögliche Konzeption eines solchen Montagesystems ist der Aufbau komplexer Sondermaschinen. Dieser Ansatz wird von Großkonzernen der Halbleiterindustrie sowie der Sensor- und Kommunikationstechnik [21,22] bevorzugt, da dort die Produktion eines preiswerten Systems in hohen Stückzahlen im Vordergrund steht. Die Kosten solcher Maschinen liegen im Bereich von 0,5 - 2 Mio. DM. Beispiele von Mikrosystemen, die in hohen Stückzahlen gefertigt werden, sind:

- Druck- und Drehratensensoren für die Automobilindustrie [21], die auf Basis mikromechanischer Fertigungsverfahren hergestellt werden.

- Bidirektionale Sende- und Empfangsmodule für die Telekommunikationstechnik [22]. In diese Sonderentwicklungen wurde jeweils eine Justieranordnung integriert, um die Bauteile mikrometergenau auszurichten.
- Optische Systeme für die Endoskoptechnik, die mit Hilfe einer hochspezialisierten Maschine zur Montage starrer Endoskope gefertigt werden [23].

Im Gegensatz zu dieser Systemkonzeption erfordern Losgrößen von kleinen und mittleren Stückzahlen, die insbesondere in der optischen Industrie auftreten, ein Konzept mit einer hohen Flexibilität bzgl. der wechselnden Aufgaben. Dieses Konzept beinhaltet den Aufbau eines möglichst modularen Montagesystems und wird weltweit von der mittelständischen Industrie in Kombination mit institutionellen Forschungseinrichtungen verfolgt. Die Ansätze zur Umsetzung dieses Konzepts unterscheiden sich dabei folgendermaßen:

- Innerhalb des Förderschwerpunktes Mikrosystemtechnik (MST) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) [24,25,26,27,28,29] werden Lösungen erarbeitet, die auf der Integration und Optimierung modular aufgebauter Positioniersysteme zu einem Montagesystem basieren, das für die hybride Mikromontage geeignet ist. Die Umsetzung dieser Systeme in die industrielle Serienfertigung wurde bisher nur bedingt realisiert.
- Ähnliche Konzepte zum Aufbau einer modularen, an den Maschinenbau angelehnten Sondermaschine werden an der EPF Lausanne [30,31] verfolgt sowie von einer Gruppe um Prof. Hollis in Pittsburgh, die den Prozess der Mikromontage in eine flexible Fabrikationsstraße integrieren will [32] (Abb. 2.5).
- Neben diesen Konzepten existieren alternative Lösungen aus dem Bereich der Si-Technik. Einrichtungen wie Berkeley, CSEM, u.a. versuchen, mikrooptische Komponenten mit Elementen der Si-Mikromechanik aufzubauen (Abb. 2.6) und dadurch einen Montageprozess mit zusätzlichen Abweichungen zu vermeiden [33]. Dieser Ansatz ist für Fresnel-Linsen, Ablenkspiegel oder ähnliche Bauelemente erfolgversprechend, kann aber nicht die Forderung nach allen dreidimensionalen Komponenten mikrooptischer Systeme erfüllen.

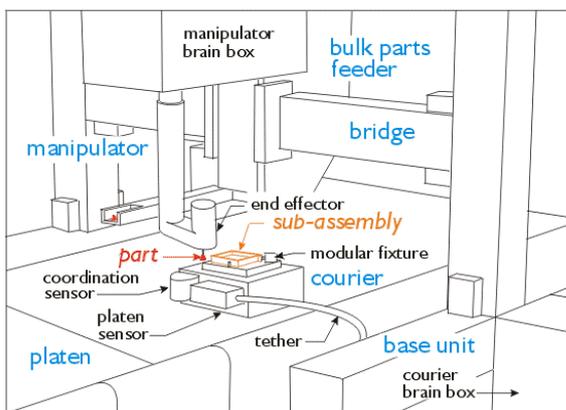


Abb. 2.5 Flexible Fabrikationslinie [32]

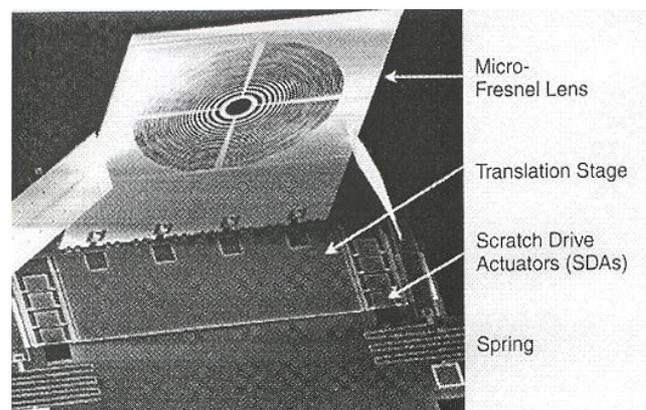


Abb. 2.6 Optisches Bauelement in Si-Mikromechanik [33]

- Japanische Konzepte der Universitäten Tokio und Nagoya [34] versuchen die Strukturen starrer Montagesysteme durch flexible, autarke Miniroboter für Handhabungs- und Positionieraufgaben der Mikromontage zu ersetzen. Die Umsetzung dieser Entwicklungen in die industrielle Fertigung ist auch hier noch nicht bekannt.

Am Markt angebotene Mikromontagesysteme orientieren sich am ersten Lösungsansatz und bieten Positioniersysteme an, die als Sondermaschine aus mehreren Linear- und Rotationsachsen aufgebaut sind [35,36].

Die meisten dieser Systementwicklungen sind hinsichtlich der Kostendeckung auf die Produktion hoher Stückzahlen ausgelegt und deshalb auf ein Produkt mit hohen Durchsatzraten zugeschnitten. Besonders in der Optik und Mikrooptik treten häufig Losgrößen von kleinen bis mittleren Stückzahlen auf. Das Ziel für die ökonomische Integration hochgenauer Montagesysteme in den Produktionsprozess liegt deshalb im Aufbau modularer Montagesysteme, auf denen der Nutzer mit möglichst geringem Rüstaufwand in der Lage ist, mehrere Produkte zu fertigen.

2.4 Montageumgebung für automatisierte Prozesse

Der Aufbau eines modularen Montagesystems für mikrooptische Systeme beinhaltet verschiedene Systemkomponenten, die folgenden Stand der Technik aufweisen.

2.4.1 Positioniersystem

Zur Erfüllung des Toleranzregimes eines Montageprozesses sollte die Positioniergenauigkeit des Positioniersystems eine Größenordnung besser als die zulässigen Abweichungen der einzelnen Montageschritte sein. Für die Aufgaben der Mikromontage ergibt sich daraus eine geforderte absolute Positioniergenauigkeit von 0,1 bis 10µm. Kommerziell erhältliche Positioniersysteme in dem geforderten Genauigkeitsbereich beschränken sich in der Regel auf Linear- und Drehachsen, die nach Kundenwunsch in einer in der Mikrosystemtechnik einsetzbaren Sondermaschine (Abb. 2.7) integriert werden [s. 24-36]. Der Vorteil dieses Systemaufbaus liegt in der hohen Modularität des Systems und den relativ geringen Kosten durch den Einsatz von Standardachsen. Eine zweite Variante von Positioniersystemen für die Montagetechnik stellen Robotersysteme dar. Bezogen auf die geforderten Genauigkeitsbereiche existieren auf dem Markt aber nur wenige Hersteller, die adäquate Robotersysteme anbieten [37,38]. Ein Vorteil beim Einsatz von Robotersystemen ist der relativ große und flexibel gestaltbare Arbeitsbereich (Abb. 2.8) und die Verfügbarkeit von bis zu sechs Freiheitsgraden, den ein aus mehreren Linearachsen aufgebautes System nur mit hohem Integrationsaufwand bieten kann.

Nachteil beider Systeme sind die hohen Kosten beim Einsatz hochgenauer Achsen. Ein dritter Systemansatz setzt deshalb preisgünstige Achsen ein und gleicht deren Ungenauigkeiten durch eine zusätzliche Feinpositionierung (z.B. Piezostelleinheiten) aus [19].

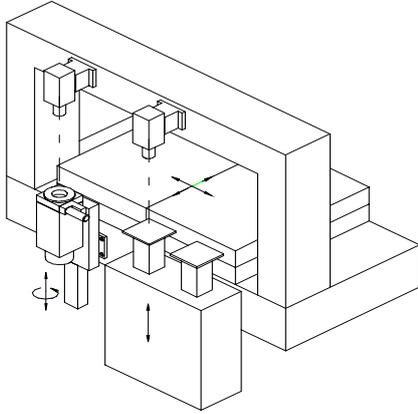


Abb. 2.7 Aus Linear- und Drehachsen aufgebautes Positioniersystem [24]

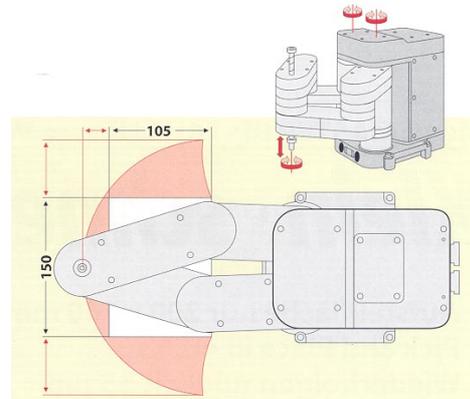


Abb. 2.8 Arbeits- und Schwenkbereich eines Robotersystems [37]

2.4.2 Peripherie

Aufbauend auf das Grundgerüst „Positioniersystem“ besteht das Gesamtmontagesystem allgemein aus zusätzlichen peripheren Einheiten des Montageprozesses, die nach Abb. 2.1 die Bauteilzuführung, die Handhabung, die Bauteilhalterung und die Prozessinspektion in die Montageumgebung integrieren.

2.4.2.1 Magazinierung

Ein Teilprozess der automatisierten Montage ist die Zuführung der Bauteile an den Fügeort. Optische Bauteile sind allgemein sehr empfindlich gegenüber Verschmutzungen und mechanischen Beschädigungen (Tab. 2.1) und werden häufig in Palettenmagazinen angeliefert, in denen diese einzeln in Formnestern liegen. Diese Form der Teilebereitstellung ist aufgrund der fehlenden Definition von Position und Orientierung für eine automatisierte Montage ungeeignet.

Für die Zuführung optischer Bauteile bei (teil-) automatisierten Montageprozessen werden daher Magazinaufnahmen gefordert, die

- eine definierte, lagegenaue Aufnahmeposition des Bauteils für den Greifprozess bei geringem Fertigungsaufwand gewährleisten,
- eine Beschädigung oder eine Verschmutzung der optisch aktiven Bereiche vermeiden und
- ein einfaches Bestücken des Magazins ermöglichen (manuell).

Eine allgemeingültige Lösung zur Magazinierung von Bauteilen der Mikrosystemtechnik und insbesondere der Mikrooptik gibt es bisher nicht. Bei Bauteilen der Si-, LIGA (**L**ithographie-**G**alvanik-**A**bformung) bzw. einfacher Abformtechnik wird versucht eine Magazinierung von Einzelteilen zu umgehen, indem der Montageprozess im Batch-Prozess, d.h. mit dem nicht vereinzelt Wafer, durchgeführt wird. Dieser Ansatz ist für viele Aufgaben schwierig umzusetzen und für hybride Bauteile der Mikrooptik nicht geeignet. Hier existiert ein Grundansatz, der auf der Herstellung eines geometrieangepassten Magazins mit Formnestern beruht (Abb. 2.9) [39]. Diese Art Magazin muss für jedes Bauteil neu gestaltet werden und genügt durch die "quasi-lose" Lagerung der Bauteile Prozessschritten wie der Bauteilreinigung nicht. Zur Vereinheitlichung dieses Ansatzes für eine Vielzahl von Bauteilen und einer Fixierung der Bauteile im Magazin wurde eine DIN-Norm [40,41] erarbeitet. Das hieraus hervorgehende Magazin beinhaltet einen standardisierten Trägerrahmen (Abb. 2.10) mit Abmessungen eines Wafers, um die Übertragbarkeit auf Anlagen der Mikroelektronik zu gewährleisten. In diesen Grundkörper können die bisher verwendeten Formnester eingearbeitet werden. Zur Fixierung der Bauteile besteht die Möglichkeit der Verwendung von Formeinsätzen, die angepasste Haltemechanismen aufweisen [42].

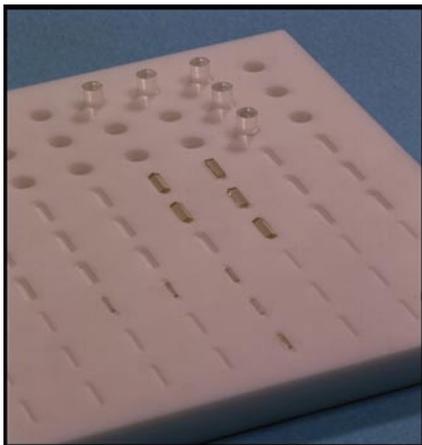


Abb. 2.9 Magazin mit formangepassten Aufnahmen [39]

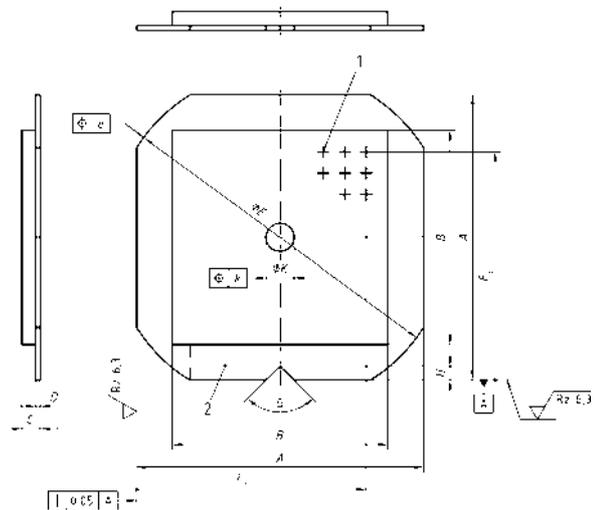


Abb. 2.10 Werkstückträger für mikrosystemtechnische Bauteile nach DIN 32561 [40]

2.4.2.2 Werkzeugwechsellvorrichtung

Wesentliche Teilprozesse der Montage sind die Handhabung der verschiedenen Systemkomponenten sowie die Dosierung von optischen Klebstoffen für den Fügeprozess. Um diese Prozesse ökonomisch in die Montageumgebung integrieren zu können, müssen die einzelnen Werkzeuge automatisiert und mit den geforderten Genauigkeiten auswechselbar sein.

In der konventionellen Montage- und Messtechnik gibt es hierfür bewährte Prinzipien, die sich auf die Mikromontage übertragen lassen. Ein Prinzip ist der Einsatz von Werkzeugrevolvern. Dieser kann für die geforderte Aufgabe mit den benötigten Werkzeugen bestückt werden und

bei wechselnder Aufgabe über Anschläge, Führungen sowie einen Justierschritt schnell und sehr genau gewechselt werden [24,27]. Zur Realisierung der Drehbewegung werden diese Werkzeugköpfe in der Regel mit einer Drehachse des verwendeten Positioniersystems gekoppelt. Ein anderes Prinzip ist der Einsatz eines Werkzeugwechselsystems, welches das für den jeweiligen Montageschritt benötigte Werkzeug automatisch aus einem Werkzeugmagazin einwechselt. Dieses Prinzip wird in der Fertigungs-, der Montagetechnik und bei Messwerkzeugen von Koordinatenmessmaschinen eingesetzt [43,44]. Gehalten werden die Werkzeuge bei diesem Prinzip über definierte Werkzeugaufnahmen und elektromagnetische bzw. mechanische Haltemechanismen.

Im Bereich der Mikromontage werden vielfach Werkzeuge eingesetzt, die zusätzliche Aktorik bzw. Sensorik zur Prozesskontrolle beinhalten. Diese Werkzeuge benötigen definierte Schnittstellen der Medienzufuhr, die aufgrund fehlender Anschlussnormen nicht automatisch gewechselt werden können. Aus diesem Grund sind für den Bereich der Mikromontage eingerichtete Werkzeugrevolversysteme bzw. lineare Werkzeugachsen zu bevorzugen.

2.4.2.3 Greifwerkzeuge

Zur Handhabung mikrooptischer Bauteile im Montageprozess werden Greifer mit besonderen Eigenschaften benötigt. Diese sind zur Zeit nur begrenzt am Markt verfügbar. Bei der Entwicklung geeigneter Greifwerkzeuge muss folgendes Anforderungsprofil berücksichtigt werden [45,46]:

- Aufnahme- und Ablagegenauigkeiten im μm - Bereich
- Vermeidung von Beschädigungen oder Verunreinigungen der optisch aktiven Bereiche
- Minimierung der Adhäsion zwischen Bauteil und Greifer
- Beobachtbarkeit der Bauteile im Greifer während des Montageprozesses
- geringer Kostenaufwand
- Industrietauglichkeit und Langzeitstabilität

Der Universalgreifer für die Mikromontage, der diese Forderungen für eine Vielzahl verschiedener Bauteile erfüllt, ist kommerziell nicht erhältlich. Entwicklungen namhafter Greiferhersteller für die automatisierte Mikromontage sind aufgrund der zu geringen Marktnachfrage nicht bekannt. Dagegen gibt es viele Untersuchungen von Hochschulen, Forschungseinrichtungen und mittelständischen Greiferherstellern, die verschiedene Greif-prinzipien entwickeln und hinsichtlich ihrer industriellen Einsatzfähigkeit prüfen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen weisen vier geeignete Greifprinzipien für die Mikromontage aus:

- Pneumatische Greifer,
 - Ansaugen der Systemkomponenten auf Vakuumbasis. Ausführungen mit/ohne Anpassung der Greifgeometrie an die Kontur der Bauteile (Abb. 2.11) [28,47,48]
 - Bewegung eines mechanischen Aufbaus mittels Druckluft zur Realisierung des Greifprozesses [49,50].

- Piezoelektrische Greifer (Abb. 2.12), die durch den Einsatz von Biegeelementen oder Piezostapeln eine Bauteilaufnahme ermöglichen [51,52]
- Greifstrukturen aus Formgedächtnislegierungen (Abb. 2.13), deren Greifposition auf eingelernten Materialzuständen beruht, die durch ein definiertes Temperaturregime ausgelöst werden [53,54].
- Adhäsivgreifer, die das zu greifende Bauteil über die Adhäsivkräfte eines flüssigen Mediums aufnehmen. Die Ablage des Bauteils erfolgt über eine definierte Verdunstung der Flüssigkeit [55,56].

Bezogen auf die Forderungen in der Montage mikrooptischer Systeme ergeben sich zwischen diesen Greifprinzipien Unterschiede hinsichtlich deren Eignung für den industriellen Einsatz.

- Bei Adhäsivgreifern besteht die Gefahr, dass bei der Verdunstung der Flüssigkeit Rückstände auf dem Bauteil zurückbleiben, welche die optische Funktion beeinträchtigen.
- Formgedächtnisgreifer haben bedingt durch deren Temperaturverhalten hohe Zykluszeiten (>5s), die nur bedingt für den Einsatz in automatisierten Prozessen geeignet sind.
- Geeigneter für den industriellen Einsatz erscheinen aufgrund der größeren Robustheit pneumatische Greifer und Greifstrukturen mit integrierten Piezostapeln.

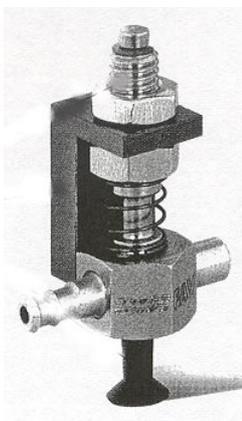


Abb. 2.11 Vakuumgreifer [49]

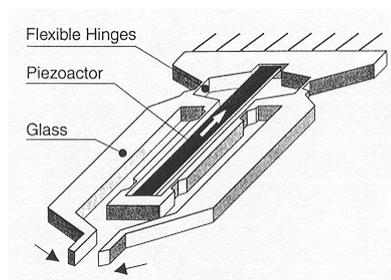


Abb. 2.12 piezoelektrischer Greifer [52]

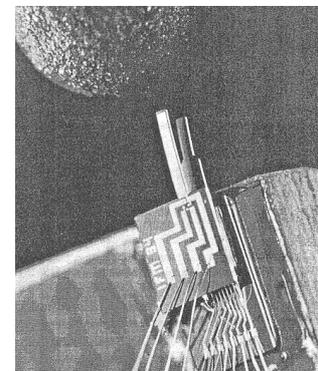


Abb. 2.13 Formgedächtnisgreifer [53]

2.4.2.4 Justierverfahren

Der Aufbau von Justieranordnungen für den Einsatz in der automatisierten Montage mikrooptischer Systeme ist aufgrund der großen Abmessungen der erforderlichen Justiereinheiten und -vorrichtungen nur schwer zu realisieren und in die Montageumgebung zu integrieren.

Die bisher in Montageprozessen eingesetzten Verfahren zur Justierung von Baugruppen lassen sich nach Kap. 2.1 in zwei Verfahren einteilen, die als Regelgröße geometrische Merkmale oder die optische Funktion verwenden. Im Montageablauf werden diese Verfahren folgendermaßen eingesetzt:

- Zur Ausrichtung der Fügekomponenten anhand äußerer Merkmale werden zweidimensionale Bildverarbeitungssysteme eingesetzt. Dabei werden die benötigten Justierparameter über den Vergleich der Messaufnahme mit einer Musterstruktur berechnet [25,57,58,59]. Die Art dieser Musterstruktur ist abhängig von der Fügekomponente. Für die Ausrichtung ganzer Nutzen (z.B. Filterstrukturen, Redirektoren) werden in Anlehnung an die Mikroelektronik Justiermarken verwendet (Abb. 2.14). Bei Einzelkomponenten erfolgt die Justierung anhand von Struktur- bzw. Konturmerkmalen der Bauteile (Abb. 2.15). Die Berechnung der Fügeposition in der z-Koordinate kann beispielsweise über das Signal einer Kraftsensorik ermittelt werden. Eine dreidimensionale Messung des Fügevorganges ist in den geforderten Genauigkeiten nicht industriell erhältlich.
- Die Justierung des optischen Systems anhand dessen Funktion wird realisiert, indem ein Sensor in den Strahlengang integriert wird, der die Intensitätsverteilung bzw. die Abbildungsgüte des Systems während des Justiervorganges ermittelt. Mittels dieser Anordnung wird ein Maximum der Regelgröße bestimmt, das gleichzeitig die optimale Fügeposition darstellt. Der bei diesem Verfahren eingesetzte Sensor kann ein CCD-Empfänger eines Bildverarbeitungssystems oder ein Leistungsdetektor sein [60]. Die überwiegende Zahl solcher Justieranordnungen sind manuelle Aufbauten für die Produktion. Automatisierte Prozesse in der Mikrooptik sind nur für wenige Systeme wie z.B. die Faser-Faser-Kopplung oder die Justierung von Verzweigerbaugruppen bekannt (Abb. 2.16) [61]. Standardisierte Justieranordnungen für die automatisierte Montage komplexer mikrooptischer Systeme sind dagegen nicht vorhanden.

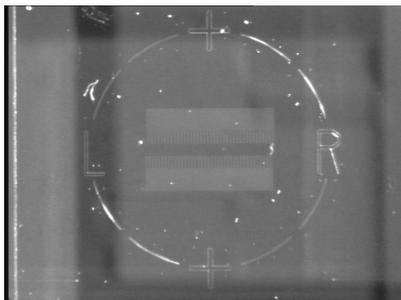


Abb. 2.14 Justiermarke zur Ausrichtung bzgl. einer zylindrischen Linse

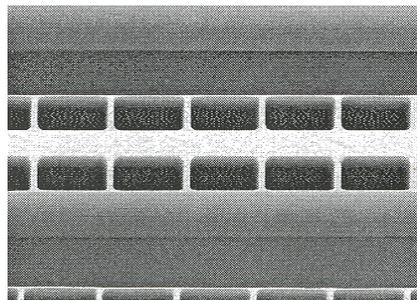


Abb. 2.15 hochgenaue LIGA-Strukturen als Justiermerkmal

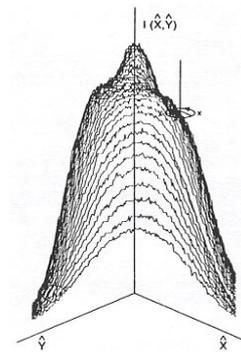


Abb. 2.16 Intensitätsmessung zur Positions-ermittlung bei der Justierung [61]

Als Alternative zur Justierung mikrooptischer Komponenten wurden am Fraunhofer IOF Untersuchungen durchgeführt, mikrooptische Bauteile über geeignete Fügevorrichtungen so genau zu positionieren und auszurichten, dass deren aufwendige Justierung entfällt [62]. Diese Vorrichtungen werden bisher in der manuellen Montage eingesetzt, können in modifizierter Form aber möglicherweise auch in einen automatisierten Montageprozess integriert werden. Abb. 2.18 zeigt eine Fügevorrichtung zur Montage einer Prismenbaugruppe einer Endoskop-Frontoptik bestehend aus drei Einzelprismen. Hierfür sind in die Vorrichtung definierte Geometrien und Anschlagstrukturen eingearbeitet, um die Bauteile entsprechend des optischen Designs positionieren zu können.

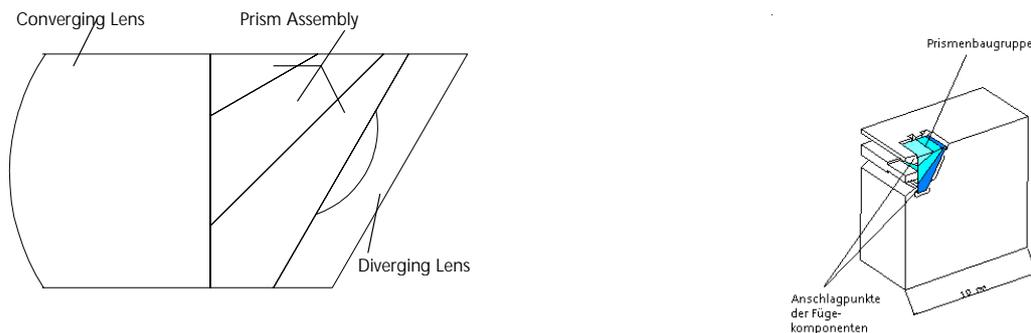


Abb. 2.18 Hilfsvorrichtung für die manuelle Mikrooptikmontage einer Endoskop-Frontoptik [62]

2.5 Zusammenfassung zum Stand der Technik

Der aufgeführte Stand der Technik zeigt deutlich, dass im Bereich der automatisierten Montage mikrooptischer Systeme großer Forschungsbedarf besteht, um diese Prozesse in eine industrielle Fertigung überführen zu können. Dies gilt sowohl für alle Einzelschritte des Montageprozesses nach Abb. 2.1, als auch für die Umsetzung in einen automatisierten Gesamtprozess.

Aufbauend auf einem geeigneten Positioniersystem und Konzepten zum Aufbau einer angepassten Montageumgebung werden innerhalb dieser Arbeit Verfahren zur Positionierung und Justierung mikrooptischer Bauteile und Systeme entwickelt, in automatisierte Montageprozesse integriert und anhand von Genauigkeitsuntersuchungen deren Einsatzbereiche innerhalb der Aufgaben der Mikromontage bestimmt.

3 Aufstellung von Lösungen für die automatisierte Montage mikrooptischer Systeme

Basierend auf der Auswertung des Stands der Technik lassen sich zwei grundsätzliche Lösungsvarianten zur Montage ableiten, die in dieser Arbeit hinsichtlich ihrer Eignung in Prozessen der automatisierten Mikrooptikmontage untersucht werden.

- Variante 1 beinhaltet den Einsatz von Fügevorrichtungen bei der automatisierten Mikromontage, die eine genaue Positionierung der Fügekomponenten durch definierte Geometrien und Hilfsmechanismen ermöglicht. Dieser Ansatz soll die Möglichkeiten eines kostengünstigen Montageverfahrens bzgl. der erreichbaren Fügegenauigkeiten aufzeigen und zum Vergleich mit gerätetechnisch aufwendigeren Verfahren dienen.
- Variante 2 verfolgt den Ansatz, Justieranordnungen in die Montageumgebung zu integrieren, um über die Auswertung einer definierten Regelgröße die geforderte Fügegenauigkeit zu erreichen. Hinsichtlich der Regelgrößen lassen sich die Justieranordnungen unterscheiden nach
 - einer Justierung der Systemkomponenten anhand charakteristischer äußerer Merkmale wie der Geometrie, der Kontur und aufgebrachtener Justierstrukturen und
 - einer Justierung anhand der optischen Funktion des mikrooptischen Systems.

3.1 Positionierung mit Hilfe von Fügevorrichtungen

Das Wirkprinzip dieser Vorrichtungen beruht auf der formschlüssigen Aufnahme der Systemkomponenten über die Integration einer Negativform mit geeigneten Anschlägen. Durch die Ausnutzung der Schwerkraft und einer Anpresskraft durch den Monteur wird auf diese Weise ein reproduzierbarer Fügevorgang gewährleistet. Die Eigenschaften dieses Montageverfahrens lassen sich anhand des Beispiels aus Abb. 2.18 folgendermaßen beschreiben:

- Die mit diesem Verfahren erzielbaren Genauigkeiten pro Fügeschritt liegen im Bereich weniger Mikrometer bzgl. der Lageabweichung und $<1^\circ$ bzgl. der Winkelverdrehung. Diese Genauigkeiten sind insbesondere abhängig von der Komplexität und den Abmessungen der Baugruppe bzw. Negativform und den Fertigungsabweichungen der Bauteile sowie der Vorrichtung.
- Die Nachteile, die sich beim Einsatz der Vorrichtung aus Abb. 2.18 ergeben, liegen insbesondere in der AVT. Während des Fügevorganges werden die Bauteile miteinander verklebt. Der Krafteintrag durch den Monteur gewährleistet aber keine ausreichende Positions- und Winkelgenauigkeit, so dass sich Winkelfehler in der Klebefuge ergeben. Diese wirken sich negativ auf die optische Funktion der Baugruppe aus. Zusätzlich besteht während des Fügevorganges die Gefahr, die Vorrichtung mit überlaufendem

Klebstoff zu verschmutzen. Dies kann durch das Aufbringen des Klebstoffs mit einem definierten Volumen und einer definierten Fügekraft vermieden werden.

Aus diesen Merkmalen ergeben sich folgende Forderungen zur Verbesserung des Verfahrens und daraus resultierend für die Einsetzbarkeit des Verfahrens innerhalb automatisierter Mikromontageprozesse:

- Entwicklung von Fügevorrichtungen mit definierten Negativformen und Anschlägen, angepasst an die jeweilige Aufgabe unter Verwendung möglichst einfacher Geometrien. Hieraus folgt eine Vereinfachung der Fertigungsprozesse und eine Kostenreduktion.
- Konstruktive Integration von Klebstofffallen, um eine Verschmutzung der Vorrichtung durch überlaufenden Klebstoff zu vermeiden.
- Gewährleistung der Zugänglichkeit der Montagewerkzeuge (Greifer, Dosiergerät) in den Montageraum.
- Integration geeigneter Prinzipien zur Positionsunterstützung während des Montageprozesses, um eine definierte Lage und Orientierung der Fügekomponenten zu realisieren.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, anhand dieses Anforderungsprofils geeignete Aufbauprinzipien für Fügevorrichtungen zu entwickeln, die in automatisierte Montageprozesse der Mikrooptik integriert werden können. Aufbauend auf dem Stand der Technik sollen so auch für komplexe mikrooptische Baugruppen Fügegenauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer erreicht werden und die Fügeergebnisse der Untersuchungen zur Beurteilung der Eignung des Verfahrens für die automatisierte Mikromontage genutzt werden.

3.2 Justierung anhand charakteristischer Konturmerkmale

Beim Einsatz von Montageverfahren, die keine Regelung des Fügevorganges aufweisen, tritt eine direkte Abhängigkeit des Ergebnisses von der gesamten Toleranzkette des Prozesses auf. Will man diese Abhängigkeit vermeiden bzw. größere Fertigungsabweichungen der Bauteile zulassen, muss eine Justieranordnung in den Montageprozess integriert werden, die die Fügeposition anhand einer definierten Regelgröße bestimmen und über Justiereinheiten nachregeln kann.

Eine mögliche Justieranordnung stellt die Justierung der Bauteile anhand charakteristischer äußerer Merkmale (Geometrien, Strukturen) dar. Hierfür können verschiedene Messverfahren (antastend, visuell, kapazitiv, induktiv) eingesetzt werden. Aufgrund der räumlichen Begrenzung der Montageumgebung und der hohen Genauigkeitsforderungen eignen sich visuelle Messverfahren für Aufgaben der Mikromontage sehr gut. Bei diesem Verfahren werden die Justiermerkmale der Fügeteile mittels eines Bildverarbeitungssystems vermessen und so der Bezug zu einer vorgegebenen Fügeposition hergestellt. Die daraus resultierende Differenz zwischen Soll- und Ist-Position innerhalb des Raumkoordinatensystems dient der Positionsregelung beim Montageprozess. Die Forderungen dieses Verfahrens an die Montageumgebung sind:

- Detektierbarkeit der Bauteile bzw. der zu bestimmenden Bauteilmerkmale während des Montagevorganges.

- Aufgabenangepasste Beleuchtung der Bauteile zur Realisierung eines ausreichenden Kontrasts, um definierte Kantenübergänge bzw. die geforderte Messgenauigkeit zu gewährleisten.
- Geeignete Justiereinheiten zur positionsgenauen Verstellung der Fügekomponenten während des Justiervorganges.

Stand der Technik industrieller Bildverarbeitungssysteme ist der Einsatz zweidimensional arbeitender Systeme. Informationen über die dritte Dimension, z.B. den Aufsetzpunkt in Fügerichtung, werden durch zusätzliche Sensoren wie Lichtschranken oder Kraftsensoren gewonnen, die in den Montageaufbau integriert und mit der Auswertung gekoppelt werden. Bei Mikromontageprozessen ist dieser Aufbau aufgrund der räumlichen Begrenzung der Montageumgebung nur bedingt einsetzbar. Außerdem können die Freiheitsgrade des Bauteils im Montageraum nur mit großem Aufwand über Sensoren erfasst werden.

Der Neuheitsgrad dieses Ansatzes, der innerhalb dieser Arbeit für die Montage mikrotechnischer Komponenten untersucht wird, ist der Einsatz eines dreidimensionalen Bildverarbeitungssystems, das die Forderungen der Mikromontage erfüllt. Mit Hilfe dieses Systems kann eine Justieranordnung aufgebaut werden, die es ermöglicht, die Bauteile bzgl. aller Freiheitsgrade im Raum zu bestimmen und über geeignete Justiereinheiten hinsichtlich einer optimalen Fügeposition zu positionieren. Die Ergebnisse, die sich aus den Untersuchungen zu diesem Justierverfahren ableiten lassen, sind zudem nicht auf den Einsatzbereich der Mikrooptikmontage beschränkt sondern können auf die Montage anderer mikrotechnischer Systeme übertragen werden.

3.3 Justierung anhand der optischen Funktion

Das gebräuchlichste Prinzip zur Justierung optischer und mikrooptischer Baugruppen ist die Justierung der Komponenten anhand der optischen Funktion des Systems. Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber anderen Prinzipien ist die Unabhängigkeit des Ergebnisses von der Geometrie und den Fertigungsabweichungen der Bauteile. Die Regelgröße, die bei einer solchen Justieranordnung verwendet wird, ist die maximale Strahlintensität bzw. die Abbildungsqualität des Systems. Diese wird über einen geeigneten Empfänger erfasst und die Systemkomponenten anhand dieser Informationen über angepasste Justiereinheiten zueinander ausgerichtet.

Innerhalb automatisierter Montageprozesse weist dieses Verfahren folgende Probleme auf:

- Der Aufbau der erforderlichen Justiereinheiten kann sehr komplex sein (bis zu sechs Freiheitsgrade pro Bauteil), um alle Abweichungen kompensieren zu können.
- Der zur Verfügung stehende Raum in der Montageumgebung ist durch die Miniaturisierung der Bauteile, den Eingriff von Montagewerkzeugen u.ä. sehr eingeschränkt. Dies hat Auswirkungen auf die Einbaumöglichkeiten
 - der benötigten Justiereinheiten
 - und des Empfängermoduls zur Detektion der Prozessregelgröße.

- Die miniaturisierten Abmessungen der Bauteile und deren geringe Abstände innerhalb des mikrooptischen Systems erlauben häufig keinen realen Funktionsaufbau im Gesamtmontageprozess. Dies bedeutet, dass das Gesamtsystem in Unterbaugruppen unterteilt werden muss, die losgelöst von der Gesamtfunktion innerhalb einer Hilfsjustieranordnung zueinander ausgerichtet werden.

Ziel dieser Untersuchungen zur Justierung von mikrooptischen Baugruppen anhand ihrer optischen Funktion ist, qualitative und quantitative Aussagen über die Automatisierbarkeit von komplexen Montageprozessen zu erhalten. Dies gilt insbesondere für die erreichbaren Fügegenauigkeiten von Baugruppen, die nicht anhand der Funktionsregelgröße sondern über eine Hilfsregelgröße justiert werden.

Alle drei vorgestellten Lösungsvarianten beinhalten Vor- und Nachteile hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten in der automatisierten Montage mikrooptischer Systeme. Zur qualitativen Beschreibung dieser Verfahrenscharakteristika werden bzgl. eines Demonstratorsystems für jedes der drei Verfahren je ein Experimentalaufbau entwickelt und dessen Integrationsfähigkeit in die Montageumgebung analysiert. Abgeleitet aus dem Vergleich zwischen einer theoretischen Fehlerabschätzung und den experimentell ermittelten Montageergebnissen werden Aussagen über die erreichbaren Fügegenauigkeiten der einzelnen Verfahren, deren grundsätzliche Integrationsfähigkeit in die Montageumgebung und daraus resultierend über mögliche Einsatzbereiche der Verfahren in der Mikromontage getroffen.

4 Charakterisierung des Demonstratorsystems

Die Auswahl des Demonstratorsystems für die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit zur automatisierten Montage mikrooptischer Systeme orientierte sich an zwei Kriterien:

- Integration unterschiedlicher mikrooptischer Komponenten in das System zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Aufgaben
- Notwendigkeit der Untersuchungen zur Prozessentwicklung für mikrooptische Produkte wachstumsträchtiger Marktbereiche, bei denen (teil-) automatisierte Verfahren aufgrund der geforderten Fügegenauigkeiten, deren Reproduzierbarkeit und möglicher Stückzahlen größer 10.000 Stück/Jahr benötigt werden.

Das Demonstratorsystem (Abb.4.1) stellt eine Strahlformungsoptik dar, deren physikalische Funktion die Abbildung des Ausgangsstrahls einer Breitstreifenlaserdiode in eine Multimode-Faser ist. Die verwendete Breitstreifenlaserdiode emittiert einen stark elliptischen und stark divergenten Austrittsstrahl. Um dieses Strahlenbündel möglichst verlustfrei in eine Multimode-Faser einkoppeln zu können, wird in einem definierten Abstand zur Laserdiode ein mikrooptisches System positioniert, das aus zwei gekreuzten Gradientenindex-Linsen (GRIN) sowie einer zylindrischen Linse (SELFOC) besteht.

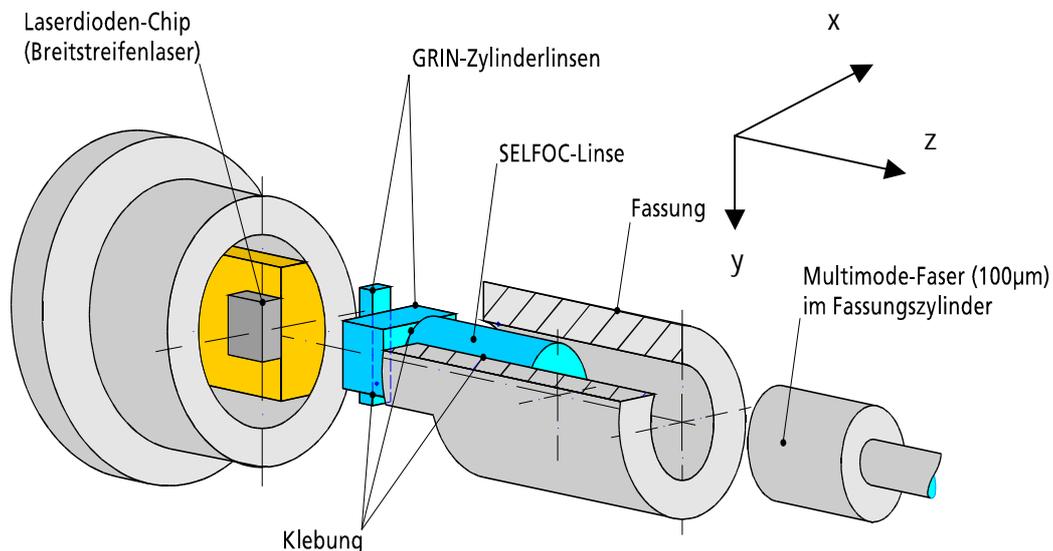


Abb. 4.1 Mikrooptisches System zur Strahlformung einer Breitstreifenlaserdiode

Die GRIN-Linsen dienen der Kollimation des stark divergenten Strahlenbündels in der fast- bzw. slow-axis, die SELFOC-Linse dient der Fokussierung des kollimierten Strahls in die Multimodefaser mit einer sehr hohen Koppeffizienz [63]. In Tabelle 4.1 sind die Abmessungen der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems aufgelistet. Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen und Geometrien der Komponenten des Demonstratorsystems im Bereich kleiner 5 mm^3 (s. Tab 2.2) sind die experimentellen Untersuchungen bzgl. des vorliegenden Bauteilspektrums auf andere mikrooptische und allgemein mikrotechnische Systeme übertragbar. Einsatzgebiete solcher strahlgeformten Diodenlasersysteme sind beispielsweise die Drucktechnik zur Bebilderung von Druckplatten, das Pumpen von Faserlasern sowie die Mikromaterialbearbeitung.

| Bauteil | Bezeichnung | Firma | Abmessungen |
|----------------------------------|---|---------------|--|
| Laserdiode | JO LD 0.3 SIM 670 | JO-LD, Jena | Emittierender Bereich: $1\mu\text{m} \times 44\mu\text{m}$ NA: $0.2x / 0.5y$ ($HW1/e^2$) 670 nm |
| Fast axis Kollimator (FAC-Linse) | $300\mu\text{m}$ cylindrical GRIN $n=n(y)$ | FhG.IOF, Jena | $(3 \times 0.3 \times 0.52) \text{ mm}^3$ $g=2.3$ |
| Slow axis Kollimator (SAC-Linse) | $750\mu\text{m}$ cylindrical GRIN $n=n(x)$ | FhG.IOF, Jena | $(0.75 \times 3 \times 1.02) \text{ mm}^3$ $g=0.82$ |
| SELFOC-Linse | SLH1.8 0.25 156 | NSG, Japan | $\varnothing 1.8\text{mm} \times 3.77\text{mm}$ |
| Multimodefaser | HCG M0100T | L. Comp., USA | $\varnothing 0.1\text{mm}$ 0.22NA |

Tab.4.1 Charakterisierung der Systemkomponenten

| Bauteil | Abw. in x | Abw. in y | Abw. in z | Winkelabw. um x | Winkelabw. um y | Winkelabw. um z |
|----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| FAC-Linse | - | $\pm 10 \mu\text{m}$ | | $\pm 1.2^\circ$ | $\pm 1.5^\circ$ | $\pm 13^\circ$ |
| SAC-Linse | $\pm 13 \mu\text{m}$ | - | | $\pm 2^\circ$ | $\pm 1.1^\circ$ | $\pm 16^\circ$ |
| Laserdiode | $\pm 12 \mu\text{m}$ | $\pm 8 \mu\text{m}$ | $\pm 20 \mu\text{m}$ | $\pm(1^\circ-3^\circ)$ | $\pm(1^\circ-3^\circ)$ | $\pm(1^\circ-3^\circ)$ |
| Multimodefaser | $\pm 19 \mu\text{m}$ | $\pm 22 \mu\text{m}$ | $\pm 200 \mu\text{m}$ | $\pm(1^\circ-3^\circ)$ | $\pm(1^\circ-3^\circ)$ | $\pm(1^\circ-3^\circ)$ |

Tab.4.2 Zulässige Abweichungen des optischen Designs [63]

Tabelle 4.2 zeigt die maximal zulässigen Abweichungen innerhalb des Montageprozesses, die sich aus den Berechnungen des optischen Designs ergeben. Grundlage der Berechnungen ist das Ziel, eine Koppeffizienz für das Gesamtsystem von 80% zu erreichen, bezogen auf eine theoretisch maximal mögliche Effizienz von 92%. Die Berechnungen wurden mit dem strahlenbasierten Designprogramm ZEMAX[®] [64] durchgeführt, da andere Berechnungsverfahren aufgrund der Komplexität der Baugruppe und der verwendeten Komponenten nur mit sehr großem Aufwand

einsetzbar sind. Nachteil der strahlenbasierten Berechnung ist, dass die resultierende Simulation sich lediglich auf die Abweichung jeweils einer Komponente in einer Raumrichtung bezieht, währenddessen alle anderen Systemkomponenten als optimal justiert angenommen werden. Die Konsequenz dieser Art der Berechnung ist, dass die in Tab. 4.2 aufgeführten Vorgaben von $\pm 10\mu\text{m}$ bzw. $\pm 2^\circ$ maximal zulässige Abweichungen einzelner Einflussgrößen bei optimiertem Restsystem darstellen. Geht man davon aus, dass jeder Fügenschritt fehlerbehaftet ist, reduzieren sich diese maximal zulässigen Abweichungen. Für den einzelnen Fügenschritt ergibt sich aus den je nach Empfindlichkeit der Fügestelle eine genäherte maximale Fügeabweichung von $\pm 3\text{-}5\mu\text{m}$, um die geforderte Funktion des Systems zu gewährleisten.

5 Fehlerbetrachtung automatisierter Montageprozesse

Zur Konzeption jedes Produktionsprozesses der Mikrooptikmontage ist vorab eine eingehende Fehlerbetrachtung [65,66,67] bzgl. der Abweichungen der Systemkomponenten und des Prozessablaufes durchzuführen. Mit Hilfe dieser Ergebnisse lässt sich das Fügeergebnis und die Qualität des Montageprozesses abschätzen. Die zulässigen Abweichungen für die Funktion des optischen Systems werden durch ein optisches Design vorgegeben und dürfen während des Montageprozesses nicht überschritten werden.

5.1 Theoretischer Ansatz zur Fehlerbetrachtung bei Montageprozessen

Einflussgrößen, die bei einem Montageprozess auftreten können, sind zum einen Fehler und Abweichungen der Positionier- bzw. Justieranordnung. Diese differieren zwischen den für die jeweilige Aufgabe möglichen Verfahren. Bedingt durch den Fertigungsprozess besitzen außerdem die Systemkomponenten selbst und alle am Montageprozess beteiligten Werkzeuge und Vorrichtungen Fertigungsabweichungen, die sich auf das Montageergebnis auswirken. Allgemeine Einflussgrößen des Prozesses sind:

- Fertigungsabweichungen der Systemkomponenten
- Fertigungsabweichungen der Handhabungsvorrichtungen und -werkzeuge
- Abweichungen beim Einrichten und Justieren der Montagevorrichtungen
- Positionierabweichungen des Handhabungssystems
- Messfehler und Justierabweichungen der eingesetzten Justiereinheiten
- Fügeabweichungen bedingt durch das eingesetzte Fügeverfahren (z.B. Klebschichtdicke, Klebkeil)

Um den Einfluss dieser Fehler und Abweichungen auf den Gesamtprozess bestimmen zu können, müssen die Einzelfehler systematisch untersucht werden. Hieraus lässt sich zum einen das Fügeergebnis abschätzen und zum anderen geeignete Justiermaßnahmen und Regelgrößen zur Optimierung des Montageprozesses entwickeln. Dies ist schematisch in Abb. 5.1 [68] dargestellt.

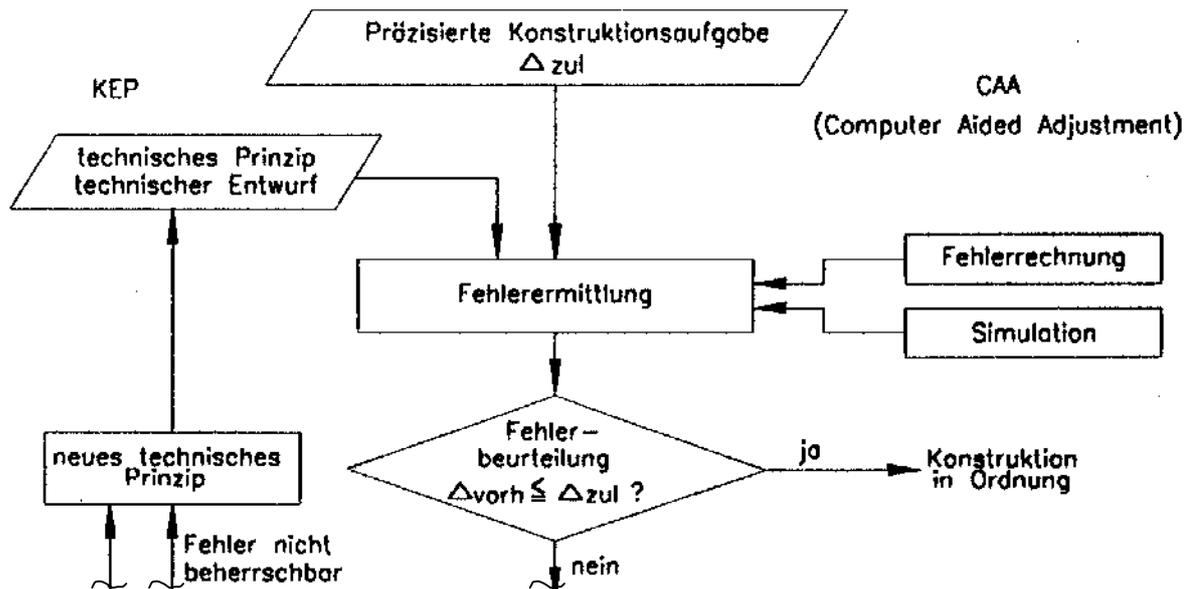


Abb. 5.1 Schematische Darstellung der Fehlerermittlung bzgl. der Einflussgrößen auf einen Montageprozess [68]

5.1.1 Fehlerbetrachtung von Messgrößen

Eine mathematische Beschreibung der auftretenden Einflussgrößen lässt sich aus der Fehlerrechnung von Messgrößen ableiten [69,70,71]. Hierbei wird eine Bewertung der Messreihen vorgenommen, um die experimentell bestimmten Messwerte bzgl. deren Werthaltigkeit und Aussagekraft zu interpretieren. Bei dieser Fehlerbetrachtung wird grundsätzlich zwischen zwei Fehlergrößen, zufälligen und systematischen Fehlern, unterschieden.

Zufällige Fehler führen zu einer nicht vorhersehbaren Streuung der einzelnen Messwerte. Die Unsicherheit, die sich daraus für das Messergebnis ergibt, kann durch Wiederholungsmessungen eingegrenzt und quantitativ beschrieben werden. Zufällige Abweichungen werden dadurch hervorgerufen, dass die Messgeräte, das Messobjekt, die Umweltbedingungen und die persönlichen Beobachtungsverhältnisse sich in nicht näher bekannter Weise während der Messungen verändern. Ursachen hierfür sind z.B. das endliche Auflösungsvermögen der Messanordnung, das begrenzte Unterscheidungsvermögen der menschlichen Sinnesorgane oder statistische Schwankungen der Messgröße selbst.

Zufällige Fehler besitzen einen stochastischen Charakter und lassen sich bei ausreichend großer Zahl der Messwerte durch eine Normalverteilung oder Gauß-Verteilung (Abb.5.5a) darstellen. Aufgrund der symmetrischen Verteilung der Messwerte um einen Mittelwert wird dieser als der wahre Messwert angenommen. Berechnen lässt sich dieser Mittelwert nach Gl.5.1.

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$$

Gl. 5.1

Dabei bezeichnet Y die Messgröße, N die Anzahl der Messungen und \bar{Y} den Mittelwert der Messgröße bzgl. der N Messungen. Eine weitere Aussage bzgl. des Mittelwertes liefert das Maß, mit dem die einzelnen Messwerte um diesen Mittelwert streuen. Dieses Maß wird die Stichprobenvarianz s genannt und stellt die mittlere quadratische Abweichung der Messwerte Y_i vom Mittelwert dar (Gl. 5.2).

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Gl. 5.2}$$

Unter Berücksichtigung der zufälligen Fehler wird das Ergebnis einer Einzelmessung in der Form $Y_i \pm s$.

Als **Systematische Fehler** werden nach DIN 1319-1 [72] Fehleranteile bezeichnet, die bei Wiederholung einer Messung unter identischen Messbedingungen einen konkreten Wert besitzen, d.h. mit gleichem Betrag und gleichem Richtungssinn (Vorzeichen) auftreten. Aus dieser Definition folgt, dass systematische Fehler im Gegensatz zu zufälligen Fehlern durch Wiederholung der Einzelmessungen weder erkannt noch eliminiert werden können. Diese Fehler werden überwiegend hervorgerufen durch Mängel des Mess- und Auswerteverfahrens, der Maßverkörperung, der Messgeräte, des Messobjektes, durch nicht erfasste Umwelteinflüsse und persönliche Fehler des Beobachters. Ursachen hierfür sind z.B. eine falsche Kalibrierung, mangelhafte Justierung, Konstruktionsfehler der Anordnung, mangelhafte Konstanz der Versuchsbedingungen oder Ablesefehler durch Parallaxe.

Zufällige und systematische Fehler lassen sich nicht in jedem Fall eindeutig quantitativ voneinander trennen, da sich bestimmte Einflussgrößen im Sinne beider Fehlerarten auf den Messwert auswirken können. Bei der Ermittlung der Fehler, die auf statistischen Betrachtungen beruht, kann deshalb nur der Einfluss der zufälligen Fehler auf das Messergebnis ermittelt werden. Der systematische Fehler kann dagegen nur quantitativ erfasst werden und sollte möglichst vermieden oder deren Auswirkungen quantitativ abgeschätzt und durch Korrekturen berücksichtigt werden.

Mathematisch lässt sich diese Korrektur des systematischen Fehlers Y nach Gl. 5.3 [70] beschreiben.

$$Y = K_m(mX + n + K_n) \quad \text{Gl. 5.3}$$

Dabei bezeichnet $mX+n$ das unkorrigierte Ergebnis des Messsystems mit einer Abweichung des Messwertes X um den Faktor m sowie eine Nullpunktabweichung n gegenüber dem Sollwert. Zur Korrektur dieses Ergebnisses kann der funktionale Zusammenhang des systematischen Fehlers um die Korrekturgrößen K_m und K_n ergänzt werden. Diese sind so zu wählen, dass die resultierende Empfindlichkeit der Anordnung 1 und der resultierende Nullpunktfehler 0 wird.

Fehlerfortpflanzung von Messgrößen

Während eines Messvorganges wirkt im Normalfall nicht nur eine einzelne Einflussgröße auf das Messergebnis. Die gesuchte Größe ist in der Regel eine Funktion einer oder mehrerer

Messgrößen, die sich auf eine bestimmte Weise auf das Messergebnis auswirken. Auch bzgl. dieser Fehlerfortpflanzung muss zwischen zufälligen und systematischen Fehlern unterschieden werden.

Die gesuchte Größe kann als Funktion von N verschiedenen, direkt gemessenen physikalischen Größen f_k (wobei $k=1\dots N$) dargestellt werden. Bei der Fehlerfortpflanzung *systematischer Fehler* sind diese Größen durch systematische Fehler h_k verfälscht. Der korrekte Wert ergibt sich dann aus

$$F = F(f_1 + h_1, f_2 + h_2, \dots, f_N + h_N) \quad \text{Gl. 5.4}$$

Wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Fehler h_k klein sind gegenüber den zugehörigen Messgrößen, kann für die Funktion F eine Taylor-Entwicklung angesetzt und nach dem linearen Glied abgebrochen werden (Gl. 5.5). Da für erkannte systematische Fehler Vorzeichen und Größe bekannt sind, erhält man einen nach Vorzeichen und Zahlenwert definierten Gesamtfehler ΔF , der sich algebraisch aus der Summe der Einzelwerte zusammensetzt. In Gl. 5.5 bezeichnet F die fehlerbehaftete und F_0 die ideale Funktion.

$$\Delta F = F - F_0 = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial f_k} \right) \cdot h_k \quad \text{Gl. 5.5}$$

Die Fehlerfortpflanzung *zufälliger Fehler* stellt ebenfalls eine Funktion aus mehreren Einzelgrößen N dar. Vorausgesetzt wird dabei, dass jede Größe n-mal unter gleichen Messbedingungen bestimmt wurde. Der Mittelwert von f_k berechnet sich dann nach Gl. 5.1, die zugehörige Stichprobenvarianz nach Gl. 5.2. Das Ergebnis $F = F(f_1, f_2, \dots, f_N)$ lässt sich auf zwei Wegen bestimmen:

1. Die Mittelwerte aller gemessenen Größen \bar{f}_i werden in die Funktion \bar{F} eingesetzt nach

$$\bar{F} = F(\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_N) \quad \text{Gl. 5.6}$$

Diese Gleichung ist generell verwendbar, auch wenn die Messungen f_k unterschiedlich oft wiederholt wurden.

2. Durch die Anwendung des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes wobei dieses Gesetz unter der Voraussetzung gilt, dass die Messungen f_k von einander unabhängig sind und die Anzahl N der Wiederholungen der Messungen hinreichend groß ist.

$$s_F = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial f_k} s_{f_k} \right)^2} \quad \text{Gl. 5.7}$$

s_F bezeichnet die Stichprobenvarianz von F, $\frac{\partial F}{\partial f_k}$ die partielle Ableitung der Gesamtfunktion nach den Einzelfehlern und s_{f_k} die Stichprobenvarianz der Einzelgrößen.

5.1.2 Toleranzbetrachtung der Maßverkörperung von Prozesskomponenten

Neben der Fehlerbetrachtung von Messgrößen werden bei der mechanischen Konstruktion Maßketten verwendet, um die geometrischen Eigenschaften der Baugruppen beschreiben zu können [73]. Anhand dieser Bemaßung können die Rahmenbedingungen bzgl. der Funktion, der Fertigung, der Messung oder der Montage festgelegt werden. In der Praxis werden Baugruppen häufig hinsichtlich deren Funktion bemaßt und toleriert. Als toleriertes Maß bezeichnet man dabei den Unterschied zwischen zulässigem Höchst- und zulässigem Mindestmaß, wobei das Toleranzmittenmaß dem Sollmaß entspricht. Für die Maßkette kann nach [74]¹ folgende Definition gegeben werden.

“Eine Maßkette ist die Aneinanderreihung von tolerierten voneinander unabhängigen Einzelmaßen M_i , die in einem technischen System zusammenwirken, und dem von ihnen abhängigen Schlussmaß M_0 . Die Maße M_0 und M_i bilden bei ihrer schematischen Darstellung einen geschlossenen Linienzug“. Dies ist beispielhaft in Abb. 5.2 dargestellt.

Die allgemeine mathematische Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zwischen den unabhängig veränderlichen Einzelmaßen M_i und dem abhängig veränderlichen Schlussmaß M_0 einer Maßkette lautet danach:

$$M_0 = g(M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_m) \quad \text{Gl. 5.8}$$

Als Schlussmaße gelten z.B. Spiel und Übermaß bzw. abhängige Maße, die die Funktion und die Montagefähigkeit der Baugruppe entscheidend bestimmen.

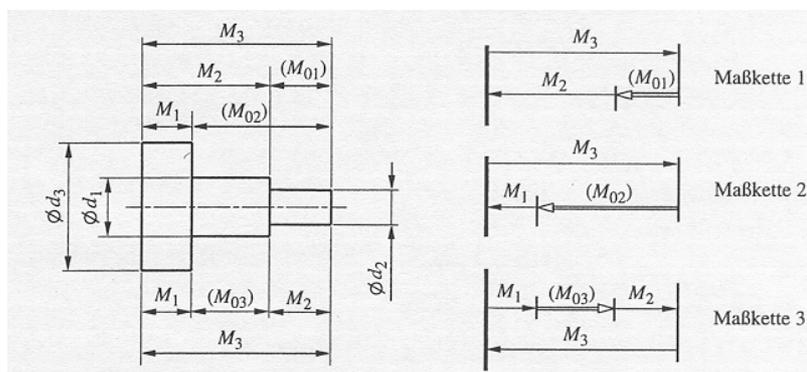


Abb. 5.2 Beispielhafte Maßkette an einer Baugruppe

Toleranzfortpflanzung von Maßketten

Gl. 5.8 zeigt, dass die geometrische Funktionseigenschaft und deren Abweichung vom Sollwert aus den geometrischen Einzeleigenschaften und deren zulässigen Abweichungen bestimmt wird. Die Darstellung des tolerierten Maßes M ist nach Gl. 5.9

¹ Die TGL als Standardwerk der DDR ist außer Kraft gesetzt aber zur Erklärung noch nutzbar

$$M = C \pm \frac{T}{2} \quad \text{Gl. 5.9}$$

wobei C das Soll- bzw. Toleranzmittenmaß und T die vorgegebene Toleranzgrenze darstellt. Durch eine Reihenentwicklung der Funktion nach Taylor lässt sich die Fehlerbetrachtung von Messgrößen hinsichtlich der Berechnung der Funktionseigenschaft und ihrer Grenzwerte auf die mathematische Betrachtung geometrischer Maßketten nach Gl. 5.10 [70] übertragen.

$$C_0 \pm \frac{T_0}{2} = g(C_1, \dots, C_N) \pm \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial g}{\partial M_i} \right|_{M_i=C_i} \frac{T_i}{2} \quad \text{Gl. 5.10}$$

Dabei stellt N die Anzahl der unabhängigen Einzelmaße dar. Bei geometrischen Maßketten unterscheidet man zwischen ein- bzw. zweidimensionalen linearen Maßketten sowie nichtlinearen Maßketten. Während bei eindimensionalen linearen Maßketten alle Maße in einer Ebene parallel bzw. reihenweise angeordnet sind, sind zweidimensionale lineare Maßketten zwar linear aber nicht parallel in einer Ebene angeordnet. Für kleine Winkel α können die Einzelmaße in die Ebene projiziert werden, dabei gilt $M_i' = M_i \cdot \cos \alpha_i$. Für größere Winkel gilt im allgemeinen $\tan T_{\alpha} \approx T_{\alpha} \cdot \sin \alpha_i$ (für $T_{\alpha} \ll \alpha_i$) woraus für $M_i' = M_i \left[\cos \alpha_i \pm \frac{T_{\alpha}}{2} \sin \alpha_i \right]$ folgt.

Für nichtlineare Maßketten gilt, dass M_0 und M_i durch einen nichtlinearen Zusammenhang verknüpft sind. Für kleine Toleranzen gegenüber Nenn- bzw. Toleranzmittenmaß lassen sich charakteristische Größen aber ebenfalls nach vorgestellten Gleichungen ermitteln. Andernfalls müssen genauere mathematische Methoden herangezogen werden.

Aus den Informationen, die diese Gleichungen liefern, ist das Funktionsverhalten der Baugruppe, die Austauschbarkeit der Baugruppen bei Funktionserhaltung, eine Kostenevaluierung und die Forderungen an die Fertigungs- und Montagegegebenheiten ableitbar. Ein wichtiges Kriterium für die Logistik eines automatisierten Montageprozesses ist die Austauschbarkeit der Baugruppen. Hier unterscheidet man zwischen:

- Der vollständigen Austauschbarkeit (Paarungsfähigkeit) der Baugruppen, d.h. alle Teile einer gefertigten Menge sind ohne Überschreitung des Schlussmaßes miteinander paarungsfähig. Diese Voraussetzung ist sowohl von den fertigungstechnischen als auch von den ökonomischen Gegebenheiten abhängig und ist nur bedingt realisierbar.
- Die zweite Variante bezeichnet die unvollständige Austauschbarkeit, bei der die Baugruppen nur unter Zuhilfenahme zusätzlicher Schritte (Sortieren / Gruppieren in Auslesepaarungen bzw. durch Kompensations- und Justierschritte) funktionsgerecht miteinander gepaart werden können [74].

Zur Berechnung der Austauschbarkeit von Baugruppen existieren für beide Fälle industriell eingesetzte Verfahren. Für einen automatisierten Montageprozess mit mittleren bis hohen Losgrößen sind von diesen Verfahren unter ökonomischen Gesichtspunkten lediglich zwei einsetzbar [70]:

- die Maximum-Minimum-Methode bei gegebener vollständiger Austauschbarkeit

- und Kompensationsmethoden für unvollständige Austauschbarkeit, mit denen die Baugruppen anhand von Justierverfahren miteinander kombiniert werden können.

Die vorgestellten Lösungen für die automatisierte Montage mikrooptischer Systeme entsprechen dem Einsatz dieser beiden Austauschvarianten. Für das Fügen der Komponenten mittels Fügevorrichtungen wird deren vollständige Austauschbarkeit zu Grunde gelegt wohingegen die vorgestellten Justierprinzipien Untersuchungen zur Kompensationsmethode darstellen.

5.2 Übertrag der Fehler- und Toleranzbetrachtung auf automatisierte Montageprozesse

Der Montageprozess beinhaltet nach Abb. 2.1 verschiedene Einzelprozesse, die bestimmten Fehlern und Abweichungen unterliegen. Entsprechend wirken auch auf den gesamten Montageprozess eine Reihe verschiedener Einflussgrößen ein. Art und Anzahl dieser Einflussgrößen ist direkt abhängig von den Prozessschritten sowie den eingesetzten Positionier- und Justieranordnungen.

Betrachtet man die Einflussgrößen, die bei einem automatisierten Montageprozess auftreten, mit den vorgestellten Berechnungsgrundlagen der Gleichungen 5.1 bis 5.10, ergibt sich folgende Einteilung (Abb. 5.3):

- Zufällige und systematische Abweichungen bei der automatisierten Handhabung der Bauteile, beim Erfassen (Messen) der Lage und ihrer Regelung (Positionieren).
- Zufällige und systematische Abweichungen der Bauteile, Vorrichtungen und Montagewerkzeuge

Mathematisch lässt sich die Darstellung der Gesamtabweichungen des Montageprozesses aus den Gleichungen 5.4, 5.6, 5.8 sowie 5.7 und 5.10 wie folgt ableiten. Sowohl bei der Berechnung der Fehlerfortpflanzung von Messgrößen, als auch bei der geometrischen Maßkette liegen Funktionen zugrunde, die von einer bestimmten Anzahl von Einzelabweichungen abhängen. Für beide Arten der Fehlerfortpflanzung gilt außerdem unter der Voraussetzung kleiner Fehler im Bezug zur Messgröße der Ansatz der Taylor-Entwicklung. Übertragen auf die Anzahl von Abweichungen des Montageprozesses ergeben sich daraus die Gleichungen 5.11 und 5.12.

$$T_{i,k,m} = g(M_i, f_k + h_k, \bar{f}_m) \quad \text{Gl. 5.11}$$

$$T_0 = g(C_i) \pm \sum_{i=1}^N \frac{\partial g}{\partial f_i} \Delta f_i \quad \text{Gl. 5.12}$$

Dabei bezeichnet Gl. 5.11 die allgemeine Funktion der Abweichungen des vorliegenden Montageprozesses, bestehend aus n voneinander unabhängigen Einflussgrößen g(n) mit n=i,j,k,..., die unterschiedlichen Fehlerarten zuzuordnen sind. Übertragen in eine Taylor-Entwicklung erhält man nach Gl. 5.12 einen allgemeinen Ansatz zur Berechnung des Gesamtmontageprozesses hinsichtlich der Maßverkörperung der Komponenten und der Montageumgebung einschließlich deren Einflussgrößen. Für die Abschätzung der erreichbaren Fügegenauigkeiten innerhalb des Montageprozesses reduziert sich Gl. 5.12 auf die darin

enthaltenen Abweichungen der auf die Montageumgebung einwirkenden Komponenten (Gl. 5.13).

$$\Delta T_i = \sum_{i=1}^N \frac{\partial g}{\partial f_i} \Delta f_i \quad \text{Gl. 5.13}$$

Dabei bezeichnet g die Funktion aller Einzelgrößen, f die Einflussgröße selbst und N die Anzahl aller unabhängigen Einflussgrößen. Im Gegensatz zu den Reihenentwicklungen wird das lineare Glied hier nicht als Betrag des zugehörigen Wertes beschrieben, da sich Fehler bzgl. der Orientierung durch unterschiedliche Vorzeichen ausgleichen können und dieses Verhalten für die Ergebnisverbesserung des Gesamtprozesses genutzt werden kann.

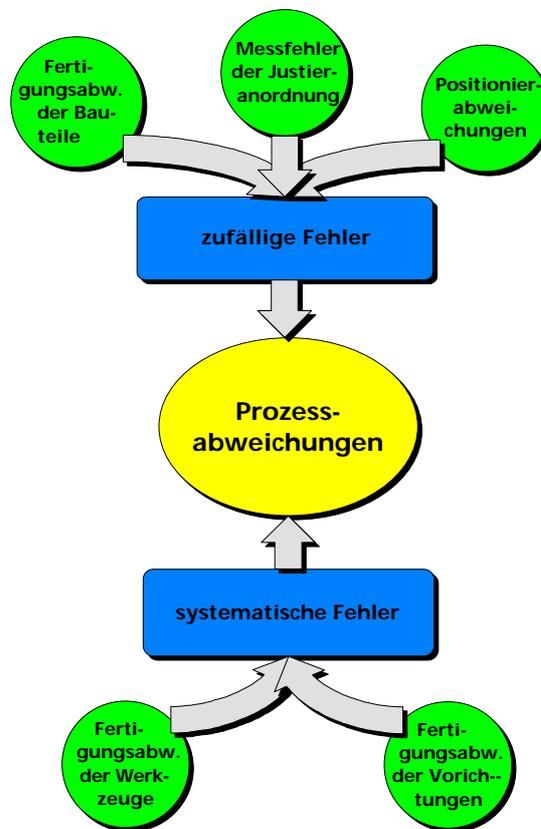


Abb. 5.3 Schematische Darstellung der Einflussgrößen bei einem automatisierten Montageprozess mikrooptischer Komponenten

Zur Bestimmung der Beziehungen der Abweichungen bei einem automatisierten Montageprozess müssen die jeweiligen Einflussgrößen anhand der mathematischen Fehlerbetrachtung der Gleichungen 5.1 bis 5.13 ermittelt werden. Für die Untersuchungen dieser Arbeit werden im folgenden alle Abweichungen bestimmt, die auf das Demonstratorsystem wirken. Daraus lässt sich eine allgemeine Einschätzung zur Eignung von Positionier- und Justierverfahren für die automatisierte Montage mikrooptischer Systeme geben.

5.3 Experimentelle Bestimmung der Abweichungen von Demonstratorsystem und Montageumgebung

5.3.1 Bestimmung der Fertigungsabweichungen der optischen Komponenten

Die Abweichungen der verwendeten optischen und mechanischen Komponenten sind maßgebend von deren Fertigung und der Güte des dabei verwendeten Bearbeitungsverfahrens abhängig. Bearbeitungsverfahren für Linsen und Fassungen sind Sägen, Drehen, Hohlbohren, Schleifen, Polieren, Ätzen, lithographische Prozesse und Abformprozesse für Kunststofflinsen. Beschichtungen zur Ent- und Verspiegelung optischer Flächen, das Ionenstrahlätzen und andere Sonderverfahren spielen für die Fertigungsabweichungen eine untergeordnete Rolle.

Mit den jeweiligen Verfahren werden unterschiedliche Bearbeitungsgenauigkeiten und somit unterschiedliche Fertigungsabweichungen der Bauteile erreicht. Abb. 5.4 stellt diese Unterschiede graphisch dar. Zur Erfüllung der optischen Funktion und der Designvorgaben sind die Forderungen an die Bearbeitungsgenauigkeiten sehr hoch. Tab. 5.1 zeigt die Fertigungsabweichungen [76], in denen mikrooptische Komponenten kommerziell hergestellt und vertrieben werden. Diese lassen sich über aufwendigere Fertigungsverfahren weiter reduzieren, wobei dies mit höheren Kosten verbunden und nicht für jedes optische System ökonomisch vertretbar ist.

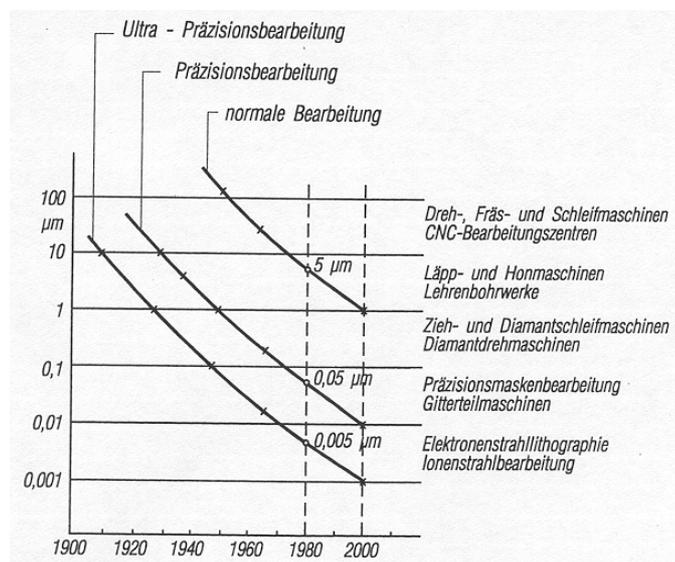


Abb. 5.4 Erreichbare Bearbeitungsgenauigkeiten bezogen auf das Bearbeitungsverfahren nach Taniguchi [75]

| Optische Komponente | Fertigungsabweichungen | Bearbeitungsverfahren |
|---------------------|---|--|
| Linsen | Durchmesser: $\pm 0,005\text{mm} - \pm 0,02\text{mm}$ Dicke: $\pm 0,05\text{mm}$ | Drehen (Mantelfläche) Schleifen, Polieren (optische Wirkflächen) |
| Planoptik | Dicke: $> \pm 0,01\text{mm}$ Länge: $> \pm 0,05\text{mm}$ | Sägen, Schleifen (Seitenflächen) Schleifen, Polieren (optische Wirkflächen) |

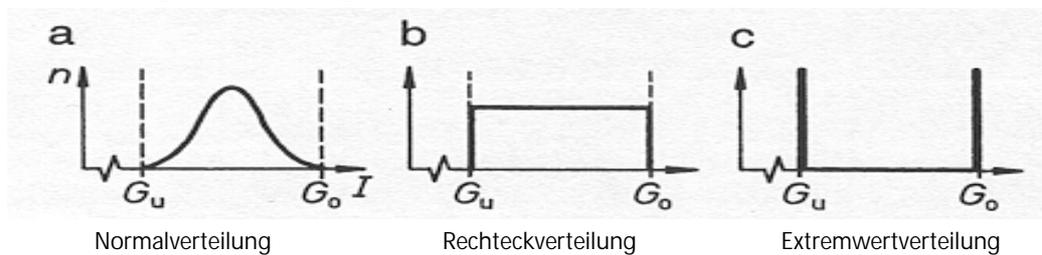
Tab. 5.1 Erreichbare Fertigungsabweichungen für mikrooptische Komponenten [80]

Neben dem Betrag der Fertigungsabweichungen ist für die Konzeption des Montageprozesses deren Verteilung in einer gefertigten Bauteilcharge relevant. Die Abhängigkeit dieser Größe unterliegt den Randbedingungen

- des verwendeten Bearbeitungsverfahrens,
- des auftretenden Werkzeugverschleißes während des Bearbeitungsprozesses und
- der Einhaltung der Prozessparameter durch den Werker.

Die daraus resultierenden möglichen Verteilungen innerhalb einer Bauteilcharge lassen sich nach Abb. 5.5 graphisch darstellen [71]:

Ideale Häufigkeitsverteilung:



Reale Häufigkeitsverteilung:

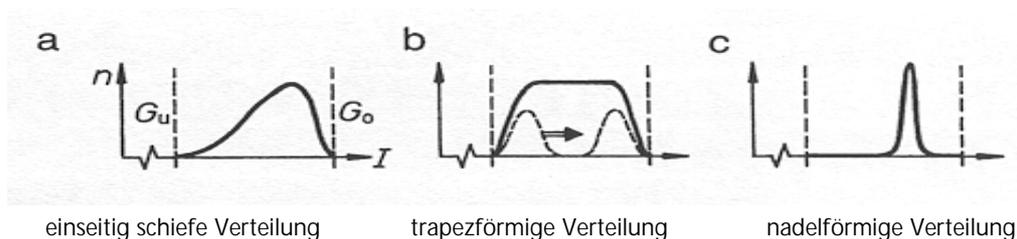


Abb. 5.5 Mögliche Verteilungen der Fertigungsabweichungen bei Bearbeitung mikrooptischer Komponenten [71]

Die Unterschiede zwischen idealer und realer Häufigkeitsverteilung der Fertigungsabweichungen ergeben sich durch bestimmte Fertigungsabläufe, wie z.B. die Abnutzung des Werkzeuges bei der Bearbeitung einer Bauteilcharge (Abweichung von der Rechteckverteilung) oder Fertigungseigenheiten des Werkers, der sich bei der Bearbeitung oberhalb der Gutgrenze in Richtung Minimal-Material-Grenze bewegt (Verschiebung der Gaußverteilung).

Zur Abschätzung der Häufigkeitsverteilung der verwendeten Systemkomponenten ist eine Stichprobenmessung bzgl. der für den Montagevorgang maßgebenden Abmessungen durchzuführen. In der Realität wird diese Häufigkeitsverteilung keiner Normalverteilung entsprechen. Deshalb muss ein Vertrauensbereich gesetzt werden, der alle nötigen Messwerte einbezieht und gleichzeitig Fehlmessungen ausschließt.

Unter Berücksichtigung dieser Grundlagen wurden die Komponenten des vorliegenden Demonstratorsystems anhand einer Stichprobenanzahl von 30 Bauteilen über die gesamte Bauteilcharge charakterisiert. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wurde jede Komponente dreifach gemessen und der Messwert über eine Mittelwertbildung ermittelt. Abb. 5.6 zeigt die Komponenten der Subbaugruppe in dem den Messungen zugrunde gelegten räumlichen Koordinatensystem. Tab. 5.2 zeigt die gemessenen Fertigungsabweichungen der verwendeten Komponenten.

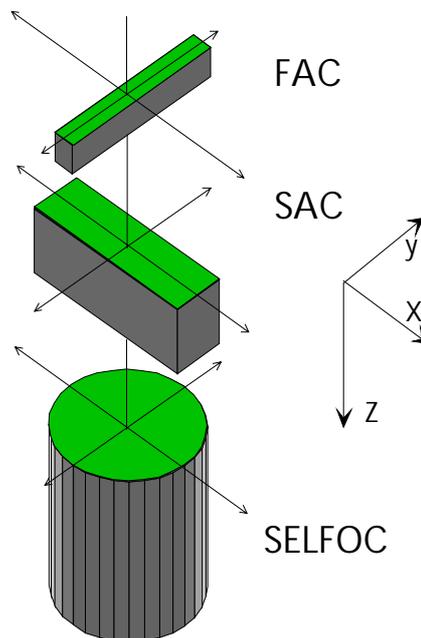


Abb. 5.6 Bezug der Systemkomponenten im verwendeten Koordinatensystem

| Bauteil | Fertigungsabweichungen der Komponenten (bezogen auf Koordinatensystem der Abb. 5.2) | Systematischer Fehler (Abweichung des Mittelwertes von der Vorgabe des optischen Designs) | zufälliger Fehler (Messfehler) |
|--------------------------|--|--|--|
| SELFOC-Linse [mm] | $\varnothing = 1,8 \pm 0,005$ $z = 3,77 + 0,04$ | $\Delta x = +0,002$ $\Delta y = +0,002$ $\Delta z = +0,01$ | $\Delta x = \pm 0,003$ $\Delta y = \pm 0,003$ |
| SAC-Linse [mm] | $x = 0,760 \pm 0,005$ $y = 3,0 \pm 0,1$ $z = 1,027 \pm 0,005$ | $\Delta x = +0,003$ $\Delta z = -0,002$ | $\Delta x = \pm 0,002$ $\Delta z = \pm 0,002$ |
| FAC-Linse [mm] | $x = 3,0 \pm 0,1$ $y = 0,300 \pm 0,005$ $z = 0,520 \pm 0,005$ | $\Delta y = +0,001$ $\Delta z = +0,004$ | $\Delta y = \pm 0,001$ $\Delta z = \pm 0,003$ |

Tab. 5.2 Gemessene Fertigungsabweichungen der verwendeten Komponenten des Demonstratorsystems

5.3.2 Bestimmung der Abweichungen von Vorrichtungen und Greifwerkzeugen

Die Abweichungen, die beim Einsatz von Greifwerkzeugen und Vorrichtungen in den Montageprozess einfließen, teilen sich in zwei sich überlagernde, unabhängige Einflussgrößen auf, eine systematische Fertigungsabweichung durch das Greifwerkzeug und einen zufälligen Prozessfehler. Abb. 5.7 stellt diese Einflussgrößen graphisch dar.

- Der Werkzeugfehler wird durch Bearbeitungs- und Messfehler während der Herstellung verursacht. Die Werkzeuge sind Einzelanfertigungen und weisen definierte Fertigungsabweichungen zur Sollgeometrie auf, die als systematische Fehler in den Prozessablauf und das Montageergebnis eingehen. Diese Maße können über eine Mehrfachmessung und die Bildung eines Mittelwertes sehr genau bestimmt werden. Die Abweichungen können im Montageprozess teilweise über einen Korrekturfaktor ausgeglichen werden.

Die Größe der Abweichungen ist vom Bearbeitungsverfahren und von der Komplexität der Bauteilgeometrie abhängig. Mit zunehmender Komplexität sind während der Fertigung mehr Umspannvorgänge nötig, die Abweichungen in Position und Orientierung des Werkstücks verursachen.

- Neben der systematischen Fertigungsabweichung treten im Montageprozess Abweichungen auf, die auf die Aufnahme- und Ablagegenauigkeit der Werkzeuge zurückzuführen sind. Die daraus resultierende Positionsabweichung ist zufällig und kann daher durch Wiederholungsmessungen des Prozessschrittes bestimmt werden. Durch eine Optimierung der Prozessschritte kann diese Einflussgröße weiter minimiert werden.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden die entwickelten Werkzeuge und Vorrichtungen bzgl. dieser beiden Fehlerarten untersucht und die Abweichungen der einzelnen Einflussgrößen

mittels optischer und tastender Messverfahren bestimmt. Der zufällige Fehler wurde anhand der Gleichungen 5.1 und 5.2 ermittelt. Die systematischen Fehler der Vorrichtungen, wurden hinsichtlich deren Einfluss auf den Montageprozess beurteilt und entsprechend der Gleichungen 5.3 bis 5.5 berechnet. Tab. 5.3 beschreibt die für die Vorrichtungen ermittelten Abweichungen. Diese richten sich bzgl. Betrag und Orientierung nach dem Koordinatensystem, das in Abb. 5.6 vorgegeben ist. Die ermittelten Werte der Tabellen 5.2 und 5.3 sind Grundlage der weiteren Berechnungen und werden in diesen entsprechend übernommen.

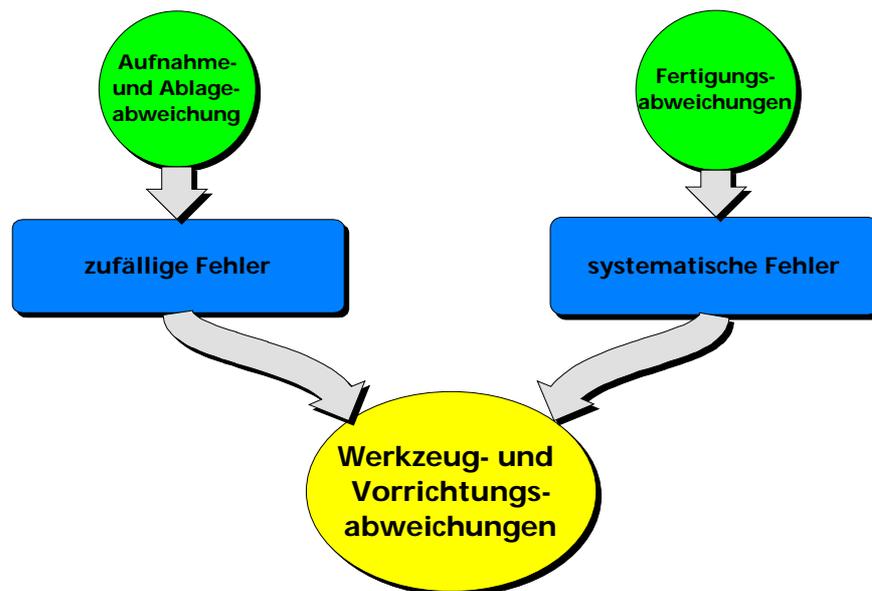


Abb. 5.7 Einflussgrößen der verwendeten Werkzeuge und Vorrichtungen auf den Montageprozess

| Vorrichtung / Werkzeug | Systematischer Fehler (Fertigungsabweichung) | zufälliger Fehler (Mess- und Prozessfehler; z.B. Aufnahme-/Ablagegenauigkeiten) |
|---|---|--|
| Greifer SELFOC-Linse (Aufnahme) | auftretende Fertigungsabweichungen der Werkzeuge können durch Einlernprozesse im Montageablauf kompensiert werden | $\Delta x = \pm 3 \mu\text{m}$ $\Delta y = \pm 3 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 3 \mu\text{m}$ |
| Greifer SAC-Linse (Aufnahme) | s.o. | $\Delta y = \pm 2 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 2 \mu\text{m}$ |
| Greifer FAC-Linse (Aufnahme) | s.o. | $\Delta y = \pm 2 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 2 \mu\text{m}$ |
| Klemmvorrichtung (Aufnahme) | s.o. | $\Delta x = \pm 2 \mu\text{m}$ $\Delta y = \pm 2 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 2 \mu\text{m}$ |

| | | | | |
|---|--|---|--|--|
| Magazin (Formnester) | Fertigungsabweichungen, die im Bereich von $\pm 0,1$ mm liegen, werden durch die Zentrierung in den Greifwerkzeugen ausgeglichen | $\Delta x = \pm 50 \mu\text{m}$ $\Delta y = \pm 50 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 50 \mu\text{m}$ | | |
| Passive Fügevorrichtung (Aufnahmegeometrie) | SELFOC-Linse entspricht Bezugskordinaten der restlichen Anschlagpunkte (Positionierbasis) SAC-Linse $\Delta x = -5 \mu\text{m}$ FAC-Linse $\Delta y = +2 \mu\text{m}$ | SELFOC-Linse $\Delta x = -2 \mu\text{m}$ $\Delta z = -2 \mu\text{m}$ $\Delta \phi_y = \pm 0,1^\circ$ | SAC-Linse $\Delta x = -2 \mu\text{m}$ $\Delta z = -1 \mu\text{m}$ $\Delta \phi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta \phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta \phi_z = \pm 0,1^\circ$ | FAC-Linse $\Delta y = -1 \mu\text{m}$ $\Delta z = -1 \mu\text{m}$ $\Delta \phi_x = \pm 0,1^\circ$ $\Delta \phi_y = \pm 0,5^\circ$ $\Delta \phi_z = \pm 0,4^\circ$ |

Tab. 5.3 Gemessene Fertigungs- und Positionierabweichungen der verwendeten Vorrichtungen und Montagewerkzeuge

5.3.3 Positionierfehler des Positioniersystems

Die Achsen von Positioniersystemen unterliegen aufgrund des mechanischen Aufbaus der Antriebe und Führungen grundsätzlich Positionsabweichungen, die als Nicken, Rollen und Gieren bezeichnet werden [38]. Diese Abweichungen können vom Anwender in der Regel nicht nachgemessen werden, so dass die Montageprozesse anhand der Genauigkeitsangaben der Hersteller ausgelegt werden müssen.

Für das Positioniersystem, das für diese Untersuchungen eingesetzt wurde, wurde die Positioniergenauigkeit in den verschiedenen Koordinatenrichtungen mittels eines Interferometeraufbaus bestimmt. Dabei ergaben sich für alle Bewegungsrichtungen Positionsabweichungen im Bereich von $\pm 1 \mu\text{m}$, die in den folgenden Berechnungen als zufälliger Fehler des Positioniersystems einfließen.

5.3.4 Bestimmung des Messfehlers des Bildverarbeitungssystems

Grundbaustein vieler Justieranordnungen ist ein Bildverarbeitungssystem, das zur Auswertung der Justierregelgrößen dient. Diese Systeme weisen Abweichungen auf, die in erster Linie von der Auflösung der verwendeten Kameras abhängen. Für CCD-Kameras ist die Auflösung wiederum abhängig von der Pixelgröße des CCD-Empfängers, die in einem Bereich von $5 \mu\text{m}$ liegt. Die Bestimmung des Kantenverlaufs, der durch einen Hell-Dunkel-Übergang festgelegt wird, kann daher selbst bei optimaler Ausleuchtung der Bauteilstrukturen nur innerhalb eines Bereiches von 2 Pixeln, d.h. ca. $10 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Zur Steigerung der Kantenauflösung werden die Aufnahmen mit Subpixelalgorithmen hinterlegt. Diese beinhalten mathematische Funktionen, die den Grauwert beurteilen und so die Auflösung steigern [77,84]. Die Genauigkeiten, die so erreicht werden können, liegen bei einem Fünftel der Pixelgröße, d.h. im Bereich von $\pm 1 \mu\text{m}$.

Voraussetzung hierfür ist eine definierte Beleuchtung der Bauteile und Strukturen, um einen möglichst schmalbandigen Hell-Dunkel-Übergang zu gewährleisten.

Die Bildverarbeitungssysteme, die in den Untersuchungen eingesetzt wurden, weisen unter der Voraussetzung konstanter Umgebungsbedingungen, d.h. einer konstanten, optimalen Beleuchtung der Messobjekte und konstanter Umgebungstemperatur, einen zufälligen Fehleranteil für die Messung der jeweiligen Regelgrößen in einem Bereich von $\pm 1\mu\text{m}$ auf. Dieser Wert wird nachfolgend für die weiteren Berechnungen verwendet.

5.4 Bestimmung der Montageabweichungen bei Einsatz von Fügevorrichtungen zur Positionierung von mikrooptischen Bauteilen

Durch den fehlenden Regelprozess ist das Fügeergebnis, das mit diesem Verfahren erreicht werden kann, von einer größeren Anzahl auftretender Einzelabweichungen abhängig. Diese lassen sich aufteilen in (Abb. 5.8):

- die Fertigungsabweichungen der zu fügenden Bauteile,
- die Fertigungsabweichungen der Vorrichtung bzgl. der einzelnen Anschlagpunkte pro Fügeschritt und
- die Abweichungen der Mechanismen (Saugmechanismus), die zur Unterstützung der Lagegenauigkeit und Orientierung der Bauteile dienen.

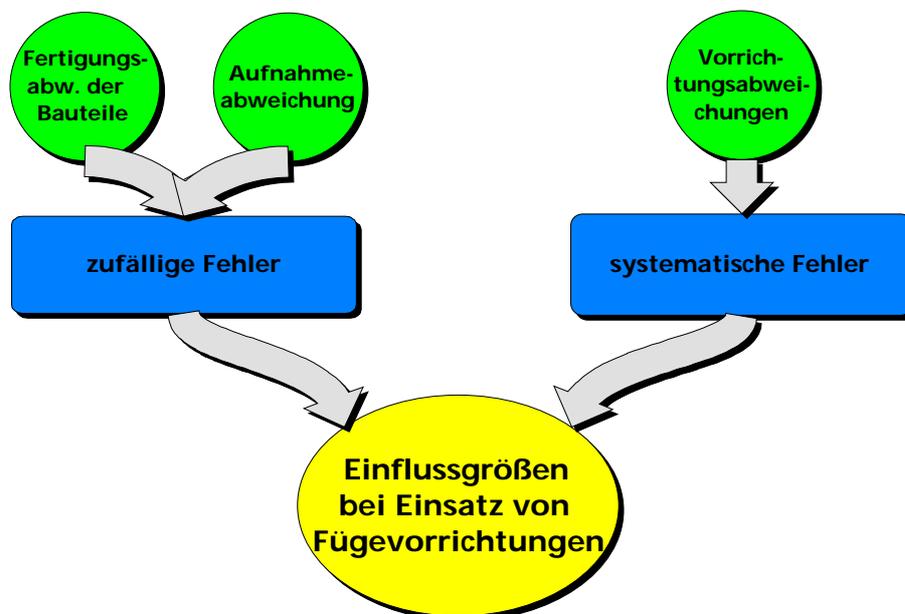


Abb. 5.8 Einflussgrößen auf den Montageprozess bei Einsatz von Fügevorrichtungen

Zur Berechnung der gesamten Prozessabweichungen werden die auftretenden Einflussgrößen nach zufälligen und systematischen Fehlern unterteilt. Weiter ist zu beachten, dass die Abweichungen, die zur Erfassung der Fehlerbeträge benötigt werden, hinsichtlich aller Koordinatenrichtungen und Drehachsen berechnet werden müssen. Berechnungsgrundlage für dieses Positionierverfahren sind die durch Messungen ermittelten Abweichungen der Einflussgrößen, die bei den einzelnen Prozessschritten auftreten (s.a. Tab. 5.2 und 5.3). Tabelle 5.4 listet diese mit einer Unterteilung nach zufälligen und systematischen Fehlern auf.

| Einflussgrößen / Prozessabläufe | Systematischer Fehler (Fertigungsabweichungen) | Zufälliger Fehler (Mess- und Prozessfehler; z.B. Aufnahme- /Ablagegenauigkeiten) | | |
|--|--|---|---|---|
| | | SELFOC-Linse $\Delta x = \pm 3 \mu\text{m}$ $\Delta y = \pm 3 \mu\text{m}$ | SAC-Linse $\Delta x = \pm 2 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 2 \mu\text{m}$ | FAC-Linse $\Delta y = \pm 1 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 3 \mu\text{m}$ |
| Fertigungsabweichungen der Bauteile | Kein Einfluss | SELFOC-Linse $\Delta x = \pm 3 \mu\text{m}$ $\Delta y = \pm 3 \mu\text{m}$ | SAC-Linse $\Delta x = \pm 2 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 2 \mu\text{m}$ | FAC-Linse $\Delta y = \pm 1 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 3 \mu\text{m}$ |
| Aufnahme- /Ablagegenauigkeit der Greifer | Kein Einfluss (Positionierhilfsmechanismus der Vorrichtung gleicht Abweichungen bei der Bauteilablage im Bereich von $\pm 20 \mu\text{m}$ aus) | kein Einfluss (Positionierhilfsmechanismus der Vorrichtung gleicht Abweichungen bei der Bauteilablage im Bereich von $\pm 20 \mu\text{m}$ aus) | | |
| Positioniergenauigkeit des Positioniersystems | Kein Einfluss | kein Einfluss soweit eine Positioniergenauigkeit des Systems von $\pm 10 \mu\text{m}$ gewährleistet wird | | |
| Aufnahmegenaugigkeit SELFOC-Linse in der Vorrichtung | Fehler hat keinen Einfluss, da die Aufnahmekontur als Bezug für die Koordinaten der Aufnahmen der anderen beiden Linsen dient. | $\Delta x = -2 \mu\text{m}$ $\Delta z = -2 \mu\text{m}$ $\Delta \varphi_y = \pm 0,1^\circ$ (einseitige Lageabweichung durch Entfernung von mechanischem Anschlag) | | |
| Aufnahmegenaugigkeit SAC-Linse in der Vorrichtung | $\Delta y = -5 \mu\text{m}$ (bezogen auf die Aufnahmekontur der Selfoc-Linse = Fertigungsabweichung) | $\Delta x = -2 \mu\text{m}$ $\Delta z = -1 \mu\text{m}$ $\Delta \varphi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta \varphi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta \varphi_z = \pm 0,1^\circ$ | | |
| Aufnahmegenaugigkeit FAC-Linse in der Vorrichtung | $\Delta x = +2 \mu\text{m}$ (bezogen auf die Aufnahmekontur der Selfoc-Linse = Fertigungsabweichung) | $\Delta y = -1 \mu\text{m}$ $\Delta z = -1 \mu\text{m}$ $\Delta \varphi_x = \pm 0,1^\circ$ $\Delta \varphi_y = \pm 0,5^\circ$ $\Delta \varphi_z = \pm 0,4^\circ$ | | |

Tab. 5.4 Ermittelte Abweichungen für die einzelnen Prozessschritte bei der Positionierung mit Fügevorrichtungen

Zur Charakterisierung der gesamten Prozessabweichung werden die einzelnen Einflussgrößen des Prozessablaufes nach den Gleichungen 5.11 bis 5.13 zueinander in Beziehung gesetzt. Im Gegensatz zu der Betrachtung von Messfehlern, die anhand physikalischer Gesetzmäßigkeiten voneinander abhängen, sind die hier auftretenden Einflussgrößen unabhängig voneinander. Mit den ermittelten Werten aus Tab. 5.3 ergeben sich daraus die Gleichungen 5.14 und 5.15:

$$\Delta T_i = \left(\frac{\partial g}{\partial f_1}\right) \Delta f_1 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_2}\right) \Delta f_2 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_3}\right) \Delta f_3 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_4}\right) \Delta f_4 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_5}\right) \Delta f_5 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_6}\right) \Delta f_6 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_7}\right) \Delta f_7 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_8}\right) \Delta f_8 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_9}\right) \Delta f_9 \quad \text{Gl.5.14}$$

$$\Delta T\varphi_i = \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_1}\right)\Delta\varphi_1 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_2}\right)\Delta\varphi_2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_3}\right)\Delta\varphi_3 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_4}\right)\Delta\varphi_4 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_5}\right)\Delta\varphi_5 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_6}\right)\Delta\varphi_6 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_7}\right)\Delta\varphi_7 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_8}\right)\Delta\varphi_8 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi_9}\right)\Delta\varphi_9, \text{ Gl.5.15}$$

Dabei bezeichnen ΔT_i bzw. $\Delta T\varphi_i$ die Abweichungen bzgl. der Koordinatenrichtungen und Orientierungen des Bauteils. Die Parameter Δf_1 bis Δf_9 (bzw. $\Delta\varphi_i$) stehen für die in Tab. 5.3 aufgelisteten Einflussgrößen dieses Montageverfahrens; Δf_1 bis Δf_3 bezeichnen die Maßabweichungen der Bauteile, Δf_4 bis Δf_6 den systematischen Fehler der Vorrichtung und Δf_7 bis Δf_9 den zufälligen Fehler der Ablagegenauigkeit in der Vorrichtung. Zur detaillierten Aufschlüsselung der Abweichungen wurden diese Berechnungen für jedes Bauteil und jeden Fügeschritt separat durchgeführt. Dabei ergeben sich mit den Einflussgrößen aus Tab. 5.3, eingesetzt in die Gleichungen 5.14 und 5.15, die Abweichungen für den jeweiligen Fügeschritt. Diese werden in Tab. 5.7 vergleichend mit den Vorgaben des optischen Designs sowie den Abweichungen der übrigen Montageverfahren dargestellt.

5.5 Bestimmung der Montageabweichungen bei Einsatz bildverarbeitender Justierverfahren

Im Gegensatz zum vorherigen Lösungsansatz gewährleistet die Integration von Justieranordnungen in den Montageprozess, dass die Positionen der Fügekomponenten anhand von verfahrensabhängigen Regelgrößen nachgeregelt werden können. Dadurch reduziert sich die Anzahl und der Betrag der Einflussgrößen auf das Montageergebnis, so dass die Baugruppen mit einer höheren Genauigkeit gefügt werden können. Das Montageergebnis hängt dabei von der Empfindlichkeit der Regelgröße und dem Aufbau der Justieranordnung ab. Bei den untersuchten Lösungen zur Justierung anhand geometrischer bzw. optischer Merkmale sind folgende Einflussgrößen zu berücksichtigen.

5.5.1 Justierung anhand charakteristischer Konturmerkmale

Das Verfahren der Justierung anhand geometrischer Merkmale verwendet als Regelgröße die Differenz zwischen der Istposition des zu fügenden Bauteils und der durch eine Bezugsposition vorgegebenen Soll-Fügeposition. Innerhalb dieser Arbeit wurde für die Untersuchungen in der Justieranordnung ein 3D-Bildverarbeitungssystem verwendet. Die dreidimensionale Information dient im Montageprozess dazu, das Bauteil auszurichten, die durch das optische Design vorgeschriebene Klebschichtdicke definiert einzustellen und die auftretenden Fügekräfte hinsichtlich der empfindlichen mikrooptischen Bauteile zu minimieren.

Legt man die geforderten Fügegenauigkeiten von $\pm 3\mu\text{m}$ pro Fügeschritt zugrunde, ergibt sich unter Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen des Montageprozesses eine erforderliche Justiergenauigkeit von $\pm 1\text{-}2\mu\text{m}$. Die Voraussetzungen, die Bildinformation bzgl. der Fügekomponenten in diesen Genauigkeiten zu gewährleisten, sind:

- Eine angepasste Beleuchtung der Bauteile, um einen schmalbandigen Hell-Dunkel-Übergang innerhalb des Grauwertverlaufs und daraus resultierend einen definierten Kantenverlauf zu erhalten.

- Eine ausreichend genaue Kalibrierung der Justieranordnung bzgl. des Montageraumes. Hierbei werden die Koordinatensysteme des Bildverarbeitungssystems und der Montageumgebung ermittelt und zueinander in Beziehung gesetzt.
- Montagegerechtes Design der Komponenten der Montageumgebung, um die Beobachtbarkeit der zu messenden Bauteilstrukturen während des Justierprozesses zu gewährleisten und den Einfluss der Fertigungsabweichungen der Bauteile auf das Fügeergebnis zu minimieren.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich folgende Einflussgrößen bzgl. des Montageprozesses, die sich nach Abb. 5.9 darstellen lassen:

- Fertigungsabweichungen der Bauteile, die in Flächenberechnungen nicht vollständig messbarer Kantenverläufe eingehen.
- Kalibrierfehler, die Ungenauigkeiten bei der Messung der Bauteile und der Erstellung von Korrekturdaten zur Regelung des Fügeprozesses verursachen.
- Messfehler der Kameras verursacht durch deren Auflösung (Pixelgröße) und optische Einflussgrößen, wie Aberrationen, Verzeichnungen u.ä..
- Zufällige Messfehler bei der Bauteil- und Positionsvermessung aufgrund mangelhafter Beleuchtung und daraus resultierender fehlerhafter Kantenverläufe.
- Positionsabweichungen des Positioniersystems bei der Nachregelung der berechneten Korrekturdaten.

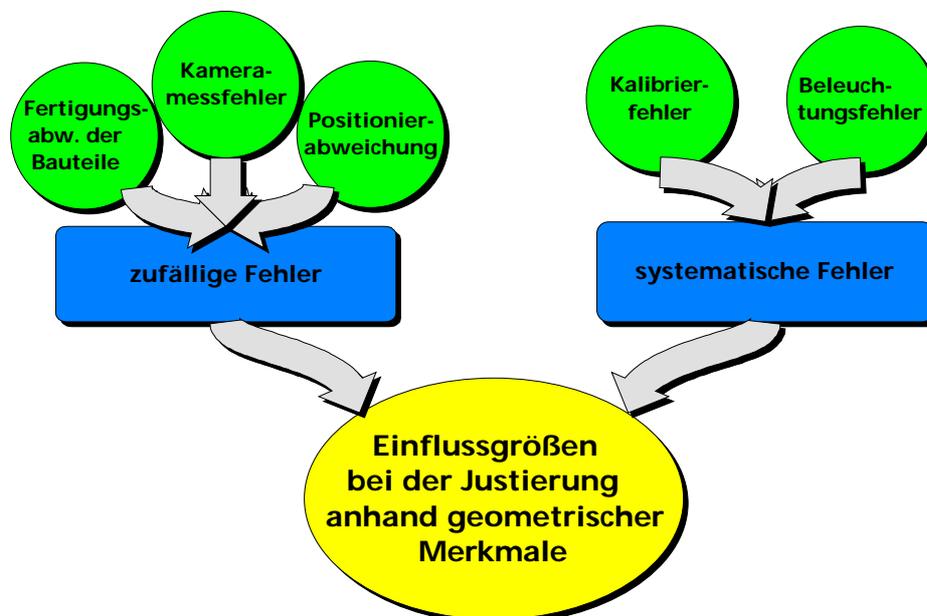


Abb. 5.9 Einflussgrößen auf den Montageprozess bei Justierung anhand geometrischer Merkmale

Die auftretenden Montageabweichungen dieses Verfahrens werden konform zu den Berechnungen in Kap 5.4 bestimmt. Berechnungsgrundlage sind auch für dieses Positionierverfahren die durch Messungen ermittelten Abweichungen der Einflussgrößen, die bei den einzelnen Prozessschritten auftreten (s.a. Tab. 5.2 und 5.3). Tabelle 5.5 listet die einzelnen Prozessschritte auf und beschreibt die ermittelten Einflussgrößen nach zufälligen und systematischen Fehlern.

| Einflussgrößen / Prozessabläufe | Systematischer Fehler (Fertigungsabweichungen) | zufälliger Fehler (Mess- und Prozessfehler; z.B. Aufnahme-/Ablagegenauigkeiten) |
|--|--|---|
| Fertigungsabweichungen der Bauteile | Kein Einfluss | SELFOC-Linse Bauteilposition wird durch Messung bestimmt und bildet Bezugsposition, d.h. kein Einfluss der Abweichungen SAC-Linse $\Delta x = \pm 2 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 2 \mu\text{m}$ FAC-Linse $\Delta y = \pm 1 \mu\text{m}$ $\Delta z = \pm 3 \mu\text{m}$ |
| Kalibrierung | Kein Einfluss | abh. von der Beleuchtung, dem Setzen der Suchvariablen und der Bewegung des Kalibrierkörpers Fehler bzgl. aller Messwerte im Bereich von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ |
| Messgenauigkeit des Bildverarbeitungssystems | Kein Einfluss | Einfluss auf alle Messwerte von $\pm 1 \mu\text{m}$ und $\pm 0,05^\circ$ |
| Messfehler aufgrund der Beleuchtung | Kein Einfluss | Einfluss auf alle Messwerte von $\pm 1 \mu\text{m}$ und $\pm 0,05^\circ$ |
| Positioniergenauigkeit des Positioniersystems | Kein Einfluss | Einfluss auf Genauigkeit der Korrekturbahn von $\pm 1 \mu\text{m}$ und $\pm 0,05^\circ$ |

Tab. 5.5 Charakterisierung der Prozessschritte hinsichtlich Abweichungen bei der Justierung anhand äußerer Merkmale

Entsprechend der Gleichungen 5.14 und 5.15 lassen sich die einzelnen Einflussgrößen des Prozessablaufes zueinander in Beziehung setzen, um eine ganzheitliche Betrachtung des Montageprozesses zu erreichen. Bezogen auf die ermittelten Werte aus Tab. 5.5 ergeben sich daraus die Gleichungen 5.16 und 5.17:

$$\Delta T_i = \left(\frac{\partial g}{\partial f_1}\right) \Delta f_1 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_2}\right) \Delta f_2 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_3}\right) \Delta f_3 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_4}\right) \Delta f_4 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_5}\right) \Delta f_5 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_6}\right) \Delta f_6 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_7}\right) \Delta f_7 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_8}\right) \Delta f_8 \quad \text{Gl.5.16}$$

$$\Delta T_{\varphi_i} = \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_1}\right) \Delta \varphi_1 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_2}\right) \Delta \varphi_2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_3}\right) \Delta \varphi_3 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_4}\right) \Delta \varphi_4 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_5}\right) \Delta \varphi_5 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_6}\right) \Delta \varphi_6 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_7}\right) \Delta \varphi_7 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_8}\right) \Delta \varphi_8 \quad \text{Gl.5.17}$$

Dabei bezeichnen ΔT_i bzw. ΔT_ϕ die Abweichungen bzgl. der Koordinatenrichtungen und Orientierungen des Bauteils. Die Parameter Δf_1 bis Δf_9 stehen für die in Tab. 5.5 aufgelisteten Einflussgrößen dieses Positionierverfahrens; Δf_1 bis Δf_3 bezeichnen die Maßabweichungen der Bauteile, Δf_4 und Δf_5 den Einfluss der Kalibrierung, Δf_6 den Fehler der Kameras, Δf_7 den zufälligen Fehler der Messgenauigkeit und Δf_8 die Positionierabweichung des Positioniersystems. Zur detaillierten Aufschlüsselung der Einflussgrößen wurden die Berechnungen auch bei diesem Verfahren für jedes Bauteil und jeden Fügenschritt separat durchgeführt. Die dabei ermittelten Abweichungen der jeweiligen Fügenschritte werden in Tab. 5.7 vergleichend mit den Vorgaben des optischen Designs, sowie den Abweichungen der übrigen Montageverfahren dargestellt.

5.5.2 Justierung anhand der optischen Funktion

Entsprechend dem Stand der Technik benutzt die Justierung mikrooptischer Komponenten als Regelgröße das Maximum der Strahlintensität bzw. die Abbildungsqualität. Der in dieser Arbeit untersuchte Demonstrator benutzt als Regelgröße das Maximum der Strahlintensität.

Die für die Untersuchungen entwickelte Justieranordnung beinhaltet als Empfängereinheit ein 2D-Bildverarbeitungssystem zur Aufnahme der Regelgröße. Zur Integration der Anordnung in die automatisierte Montageumgebung mit dem Robotersystem als Justiereinheiten konnte aufgrund des beschränkten Montage-raums kein funktionsgerechter Aufbau realisiert werden. Es wurde daher eine Anordnung entwickelt, die anhand eines Justierstrahls und dessen Intensitätsverhalten eine geeignete Ausrichtung der Komponenten erlaubt. Während des Fügeprozesses werden die Intensitäten aufgenommen, ausgewertet und dem Justierprozess als Regelgröße rückgeführt. Um die erreichbaren Genauigkeiten zu ermitteln, müssen folgende Einflussgrößen auf den gesamten Montageablauf berücksichtigt werden (Abb. 5.10).

- Es ist eine Justierung erforderlich, die sich auf eine Justierbasis bezieht. Hierzu wird die Basiskomponente der Baugruppe (SELFOC-Linse) in einer Halterung fixiert. Diese Halterung dient gleichzeitig der Integration einer Faser, über die die Strahleinkopplung realisiert wird. Der Versatz der Bezugsachse aus SELFOC-Linse und Faser, der aus Fertigungsabweichungen resultiert, ist kleiner als der zufällige Fehler, der sich durch die Reproduzierbarkeit der Linsenklammerung im Montagetisch ergibt und wird für die folgenden Berechnungen vernachlässigt.
- Konform zur Justierung anhand geometrischer Merkmale müssen auch hier die Abweichungen, die durch die Auflösung des Bildverarbeitungssystems bei der Ermittlung der Strahlintensität auftreten, bei den Berechnungen berücksichtigt werden.

Auch für dieses Verfahren werden die auftretenden Montageabweichungen konform zu den Berechnungen in Kap 5.4 bestimmt. Berechnungsgrundlage sind auch hier die durch Messungen ermittelten Abweichungen der Einflussgrößen, die bei den einzelnen Prozessschritten auftreten (s.a. Tab. 5.2 und 5.3). Tabelle 5.6 listet die einzelnen Prozessschritte auf und beschreibt die ermittelten Einflussgrößen nach zufälligen und systematischen Fehlern.

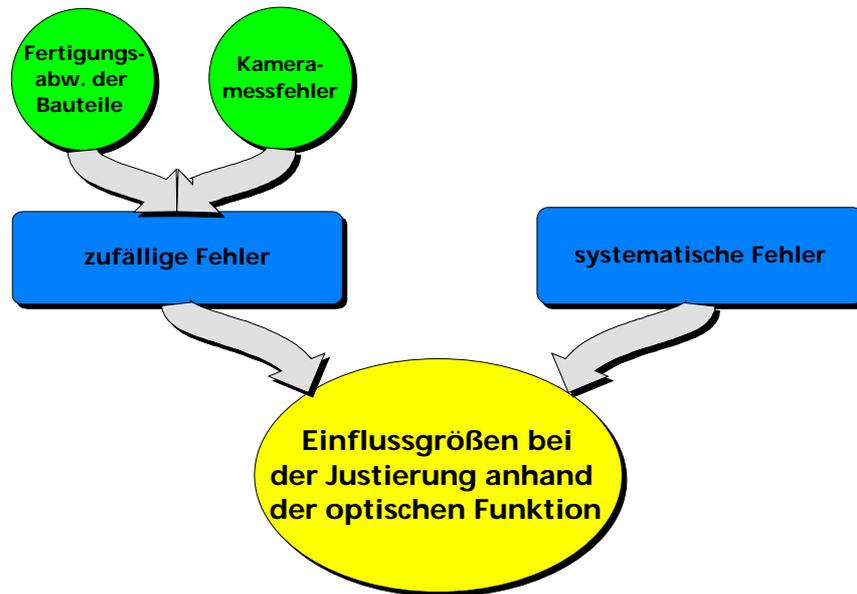


Abb. 5.10 Einflussgrößen auf den Montageprozess bei Justierung anhand der optischen Funktion

| Einflussgrößen / Prozessabläufe | Systematischer Fehler (Fertigungsabweichung) | zufälliger Fehler (Mess- und Prozessfehler) |
|--|--|--|
| Fertigungsabweichungen der Vorrichtungen bzgl. Aufnahmege nauigkeit | Abweichung wird durch Grundausrich tung der Bezugsachse von SELFOC-Linse und Justierstrahl kompensiert | Haltevorrichtung SELFOC-Linse $\Delta x = -2\mu\text{m}$ $\Delta y = \pm 2\mu\text{m}$ $\Delta z = -2\mu\text{m}$ $\Delta \varphi_x = \pm 0,1^\circ$ |
| Aufnahme-/Ablagege nauigkeit der Greifer | Abweichung wird durch Justiervorgang kompensiert | Abweichung wird durch Justiervorgang kompensiert |
| Messge nauigkeit des Bildverarbeitungs systems | Kein Einfluss | Einfluss auf alle Messwerte von $\pm 0,5\mu\text{m}$ |

Tab. 5.6 Charakterisierung anhand der Prozessschritte hinsichtlich Abweichungen bei der Justierung anhand der optischen Funktion

Die einzelnen Einflussgrößen dieses Justierprozesses werden nach den Gleichungen 5.11 bis 5.13 zueinander in Beziehung gesetzt, um eine ganzheitliche Betrachtung des Montageprozesses zu erreichen. Bezogen auf die Einflussgrößen aus Tab. 5.6 ergeben sich daraus die Gleichungen 5.18 und 5.19:

$$\Delta T_i = \left(\frac{\partial g}{\partial f_1} \right) \Delta f_1 + \left(\frac{\partial g}{\partial f_2} \right) \Delta f_2 \quad \text{Gl.5.18}$$

$$\Delta T_{\varphi_i} = \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_1} \right) \Delta \varphi_1 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varphi_2} \right) \Delta \varphi_2$$

Gl.5.19

Dabei bezeichnen ΔT_i bzw. ΔT_{φ_i} die Abweichungen bzgl. der Koordinatenrichtungen und Orientierungen des Bauteils. Die Parameter Δf_1 und Δf_2 stehen für die in Tab. 5.6 aufgelisteten Einflussgrößen dieses Positionierverfahrens; Δf_1 bezeichnet die Maßabweichungen der Vorrichtung zur Halterung der SELFOC-Linse, Δf_2 den Messfehler der Kameras. Zur detaillierten Aufschlüsselung der Einflussgrößen die Berechnungen für jedes Bauteil und jeden Fügenschritt separat durchgeführt. Die dabei ermittelten Abweichungen der jeweiligen Fügenschritte werden in Tab. 5.7 vergleichend mit den Vorgaben des optischen Designs, sowie den Abweichungen der übrigen Montageverfahren dargestellt.

5.6 Vergleich der theoretisch ermittelten Abweichungen mit den Vorgaben des Systems

Vergleicht man die Anzahl der auftretenden Abweichungen für die in dieser Arbeit untersuchten Montageprozesse, erkennt man deutliche Unterschiede. Diese wirken sich auf die theoretisch erreichbaren Fügegenauigkeiten der Prozesse aus. Die vorgestellten Berechnungen der Montageabweichungen wurden diesbezüglich auf die jeweiligen Gesamtprozesse angewandt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen bestätigen die Unterschiede in den theoretisch erreichbaren Montagegenauigkeiten und sind in Tab. 5.7 zusammengefasst.

| Prozessschritt | Vorgaben des optischen Designs | Positionierung mit Vorrichtungen | Justierung anhand äußerer Merkmale | Justierung anhand der optischen Funktion |
|--|---|--|--|--|
| 1. Ablage der SELFOC-Linse [μm bzw. $^\circ$] | $\Delta T_x = \pm 4$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 3$ $\Delta T_{\varphi_x} = 0,3^\circ$ $\Delta T_{\varphi_y} = 0,3^\circ$ $\Delta T_{\varphi_z} = 0,3^\circ$ | $\Delta T_x = +5 / -1$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = -2$ $\Delta T_{\varphi_z} = 0,1^\circ$ | dient als Referenz für Folgemessungen | $\Delta T_x = -2$ $\Delta T_y = -2$ $\Delta T_z = -2$ $\Delta T_{\varphi_x} = \pm 0,01^\circ$ $\Delta T_{\varphi_y} = \pm 0,01^\circ$ $\Delta T_{\varphi_z} = \pm 0,01^\circ$ |
| 2. Fügen der SAC-Linse [μm bzw. $^\circ$] | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 7$ $\Delta T_{\varphi_x} = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T_{\varphi_y} = \pm 0,13^\circ$ $\Delta T_{\varphi_z} = \pm 3^\circ$ | $\Delta T_x = 0 / -4$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = +1 / -3$ $\Delta T_{\varphi_x} = 0,2^\circ$ $\Delta T_{\varphi_y} = 0,1^\circ$ $\Delta T_{\varphi_z} = 0,1^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 4,5$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 5,5$ $\Delta T_{\varphi_x} = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T_{\varphi_y} = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T_{\varphi_z} = \pm 0,1^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 0,5$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 3$ $\Delta T_{\varphi_i} = \pm 0,1^\circ$ (kann nur indirekt erfasst werden) |
| 3. Fügen der FAC-Linse [μm bzw. $^\circ$] | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta T_{\varphi_x} = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T_{\varphi_y} = \pm 0,13^\circ$ $\Delta T_{\varphi_z} = \pm 4^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = +0 / -2$ $\Delta T_z = +2 / -4$ $\Delta T_{\varphi_x} = 0,1^\circ$ $\Delta T_{\varphi_y} = 0,5^\circ$ $\Delta T_{\varphi_z} = 0,4^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 5,5$ $\Delta T_z = \pm 6,5$ $\Delta T_{\varphi_x} = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T_{\varphi_y} = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T_{\varphi_z} = \pm 0,1^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 0,5$ $\Delta T_z = \pm 3$ $\Delta T_{\varphi_i} = \pm 0,1^\circ$ (kann nur indirekt erfasst werden) |

| Prozessschritt | Vorgaben des optischen Designs | Positionierung mit Vorrichtungen | Justierung anhand äußerer Merkmale | Justierung anhand der optischen Funktion |
|--|--|---|---|--|
| 4. Gesamtbaugruppe [μm bzw. $^\circ$] | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 15$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,6^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,26^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 4^\circ$ | $\Delta T_x = +5 / -3$ $\Delta T_y = -4 / -14$ $\Delta T_z = +1 / -9$ $\Delta T\phi_x = 0,6^\circ$ $\Delta T\phi_y = 0,4^\circ$ $\Delta T\phi_z = 0,5^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 5,5$ $\Delta T_y = \pm 4,5$ $\Delta T_z = \pm 12$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,2^\circ$ | $\Delta T_x = -1 / -3$ $\Delta T_y = -1 / -3$ $\Delta T_z = \pm 6$ $\Delta T\phi = \pm 0,3^\circ$ (kann nur indirekt erfasst werden) |

Tab. 5.7 Vergleich der berechneten Montageabweichungen mit den Vorgaben des optischen Designs

Der Vergleich der einzelnen Abweichungen in Tab. 5.7 zeigt, dass die Vorgaben des optischen Designs und damit die Funktion des mikrooptischen Systems mit einer Koppelleffizienz größer 80% nicht mit allen Verfahren erreicht werden können. Zur Charakterisierung der Beziehung zwischen der Funktion der Baugruppe und den auftretenden Einflussgrößen des Montageprozesses wurden mit Hilfe der Strahlrechnungssoftware ZEMAX[®] zusätzlich Simulationen durchgeführt. Die Abb. 5.11 bis 5.14 zeigen das Ergebnis dieser Simulationen bzgl. des Einflusses lateraler Abweichungen und Verkippungen der Systemkomponenten. Aufgrund der Komplexität des Demonstratoraufbaus und der verwendeten optischen Komponenten kann diese Simulation aber lediglich die Abweichung des Systems bzgl. eines Fehlereinflusses korrekt darstellen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die übrigen Komponenten des optischen Systems frei von Abweichungen sind.

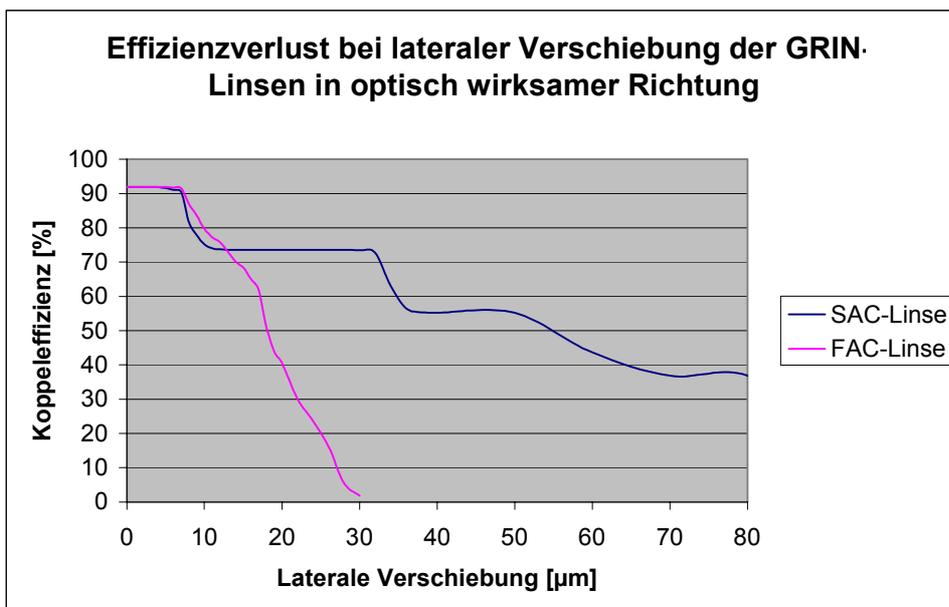


Abb. 5.11 Abnahme der Koppelleffizienz bei lateraler Verschiebung der GRIN-Linsen

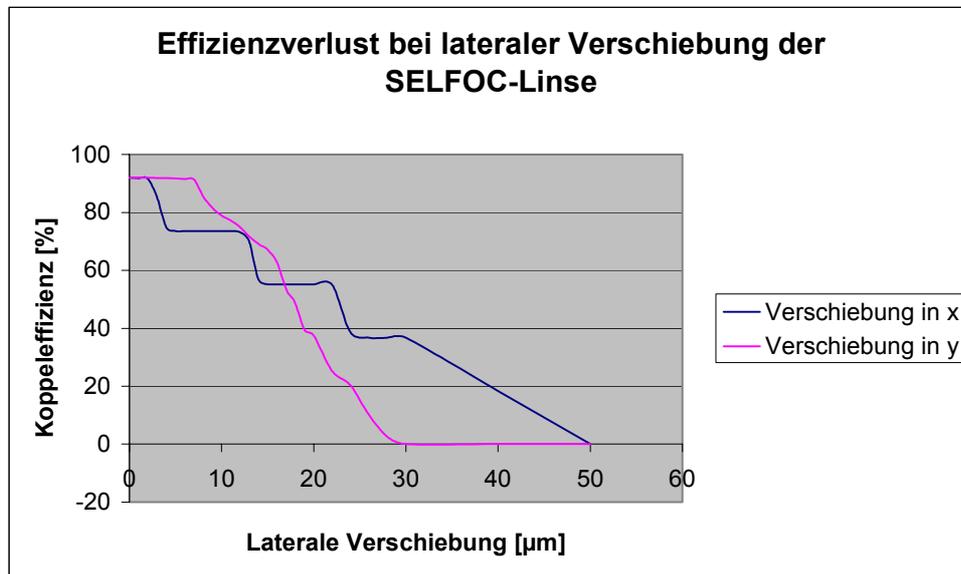


Abb. 5.12 Abnahme der Koppeleffizienz bei lateraler Verschiebung der SELFOC-Linse

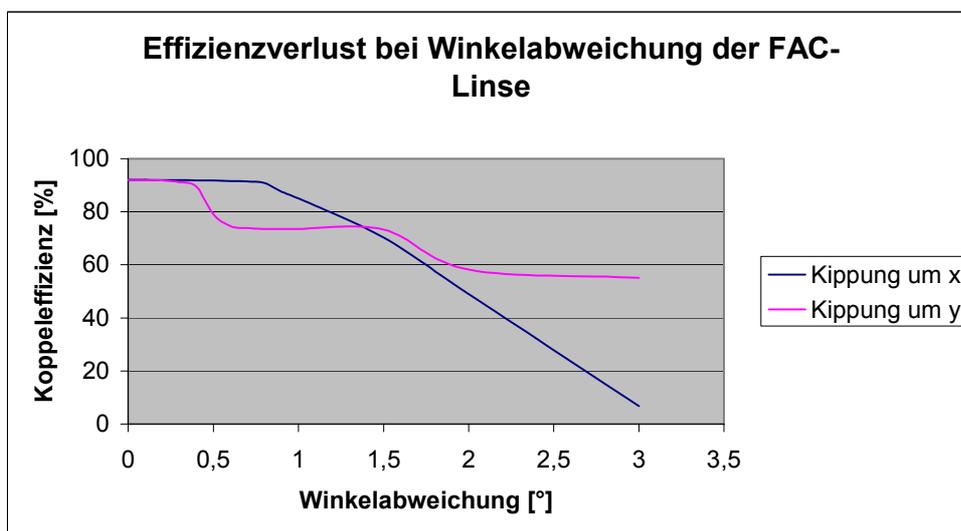


Abb. 5.13 Abnahme der Koppeleffizienz bei Winkelabweichung der FAC-Linse

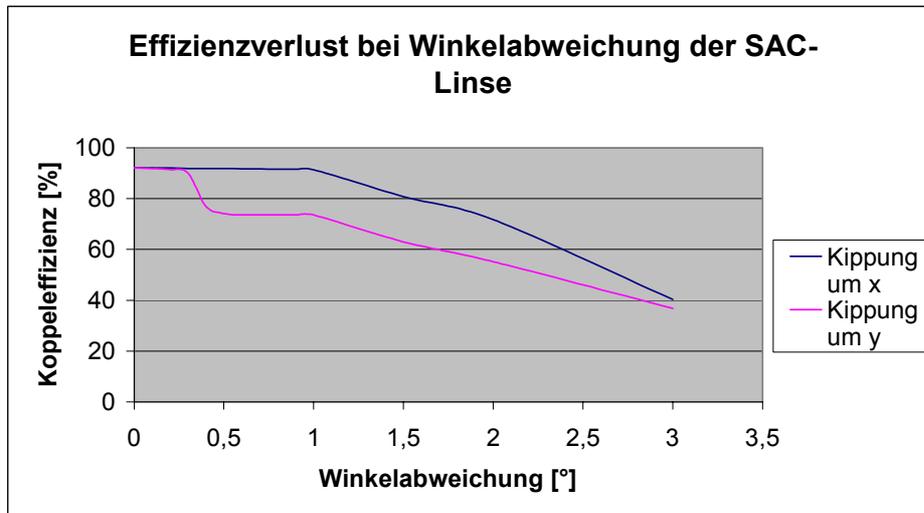


Abb. 5.14 Abnahme der Koppeffizienz bei Winkelabweichung der SAC-Linse

Aus diesen Bildern ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Das optische System ist gegenüber den verschiedenen Arten der Fehllagen in einem Bereich von ca. 3-7 μ m und ca. 0,4-1° unempfindlich und genügt seiner Funktion. Die Kurve verläuft in diesem Bereich linear bis zu einem definierten Grenzwert. Beim Überschreiten dieses Grenzwertes werden die Funktionsparameter reduziert.
- Diese Funktionsreduzierung ist abhängig von der Ausrichtung der Systemkomponenten bzgl. der SAC- und der FAC-Linse und deren optischer Funktion und kann anhand von zwei unterschiedlichen Kurvenverläufen beschrieben werden.
 - Bei Abweichung eines Bauteils in der optisch wirksamen Koordinatenrichtung der FAC-Linse fällt die Koppeffizienz der Baugruppe stark ab.
 - Im Gegensatz dazu verläuft der Abfall der Koppeffizienz bei Abweichung in der für die SAC-Linse optisch wirksamen Koordinatenrichtung stufenförmig. Dabei wechseln sich Bereiche ab, in denen die Koppeffizienz stark abfällt bzw. über einen Bereich der Abweichung konstant bleibt.

Diese Ergebnisse lassen sich durch den Systemaufbau erklären. Die Laserquelle, eine Breitstreifenlaserdiode, besteht aus fünf emittierenden Zentren, die innerhalb des optischen Designs idealisiert durch fünf Einzelstrahlen dargestellt werden. Bei optimaler Justierung des Gesamtsystems ergibt sich in der als Blende ausgelegten Stirnfläche der Einkoppeffaser das Bild dieser fünf Strahlen nach Abb. 5.15. Bei Dejustierung einzelner Komponenten erfolgt eine horizontale bzw. vertikale Ablenkung dieser Strahlen nach Abb. 5.16 und 5.17. Aufgrund der Unterschiede bezogen auf die Art der Dejustierung ergibt sich eine differenzierte Drift dieser Strahlen aus der Einkoppeffläche des Faserquerschnitts heraus, die durch die Bilder der Abb. 5.11 bis 5.14 wiedergegeben werden.

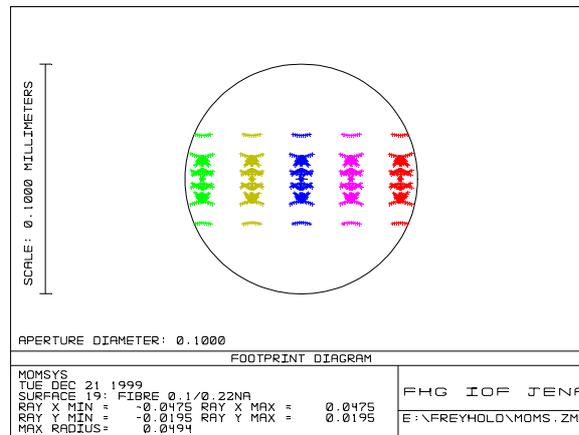


Abb. 5.15 Intensitätsverteilung bei fehlerfreier Montage der Baugruppe

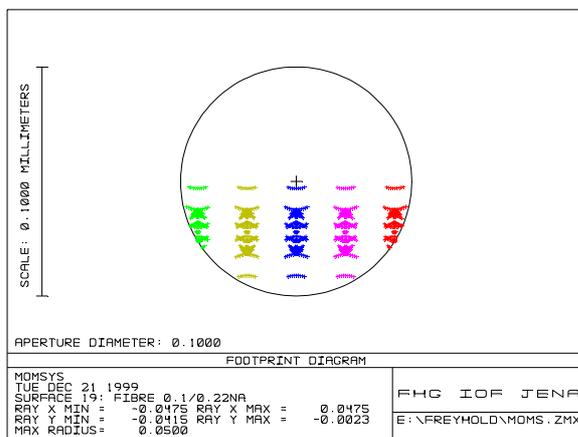


Abb. 5.16 Vertikale Drift der Intensitätsverteilung

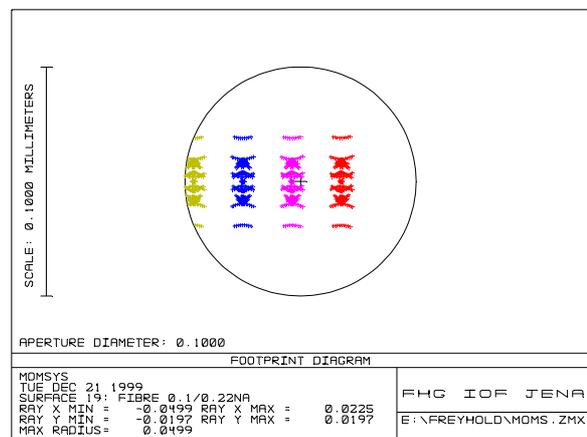


Abb. 5.17 Horizontale Drift der Intensitätsverteilung

Zur Beurteilung des gesamten Montageprozesses ist die Überlagerung der unterschiedlichen Fehlereinflüsse maßgebend. Diese Simulation ist für das Simulationsmodell zur Messung der Einzelabweichungen fehlerbehaftet, da sich die Gradientenprofile der GRIN-Linsen bzgl. höherer Ordnungen mit Hilfe des Programms nicht generieren lassen. Zur Berechnung der Koppeffizienz bzgl. der im gesamten Montageprozess auftretenden Abweichungen wurde daher ein idealisiertes Simulationsmodell verwendet, bei dem die GRIN-Linsen durch konventionelle Optiken gleicher Funktion ersetzt wurden. Abb. 5.18 und Tab. 5.7 zeigen die theoretisch erreichbaren Koppeffizienzen, wenn man die theoretisch berechneten Abweichungen, die sich bzgl. der verschiedenen Montageprozesse ergeben, in dieses idealisierte Modell einsetzt. Die Darstellung der Fügeschritte eins und zwei dient zur Veranschaulichung der Verluste innerhalb der einzelnen Prozessschritte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Werte auf ein fehlerfrei montiertes Restsystem der mikrooptischen Baugruppe beziehen.

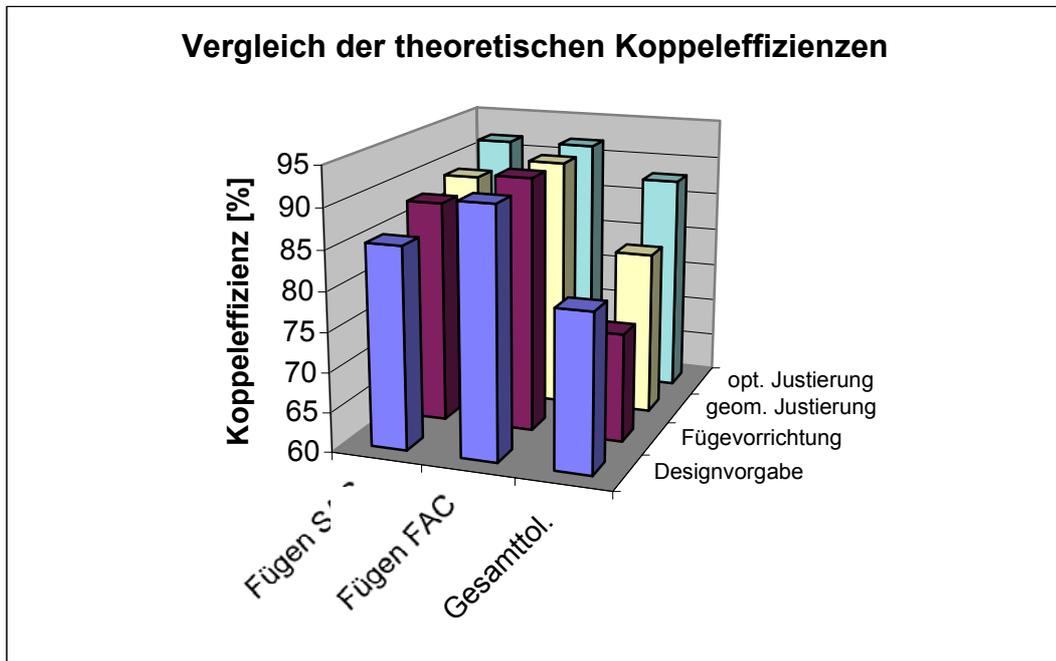


Abb. 5.18 Vergleich der theoretisch erreichbaren Koppelleffizienzen bzgl. Fügestritt und Justierverfahren (s. Tab. 5.7)

| Prozessschritt | Vorgaben des optischen Designs für KE=80% | Positionierung mit Vorrichtung | Justierung anhand der Geometrie | Justierung anhand der optischen Funktion |
|------------------------|---|--------------------------------|---------------------------------|--|
| 1. Fügen der SAC-Linse | KE=85,4% | KE=88,0% | KE=89,1% | KE=91,9% |
| 2. Fügen der FAC-Linse | KE=91,7% | KE=91,7% | KE=91,7% | KE=91,7% |
| 3. Gesamtaufbaugruppe | KE=80,0% | KE=73,7% | KE=80,7% | KE=88,0% |

Tab. 5.8 Vergleich der theoretisch ermittelten Koppelleffizienzen mit den Vorgaben des optischen Designs

6 Experimentelle Untersuchungen

Im folgenden werden die theoretischen Ergebnisse der Fehlerrechnung experimentell untersucht. Die in dieser Arbeit entwickelten Experimentalaufbauten, die den Berechnungen der Einflussgrößen aus Kapitel 5 zugrunde liegen, werden beschrieben, die durch die Experimente erzielten Ergebnisse mit denen der theoretischen Berechnungen verglichen und die Einsatzmöglichkeiten der untersuchten Lösungen in automatisierten Montageprozessen diskutiert.

6.1 Experimenteller Aufbau der Montageumgebung /-peripherie

6.1.1 Positioniersystem

Als Positioniersystem wurde ein Präzisions-Sechs-Achsen-Knickarmroboter (Abb. 6.1) eingesetzt. Dieses System gewährleistet die durch das optische Design geforderten Positioniergenauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer.



Abb. 6.1 Präzisions-Sechs-Achsen-Knickarm-Roboter

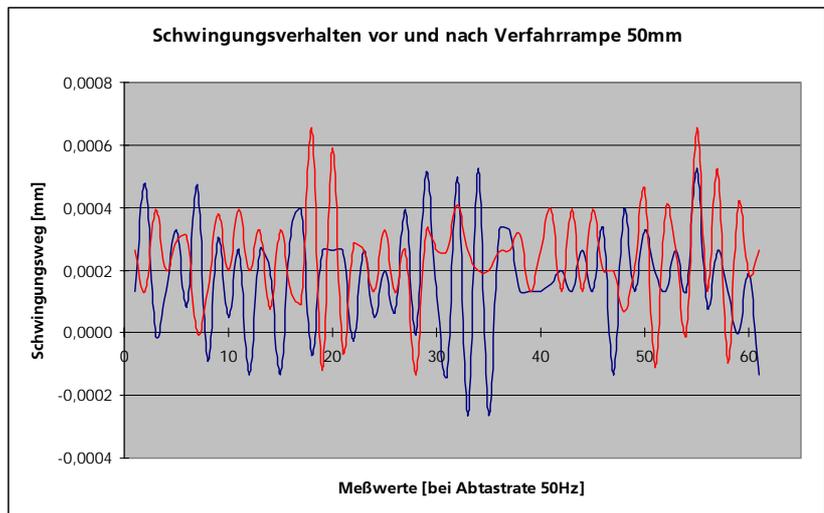


Abb. 6.2 Interferometermessungen zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit des Positioniersystems

Zur Verifizierung dieser Genauigkeiten und zur Bestimmung der Systemabweichungen für die theoretischen Berechnungen wurde die Wiederholgenauigkeit des Robotersystems durch Messungen mit einem Interferometeraufbau für die verschiedenen Koordinatenrichtungen nachgewiesen. Abb. 6.2 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen für eine Koordinatenrichtung, wobei die vorgegebene Position nach einer Einschwingphase mit einer Genauigkeit von weniger als $\pm 1\mu\text{m}$ erreicht wird. Ein Vorteil gegenüber aus Linearsachsen aufgebauten Positioniersystemen (Kap. 2) ist der große Arbeitsbereich des Roboters ($0,5\text{-}1\text{m}^3$), der mit dieser Genauigkeit abgedeckt werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Realisierung definierter Eingriffswinkel innerhalb des Montageprozesses zur Gewährleistung von Korrekturbahnen in allen sechs Freiheitsgraden.

6.1.2 Magazinierung

Nach Abb. 2.1 ist die Bauteilzuführung ein wichtiger Prozess des Montageablaufes. Diese soll allgemein gewährleisten, dass die Bauteile in geordneter Form und beschädigungsfrei an den Montageort herangeführt werden. Die Zuführung mikrooptischer Bauteile unterliegt aufgrund der Bauteilempfindlichkeit besonderen Forderungen. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurde ein Magazin entwickelt (Abb. 2.9), das folgende Gestaltungsmerkmale aufweist:

- Die Aufnahmen des Magazins wurden an die Geometrie der zylindrischen und quaderförmigen Bauteile des Demonstrators angepasst und definiert in einen Grundkörper eingebracht. Die Bauteile liegen auf Stegen auf, die sich außerhalb der optisch aktiven Bereiche befinden. Hierdurch werden diese Bereiche vor Beschädigungen geschützt.
- Der Magazingrundkörper wurde aus der Glaskeramik MACOR[®] hergestellt [39,78]. Dieses Material gewährleistet eine spanende Mikrobearbeitung zur Herstellung hochgenauer und gratfreier Strukturen. Die Positionen der Aufnahmen und Anschlagpunkte innerhalb des Magazinrasters sowie die Auflagestrukturen wurden mit Abweichungen $<5\mu\text{m}$ gefertigt.
- Die Magazine sind sowohl manuell als auch automatisiert einfach zu bestücken, da die Aufnahmen ein Spiel von $+0.05\text{mm}$ gegenüber den Bauteilabmessungen aufweisen. Diese Lageorientierung der Bauteile ist ausreichend für eine sichere und positionsgenaue Aufnahme im Greifer, der aufgrund seines Greifprinzips in der Lage ist, die verbleibende Lageungenauigkeit des Bauteils im Magazin auszugleichen.
- Die Außenabmessungen des verwendeten Magazins sind an das Chip-Tray-Format der Mikroelektronik angelehnt, so dass das Aufnahmeprinzip einfach auf Bauteile, Peripherie und Prozesse dieses Anwendungsbereichs zu übertragen ist.

6.1.3 Werkzeugwechsellvorrichtung

Für die automatisierte Montage von drei unterschiedlichen Systemkomponenten ist der Einsatz von verschiedenen Werkzeugen erforderlich. Aus diesem Grund wurde ein modular gestaltetes

Revolverkopfsystem entwickelt, mit dem ein schnelles, einfaches und positionsgenaues Wechseln von bis zu sieben Werkzeugen möglich ist [79]. Der Austausch der Werkzeuge am Revolverkopf erfolgt mechanisch über eine Führung und einen Anschlag (Abb. 6.3). Der Revolverkopf ist mit Hilfe einer mechanischen Aufnahme und einer Magnethalterung direkt mit der äußeren Drehachse des Roboters verbunden. Die einzelnen Werkzeuge werden über eine Lehre zum Mittelpunkt der Drehachse ausgerichtet, so dass sich das für den Montageprozess benötigte Werkzeug mit der Positioniergenauigkeit des Roboters von wenigen Mikrometern innerhalb des Montage-raums bewegen lässt. Abb. 6.4 zeigt den entwickelten Revolverkopf, der mit den für den Montageprozess benötigten Greif- und Dosierwerkzeugen bestückt ist.

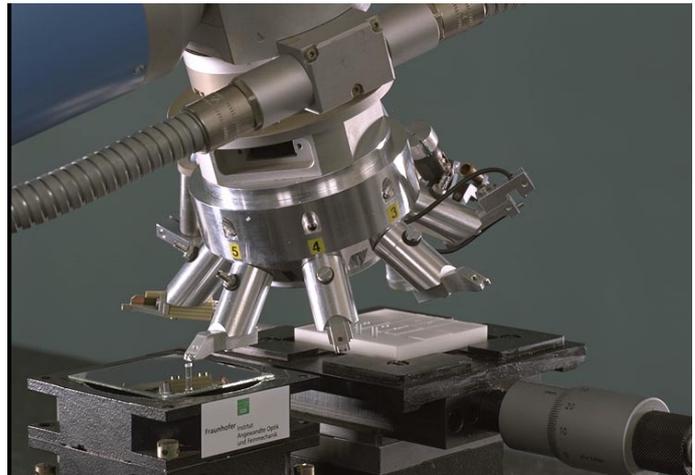
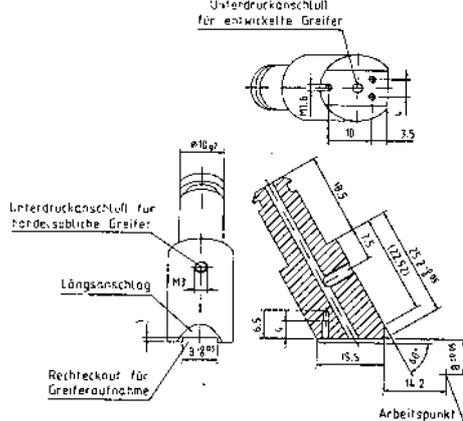


Abb. 6.3 Schematischer Aufbau der Greiferaufnahme [79]

Abb. 6.4 Revolverkopfsystem mit Aufnahmen für sieben Werkzeuge

6.1.4 Greifwerkzeuge

Für die Untersuchungen wurde eine Generation von Vakuumgreifern entwickelt (Abb. 6.5). Diese weisen folgende Gestaltungsmerkmale auf, um die zulässigen Abweichungen des optischen Designs und des Montageprozesses einzuhalten:

- Ausgehend von der Teilebereitstellung im Magazin mit einer Genauigkeit von 0,05 mm wird eine Positionierung der Bauteile im Greifer mit Abweichungen von $\pm 2\text{-}3\mu\text{m}$ erreicht (in den für die optische Funktion maßgebenden Dimensionen). Beim Absetzen der Bauteile am Fügeort werden die Adhäsionskräfte zwischen Bauteil und Greifwerkzeug durch das Einbringen in ein Klebstoffbett kompensiert, so dass die Bauteilposition erhalten bleibt.
- Zur Realisierung dieser Aufnahmegenauigkeit und der Orientierung der Bauteile im Greifer wurden Anschläge und Saugkanäle in die Greifstruktur eingebracht, so dass die Bauteile in Richtung der Bezugsachse der Komponenten und in der optisch maßgebenden Koordinate der GRIN-Linsen reproduzierbar aufgenommen werden (Abb. 6.6). Eine Zentrierung der GRIN-Linsen in der dritten Koordinatenrichtung ist für die optische Funktion der Baugruppe nicht notwendig.

- Die Greifflächen wurden montagegerecht als zwei winkelförmige Greiffinger mit kleiner Greiffläche gestaltet, wodurch folgende Randbedingungen erfüllt werden.
- Der Greifer nimmt das Bauteil außerhalb der optisch aktiven Bereiche auf. Dies wird durch ein montagegerechtes Design der Linsen gewährleistet, die über ausreichende Greifflächen verfügen. Hierdurch werden Beschädigungen oder Verunreinigungen der aktiven Bereiche beim Greifen der Linsen vermieden.
- Die Beobachtbarkeit der Bauteile im Montageprozess wird durch die kleinen Greifflächen gewährleistet.
- Diese Gestaltung der Greifflächen dient zusätzlich der Reduzierung der Adhäsionskräfte zwischen Greifer und Bauteil, wodurch ein definiertes Absetzen der Mikrobauteile am Fügeort selbst bei geringem Eigengewicht realisiert wird.
- Für verschiedene Montageschritte, wie z.B. das Einstellen der Klebschichtdicke, ist eine definierte Kraft in Fügerichtung nötig. Dazu wurde in die Greifer der GRIN-Linsen nach Abb. 6.6 ein Kraftsensor zum Erfassen statischer Kräfte vorgesehen. Hierfür wurde die balkenförmige Struktur des Greifers über eine definierte Schwächung des Körpers zum Biegebalken umgestaltet und mit Dehnmessstreifen ausgestattet [80,81]. Mit dieser Konstruktion können die für den Fügeprozess erforderlichen statischen Kräfte im mN-Bereich gemessen werden.

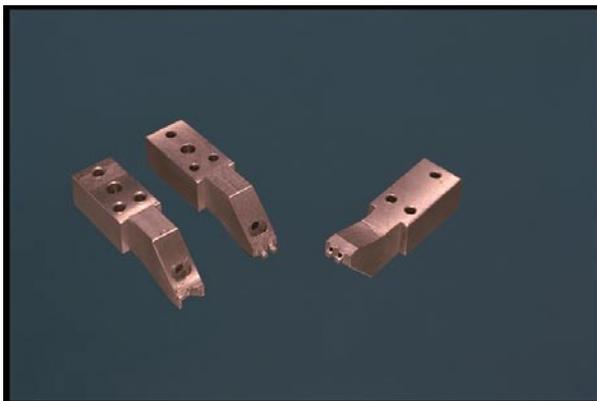


Abb. 6.5 Vakuumbreifer mit formangepassten, selbstzentrierenden Aufnahmen

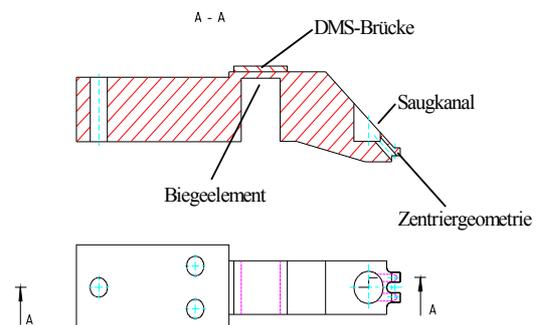


Abb. 6.6 Integration eines Kraftsensors in die Sauggreifer [80]

6.1.5 Montageplattform

Zur Montage bzw. Justierung der Komponenten und Baugruppen wird ein fester Bezug bzw. eine Justierbasis benötigt. Für die Untersuchungen wurde als Justierbasis eine Montageplattform (Abb. 6.7) entwickelt, die folgende Forderungen gewährleisten soll:

- die definierte Aufnahme der SELFOC-Linse bzw. des Montagegrundkörpers, die gleichzeitig die Justierbasis für die Fügeprozesse darstellt, und
- das Vermeiden von Beschädigungen und Verschmutzungen der optisch aktiven Bereiche bei der Aufnahme der SELFOC-Linse.

Die Umsetzung dieser Forderungen beinhaltet folgende Lösungen:

- Zum Vermeiden von Beschädigungen wurde die Aufnahmegrundfläche der SELFOC-Linse entsprechend der Magazinaufnahmen gestaltet. Dabei liegt die Linse auf einer Ringfläche außerhalb des optisch aktiven Bereiches auf.
- Das Fixieren der SELFOC-Linse in der Aufnahme erfolgt über ein Spannen der Linse an drei Punkten. Hierbei wird die Linse bzgl. einer feststehenden Vorrichtung abgesetzt, die aus einer V-Nut besteht und zwei der drei Klemmpunkte darstellt. Gespannt wird die Linse durch eine zweite, bewegliche Backe. Diese Backe lässt sich über ein Festkörpergelenk und einen Pneumatikzylinder bewegen.

Die Aufnahmegenaugigkeit der SELFOC-Linse, die durch diese Klemmvorrichtung realisiert wird, beträgt $\pm 2\mu\text{m}$ bei einer Fertigungsabweichung der Linsendurchmesser von $\pm 3\mu\text{m}$. Diese Genauigkeit wurde durch eine hochgenaue Bearbeitung der V-Nut-Aufnahme erreicht. Als Material wurde wegen der guten Bearbeitungseigenschaften wieder die Glaskeramik MACOR[®] verwendet.

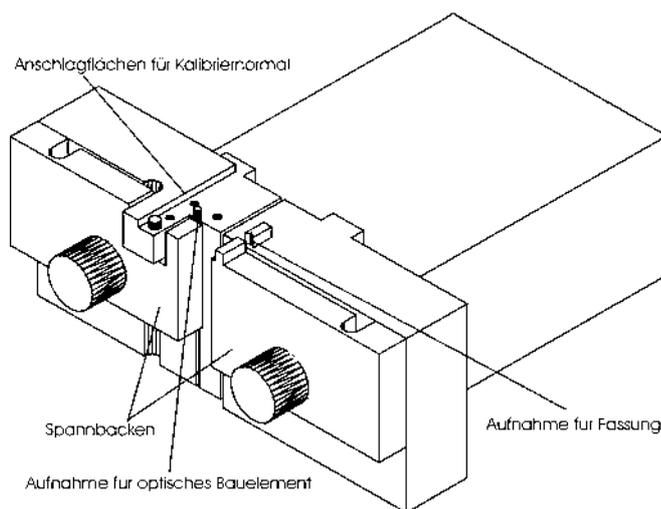


Abb. 6.7 Schematische Darstellung des Montagetisches

6.2 Experimentelle Versuchsstände zur Beurteilung der Montageprozesse

Für die Untersuchungen der vorgestellten Lösungen innerhalb automatisierter Montageprozesse wurde jeweils ein Experimentalaufbau entwickelt und in die Montageumgebung eingebracht.

6.2.1 Positionierverfahren mit Hilfe von Fügevorrichtungen

Zur Beurteilung dieses Verfahrens wurden Vorrichtungen entwickelt, die folgende Forderungen erfüllen sollen:

- Entwicklung von Fügevorrichtungen mit definierten Geometrien (negative Bauteilkontur) und Anschlägen zur positionsgenauen Aufnahme der Fügekomponenten.
- Vermeiden von Beschädigungen der Bauteile durch geeignete Konstruktion der Aufnahme- und Anlageflächen der Fügevorrichtung.
- Einbau von Klebstofffallen, um das Verschmutzen der Vorrichtung durch überlaufenden Klebstoff zu vermeiden.
- Gewährleisten der Zugänglichkeit der Montagewerkzeuge (Greifer, Dosiergerät) beim Fügeprozess zum definierten Einstellen der Klebschichtdicke.
- Einsatz geeigneter Prinzipien zur Positionsunterstützung während des Montageprozesses, um eine definierte Lage und Orientierung der Fügekomponenten zu realisieren.

Anhand dieser Forderungen wurde ein Konstruktionskatalog [83] erstellt, der verschiedene Lösungsprinzipien für Fügevorrichtungen in der automatisierten Mikromontage enthält. Als Bewertungskriterien zur Auswahl eines für den Anwendungsfall geeigneten Lösungsprinzips wurden die Miniaturisierbarkeit, geeignete Fertigungsprozesse, die Eignung für komplexe Baugruppen, die Kosten und die industrielle Einsetzbarkeit der Vorrichtungen festgelegt. Aus diesen Bewertungen ergibt sich folgende Vorrichtungskonzeption:

- Wegen der geforderten Genauigkeiten sollte die Vorrichtung aus einem Bauteil gefertigt werden. Aufgrund der komplexen Gestalt des Demonstratorsystems eignen sich zur Fertigung der Aufnahmekonturen insbesondere spanabhebende Bearbeitungsverfahren.
- Um Beschädigungen der optischen Flächen zu reduzieren, wurde für die Vorrichtung die Glaskeramik MACOR[®] verwendet. Diese gewährleistet eine besonders gratfreie mechanische Bearbeitung.
- Die Bauteile werden in der Vorrichtung mittels Vakuumtechnik fixiert. Die Vorteile dieses Wirkprinzips liegen in dessen einfacher Integration in miniaturisierte Einheiten mit begrenztem Bauraum.
- Das Verschmutzen der Vorrichtung durch überlaufenden Klebstoff wird vermieden, indem die Anschlag- und Anlageflächen der Fügekomponenten außerhalb der klebstofftragenden Flächen liegen. Hierbei ist die für den Greifprozess vorgenommene Überdimensionierung der SAC- und FAC-Linse (montagegerechtes Design) von Vorteil.
- Die Zugänglichkeit der Montagewerkzeuge im Montageprozess wird durch den Aufbau der Aufnahmekontur und der Anordnung der Anschlagflächen gewährleistet. Dadurch können die Bauteile von zwei Seiten in der Vorrichtung abgelegt werden (Abb. 6.8).

Die Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigen den schematischen Aufbau der entwickelten Vorrichtung und als Detailansicht die Aufnahme- und Anschlagkonturen. Die Fertigungsabweichungen, die bei der Herstellung solcher Vorrichtungen durch konventionelle Mikrobearbeitung erreicht werden können, liegen im Bereich $<5\mu\text{m}$. Für die Fehlerrechnung des gesamten Montageprozesses wurden die gefertigten Vorrichtungen bzgl. der Bauteilposition und -orientierung innerhalb der Vorrichtung mit Hilfe eines Abbe-Komparators vermessen. In Tabelle 5.3 sind die Fertigungsgenauigkeiten und die daraus resultierenden Lageabweichungen der Bauteile gegenüber der durch das optische Design vorgegebenen Idealposition dargestellt.

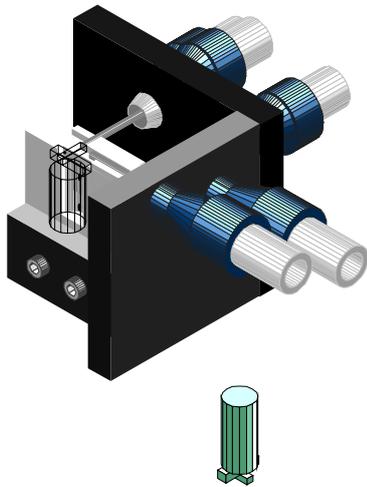


Abb. 6.8 schematischer Aufbau der Fügevorrichtung

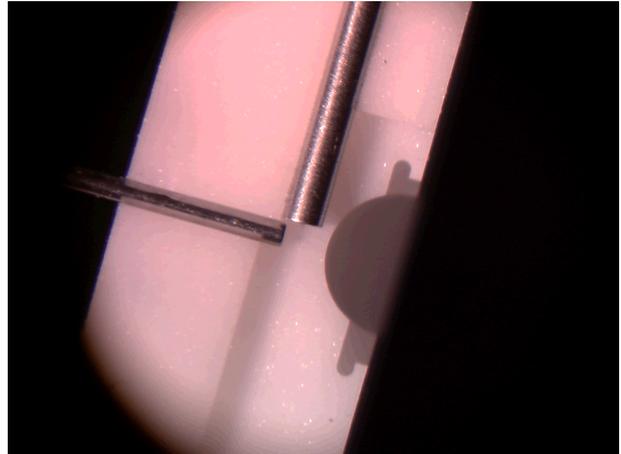


Abb. 6.9 Detailansicht der gefertigten Fügevorrichtung mit Aufnahmekonturen

Die entwickelte Vorrichtung ist nach Abb. 6.8 über eine mechanische Aufnahmevorrichtung in der automatisierten Montageumgebung angeordnet worden. In dieser Skizze ist auch der Saugmechanismus angedeutet, mit dem die Fügekomponenten in der Vorrichtung gesichert werden. Die Aufnahmen aller Komponenten sind konstruktiv so gestaltet, dass die Bauteile über Saugkanäle an den positionsbestimmenden Anschlägen ausgerichtet werden. Diese Kanäle werden über Schlauchverbindungen mit Saugventilen verbunden. Zur Aufnahme der FAC-Linse in der Vorrichtung werden die Anschläge durch Saugkanülen unterstützt, die in die Vorrichtung eingebaut wurden (Abb. 6.9). Die Vorrichtung ist so ausgelegt, dass die beschriebenen Greifwerkzeuge auch für dieses Verfahren eingesetzt werden können. Die Unterstützung der Positionierung durch den Saugmechanismus der Vorrichtung gleicht Ungenauigkeiten des Absetzvorganges durch das Positioniersystem in einem Bereich von $\pm 10\mu\text{m}$ aus. Um Verschmutzungen der Fügevorrichtung zu vermeiden, sollte der Klebstoffauftrag definiert in Position und Volumen erfolgen. Dies wird durch den Einsatz eines Dosiersystems der Firma Microdrop [82] gewährleistet, das reproduzierbare Klebstoffvolumina im pl-Bereich erzeugt.

Der automatisierte Montageprozess unter Einsatz der entwickelten Fügevorrichtung gestaltet sich für den vorliegenden Demonstrator wie folgt:

1. Die SELFOC-, SAC- und FAC-Linse werden in einem Pick-and-Place-Verfahren nacheinander von den vorgestellten Sauggreifern zentriert und positionsgenau aus dem Magazin entnommen.
2. Der Roboter schwenkt bestückt zur Fügevorrichtung und setzt die SELFOC-Linse in die Aufnahme ab. Aufgrund des integrierten Saugmechanismus wird die Linse in der Vorrichtung positionsgenau aufgenommen.
3. Der in den Revolver eingebaute Dosierkopf wird über der Linse positioniert und appliziert eine definierte Menge Klebstoff auf der Oberfläche der SELFOC-Linse. Das benötigte Dosiervolumen errechnet sich aus der Fügefläche und dem vorgegebenen Klebspalt.

4. Im nächsten Schritt wird die SAC-Linse in der Vorrichtung abgelegt und entsprechend der SELFOC-Linse über den Saugmechanismus und die integrierten Anschlagkanten in der Vorrichtung nachpositioniert (Abb. 6.10). Der Greifer mit integrierter Kraftsensorik drückt die Linse anschließend definiert in das Klebstoffbett, um die vorgegebene Klebschichtdicke einzustellen. Abschließend wird der Klebstoff mit UV-Strahlung ausgehärtet.
5. In den Folgeschritten werden Klebvorgang, Bauteilablage, Positionierung und Aushärtevorgang für die FAC-Linse wiederholt. Dabei wird die Linse aufgrund der optischen Funktion um 90° gedreht gefügt.

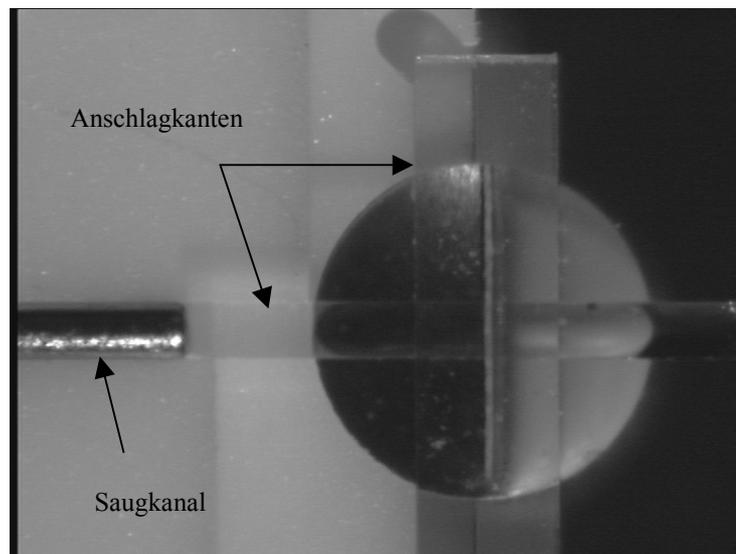


Abb. 6.10 Fügekomponenten, die durch Anschläge und Positioniermechanismen in der Fügevorrichtung ausgerichtet werden

6.2.2 Justierung anhand charakteristischer Konturmerkmale

Für die Untersuchungen dieses Verfahrens wurde in dieser Arbeit eine Justieranordnung basierend auf einem 3D-Bildverarbeitungssystem entwickelt und in die Montageumgebung integriert. Diese Anordnung soll der Charakterisierung bildverarbeitender Verfahren für die Mikromontage dienen, bei der zunehmend dreidimensionale Informationen für den Montageprozess benötigt werden. Das Bildverarbeitungssystem, das für diese Untersuchungen eingesetzt wurde, wurde innerhalb des öffentlichen Verbundprojekts „Montage mikrooptischer Systeme (MOMSYS)“ des BMBF [84] entwickelt. Das System besteht aus zwei beidseitig telezentrischen Kameras mit folgenden Parametern:

- Fokussierbarkeit der Kameras über eine motorisierte Verstellung des Bildsensors
- Realisierbares Messvolumen von 15 mm³ mit einem Schärfentiefebereich von ca. 2mm
- Verzeichnung der telezentrischen Objektivs im Bereich von <0,1% des Bildfeldes

Das verwendete Messprinzip des Bildverarbeitungssystems beruht auf der passiven Photogrammetrie [77] (Abb. 6.11). Bei diesem Prinzip wird ein Punkt P im Koordinatensystem des Bildverarbeitungssystems bestimmt, indem dieser mit Kamera 1 auf einen Bildpunkt b' abgebildet wird. Aufgrund der Telezentrie der Objektive befindet sich dieser Bildpunkt auf einer Geraden g , die auf die Bildebene der Kamera 2 als Geradenabbild g'' projiziert werden kann. Diese Gerade g'' muss einen Punkt b'' enthalten, der ebenfalls ein Abbild des Punktes P darstellt. Mit Hilfe der Koordinaten der Bildpunkte und den Kameraparametern lassen sich so die Koordinaten des Punktes P bestimmen. Hierfür müssen mindestens zwei Kameras zur Gewährleistung der dreidimensionalen Information unter einem definierten Winkel ($45-70^\circ$) im Raum zueinander angeordnet sein, damit beide Kameras dieselbe Kante bzw. Fläche des Bauteils betrachten können. Abb. 6.12 zeigt die Integration des Kamerasystems in die Montageumgebung. Über die Aufnahme mehrerer Raumpunkte werden die Kanten des Bauteils bestimmt und daraus dessen Position im Montageraum berechnet. Die Information der Bauteilposition (Ist-Position) wird mit der vorgegebenen Sollposition verglichen und die Differenz der Raumpunkte dem Handhabungssystem als Bewegungskordinaten zur Nachpositionierung des Bauteils übergeben.

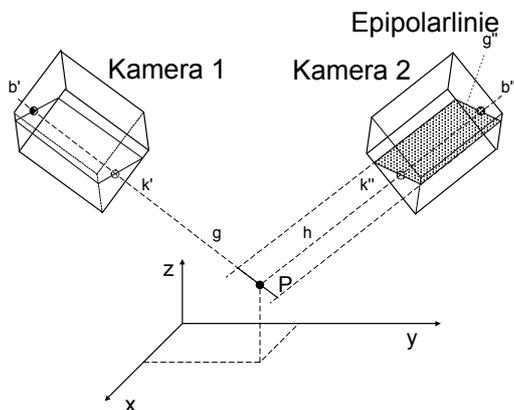


Abb. 6.11 Prinzip der passiven Photogrammetrie zur Bestimmung von Raumpunkten [77]

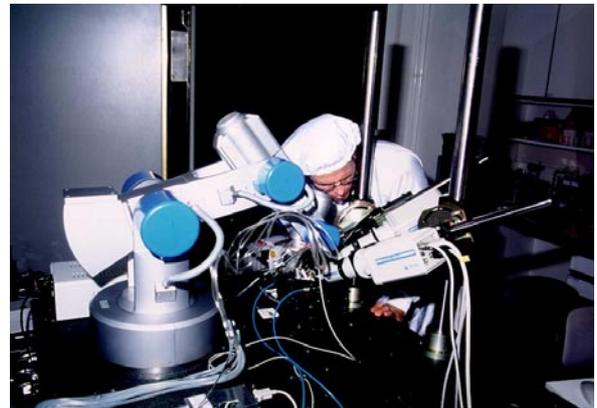


Abb. 6.12 Integration des Bildverarbeitungssystems in die Montageumgebung

Unter Benutzung eines Modells zum Ausgleich parasitärer Effekte wie der Linsenverzeichnung der Objektive u.ä. wurden Simulationen dieses Messprinzips durchgeführt, die eine Bestimmung der korrespondierenden Raumpunkte mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5\mu\text{m}$ aufweisen. Zur Gewährleistung dieser Messgenauigkeit und der geforderten Fügegenauigkeit von $\pm 3\mu\text{m}$ pro Fügenschritt innerhalb des realen Montageprozesses müssen folgende Randbedingungen erfüllt werden:

- Zum Ausgleich der Fehlereinflüsse auf das Messsystem wird eine Kalibrierung der Justieranordnung durchgeführt. Hierfür wurde ein Kalibrierkörper entwickelt [88] und in geeigneter Weise in die Justieranordnung integriert. Dieser Kalibrierkörper gewährleistet durch eine definierte Anordnung der Messpunkte eine Information bzgl. dessen Lage und Orientierung im Raum. Während des Kalibriervorganges wird anhand des Kalibrierkörpers zuerst ein Koordinatensystem bzgl. des Bildverarbeitungssystems erstellt. Durch eine definierte Bewegung des Kalibrierkörpers an mehreren Punkten innerhalb des Montage-raumes wird anschließend ein Koordinatensystem für das Positioniersystem aufgestellt und ein Abgleich beider Koordinatensysteme durchgeführt.

Für diese Kalibrierbewegung wurde der Kalibrierkörper in das Werkzeugwechselsystem des Roboters integriert und mit dessen Genauigkeit ($<1\mu\text{m}$) im Raum bewegt.

- Das vorliegende Demonstratorsystem erfordert die Detektion der Kanten transparenter Glasbauteile. Zur Aufnahme geeigneter Messwerte für die Kantendetektion ist die Beleuchtung während des Messvorganges von besonderer Bedeutung. Dazu wurde für die unterschiedlichen Fügeoperationen eine Kombination aus Auf- und Durchlichtbeleuchtung entwickelt und in die Montageumgebung eingebaut.

Die Abbildungen 6.13 bis 6.16 zeigen Messaufnahmen zur Kalibrierung der Justieranordnung und verschiedene Messaufnahmen der Linsen während des Montageprozesses. Anhand dieser Aufnahmen wird deutlich, dass mit Hilfe der verwendeten Beleuchtungsanordnung eine hochgenaue Kantendetektion der transparenten Bauteile möglich ist.

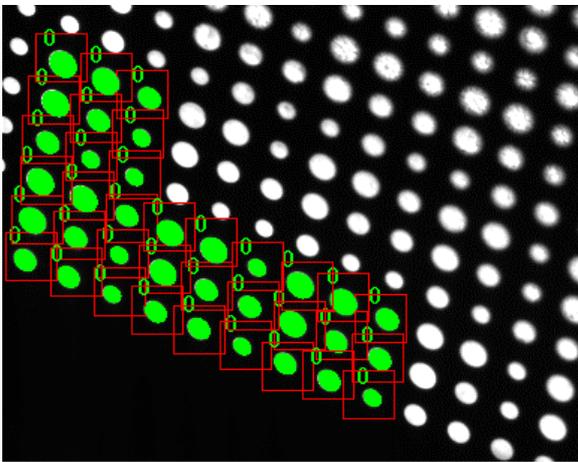


Abb. 6.13 Kalibrieraufnahme

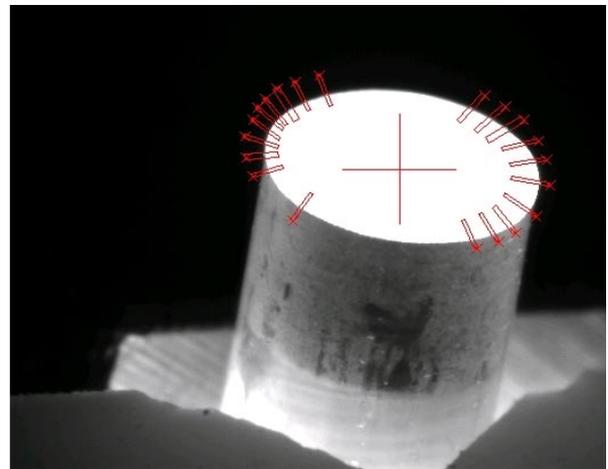


Abb. 6.14 Schwerpunktbestimmung der SELFOC-Linse

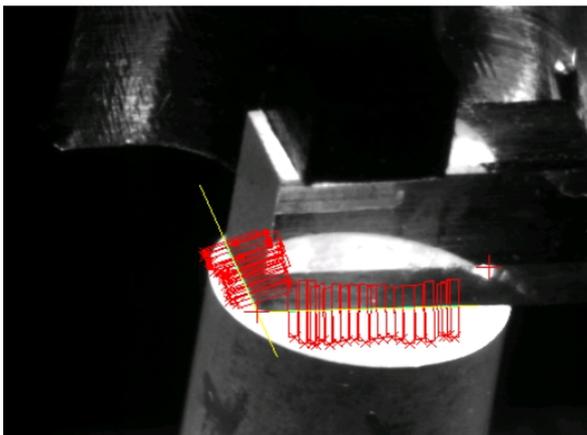


Abb. 6.15 Kantenbestimmung der SAC-Linse

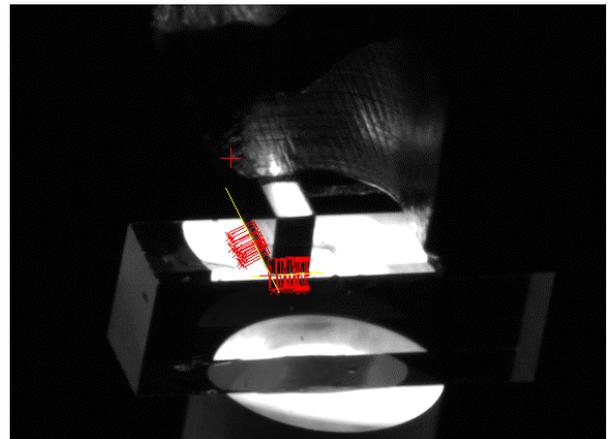


Abb. 6.16 Kantenbestimmung der FAC-Linse

Um die Genauigkeit des Messvorganges zu bestimmen, wurde im Montageprozess ein Greifwerkzeug mit Kraftsensor eingesetzt. Hiermit ist es möglich, das Aufsetzen des Bauteils während der Fügeoperation zu detektieren und so die Qualität des Regelprozesses zu prüfen.

Der automatisierte Montage- und Justierprozess dieses Montageverfahrens gestaltet sich für das Demonstratorsystem wie folgt:

1. Vor Beginn des Montageprozesses wird das Kamerasystem kalibriert. Dazu wird das Kalibriernormal an zwei Raumpositionen für jeweils drei Sensorpositionen vermessen. Dies dient der dreidimensionalen Kalibrierung des Kamerasystems an allen Sensorpositionen.
2. Anschließend erfolgt der Koordinatensystemabgleich zwischen Bildverarbeitungs- und Positioniersystem, um genaue Korrekturdaten zur Nachpositionierung während des Montageprozesses zu gewährleisten. Für diesen Koordinatensystemabgleich wird ein Punkt des Kalibrierkörpers zu acht definierten Raumpunkten bewegt und jeweils gemessen. Der Koordinatenabgleich wird dann anhand des Bezugs zwischen den Bewegungskordinaten des Positioniersystems und deren Messkoordinaten innerhalb des Kamerakoordinatensystems durchgeführt. Der gesamte Kalibriervorgang beansprucht ca. 10 Minuten und wird in Abhängigkeit von Änderungen der Messbedingungen zweimal am Tag durchgeführt.
3. Die SELFOC-, SAC- und FAC-Linse werden in einem Pick-and-Place-Verfahren nacheinander von den vorgestellten Sauggreifern zentriert und positionsgenau aus dem Magazin entnommen.
4. Der Roboter schwenkt bestückt zur Montageplattform und setzt die SELFOC-Linse in die Aufnahme ab. Die Aufnahme ist in der Lage, zylindrische Bauteile ($\varnothing < 2 \text{ mm}$) über 3 Punkte (V-Nut und Klemmbacke) zu fixieren. Die Montageumgebung oberhalb dieser Aufnahme bietet ausreichenden Raum zum Einschwenken der für den Montageablauf benötigten Werkzeuge.
5. Um die Fügeposition der SAC-Linse festzulegen, werden Messaufnahmen der Stirnfläche der SELFOC-Linse erstellt (Abb. 6.14) und über eine Ellipsenfunktion deren Flächenschwerpunkt bestimmt. Dieser stellt gleichzeitig die Fügeposition und damit die Bezugsposition für den Justierprozess dar.
6. Der in den Revolver integrierte Dosierkopf wird über der Linse positioniert und appliziert ein definiertes Klebstoffvolumen auf der Oberfläche der SELFOC-Linse.
7. Für den ersten Fügevorgang wird die SAC-Linse an die Fügeposition angenähert, so dass diese sich während der Messaufnahme im Bereich der Suchstrahlen zur Kantendetektion der Linse befindet (Abb. 6.15).
8. Bei der sich anschließenden Messaufnahme werden die Unterkanten der SAC-Linse bestimmt und daraus deren Flächenschwerpunkt berechnet. Über diesen Fügepunkt und den darauf aufgestellten Normalenvektor kann der Abstand und die Orientierung der SAC-Linse zur Bezugsposition (SELFOC-Linse) bestimmt und die entsprechenden Korrekturdaten zur Positionsregelung ermittelt werden. Diese werden dann an die Robotersteuerung übertragen.

9. Aufgrund der Korrekturdaten wird die SAC-Linse bzgl. der Bezugsposition ausgerichtet, in den Klebstofftropfen eingedrückt und der Klebstoff mit UV-Strahlung ausgehärtet.
10. In der folgenden Messaufnahme werden die Oberkanten der bereits gefügten SAC-Linse bestimmt. Daraus lässt sich der Flächenschwerpunkt auf der Oberseite der Linse berechnen, der gleichzeitig Fügeposition und Bezugsposition der nächsten Fügeoperation darstellt.
11. In den nächsten Schritten werden Klebevorgang, Annäherung, Positionsregelung und Aushärtvorgang für die FAC-Linse wiederholt (Abb. 6.16).

6.2.3 Justierung anhand der optischen Funktion

Für die Untersuchungen zu diesem Montageverfahren wurde in dieser Arbeit eine Justieranordnung entwickelt und in die Montageumgebung integriert, die eine Justierung des Demonstratorsystems anhand dessen optischer Funktion gewährleistet. Aufgrund des geringen Abstandes von $50\mu\text{m}$ zwischen Laserdiode und FAC-Linse ist jedoch keine Justieranordnung bzgl. des Gesamtfunktionsaufbaus realisierbar. Das Gesamtsystem wurde daher in eine Unterbaugruppe bestehend aus SELFOC-, SAC- und FAC-Linse unterteilt, die anhand einer charakteristischen Regelgröße, der Intensität eines Justierstrahls, zueinander ausgerichtet werden. Zur qualitativen Charakterisierung dieses Justierprozesses wurde vorab ein manueller Experimentalaufbau mit Verstellmöglichkeiten (je 4 Freiheitsgrade pro Linse) entwickelt (Abb. 6.17). Der Montageablauf gestaltet sich dabei wie folgt:

1. Justierung der SELFOC-Linse zu einem Justierstrahl (Justierbasis)
2. Justierung der SAC-Linse bzgl. der SELFOC-Linse
3. Justierung der FAC-Linse bzgl. der SAC-Linse bzw. der SELFOC-Linse

Die SELFOC-Linse bildet in diesem manuellen Montageablauf die Justierbasis. Dazu wird die Linse in den Strahlengang des Justierlasers bewegt und mit Hilfe einer über dem Montageaufbau angebrachten CCD-Kamera bzgl. des Justierstrahls ausgerichtet. Für die weitere Justierung wird die Kamera auf die Stirnfläche der SELFOC-Linse fokussiert und mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware das Intensitätsabbild des Justierstrahls auf der Stirnfläche der Linse aufgenommen. Bei der Justierung der SAC- und FAC-Linse werden diese mit frei beweglichen Halterungen in einem Raster mit definierten Schritten in x -, y -, z - und R_z -Richtung über der Justierbasis positioniert. Aufgrund des Gradientenindexprofils der Linsen erfolgt abhängig vom Grad der Dejustierung eine Ablenkung des Strahlengangs aus der idealen Lage. Vor dem CCD-Empfänger der Kamera wurde eine Blende integriert, so dass der Strahl bei entsprechender Ablenkung aus dem Aufnahmebereich der Blende fällt. Die Intensitätsabbilder, die sich für die einzelnen Rasterpositionen ergeben, wurden über das Bildverarbeitungssystem aufgenommen und bzgl. einer maximalen Intensität ausgewertet. Die Position maximaler Intensität entspricht der optimalen Ausrichtung des Bauteils bzgl. des Justierstrahls, d.h. der optimal justierten Fügeposition.

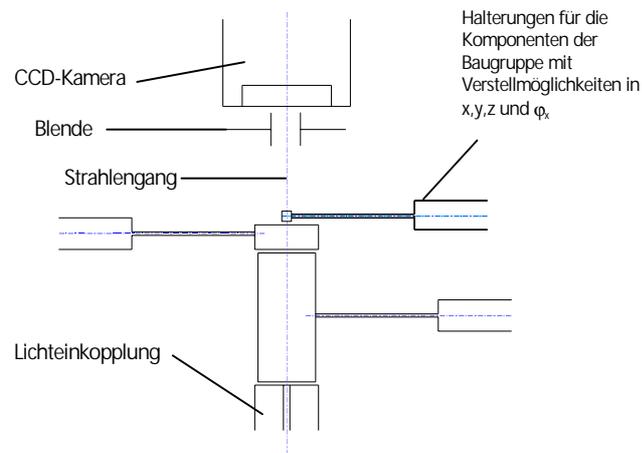


Abb. 6.17 Prinzipskizze des manuellen Versuchsstandes

Justierung anhand der Flächenänderung des Strahlbildes bei Verschiebung der FAC-Linse

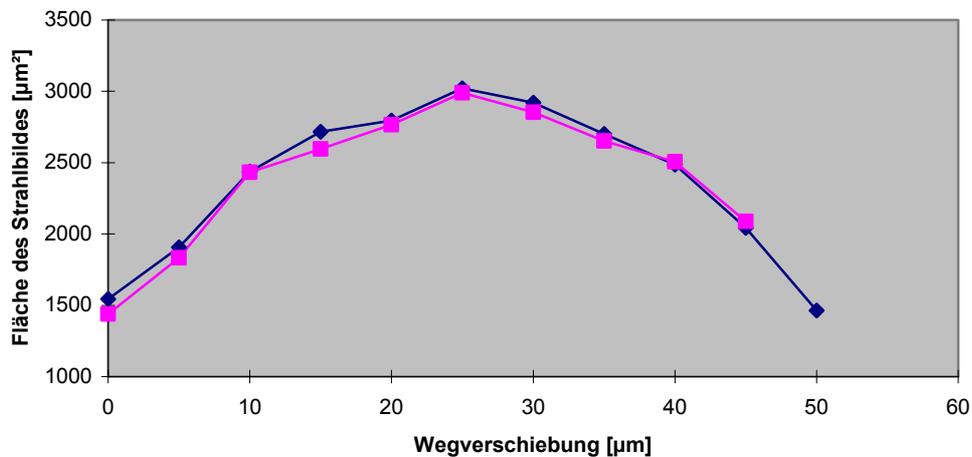


Abb. 6.18 Verteilung der gemessenen Flächenintensität für die FAC-Linse

Die Ablenkung des Strahlengangs verläuft aufgrund der Symmetrie des Gradientenprofils entlang dieses Profils (massgebende Richtung des Justierprozesses) ebenfalls symmetrisch. Daraus resultierend, weist die Intensitätsfläche bezogen auf den gesamten Stellbereich einen symmetrischen Verlauf auf, der an der optimalen Justierposition ein Maximum erreicht. Abb. 6.18 zeigt beispielhaft den gemessenen Intensitätsverlauf für die FAC-Linse.

Die Ergebnisse, die mit dem unter Abb. 6.17 dargestellten manuellen Montageplatz erreicht wurden, dienen der qualitativen Beschreibung des Justierprinzips. Einen quantitativen Anspruch können die Ergebnisse nicht erheben, da zur Realisierung der Ein- und Ausfahrbewegung der Linsen ein Luftspalt vorhanden sein muss. Zusätzlich können die Bauteile in den Halterungen bzgl. auftretender Verkipptungen nur hinreichend genau vorjustiert werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde eine Justieranordnung entwickelt, die in eine automatisierte Montageumgebung übertragbar ist. Bei der Umsetzung dieser Anordnung wurde der manuelle Versuchsstand in die Montageumgebung des Robotersystems integriert (Abb. 6.19), ein Justieralgorithmus erarbeitet und ein Auswertalgorithmus unter der Bildverarbeitungssoftware Optimas[®] entwickelt. Dabei wird ein Justierstrahl über eine Lichtleitfaser in die zu montierende Baugruppe eingekoppelt. Analog zum Aufbau des manuellen Versuchsstandes wird das Kamerasystem auf die Stirnfläche der SELFOC-Linse fokussiert und die GRIN-Linsen entsprechend dem Justierstrahl über die Bildverarbeitungssoftware bzgl. deren maximaler Flächenintensität justiert. Anhand der Beziehung zwischen maximaler Intensität und der zugehörigen Position der Justiereinheit während der Justierbewegung wird für die Fügekomponente die optimale Fügeposition ermittelt, das Bauteil positioniert und durch Kleben mit dem Fügepartner verbunden.

Der Aufbau in Abb. 6.19 wurde nach montagetechnischen Gesichtspunkten folgendermaßen gestaltet:

- Die SELFOC-Linse wird während des Montageprozesses definiert fixiert und dient als Bezugskörper für die anschließenden Fügevorgänge.
- Der Justierstrahl wird über eine Lichtleitfaser an die zu montierende Baugruppe herangeführt. Das Faserende wird in einem Ferrul gehalten, das definiert in x-, y- und z-Richtung zur Aufnahmeposition der SELFOC-Linse ausgerichtet und fixiert wird. Aufgrund der Fertigungsgenauigkeiten der Klemmvorrichtung wird eine reproduzierbare Ausrichtung der geometrischen Achsen von Linse und Faser zur Bezugsachse des Systems von $\pm 2\mu\text{m}$ erreicht.
- Für die Integration der Kamera in den Montageprozess wird diese in einem vorgegebenen Abstand zur Fügeebene in der Montageumgebung platziert, so dass eine Kollisionen zwischen Kamerasystem und Positioniersystem vermieden wird. Zusätzlich wurde die Kamera mit einem Umlenkspiegel versehen, um durch einen waagerechten Eingriff einen möglichst geringen Raumbedarf in der Montageumgebung einzunehmen. Der Bezug der Ebenen von CCD-Empfänger und Linsenoberfläche wurde über einen einmaligen Justiervorgang hergestellt.
- Über die Bildverarbeitungssoftware Optimas[®] werden die aufgenommenen Bilder hinsichtlich der maximalen Flächenintensität ausgewertet, die optimale Fügeposition anhand dieser Daten ermittelt und das Bauteil durch die Justiereinheit an diese Position bewegt.

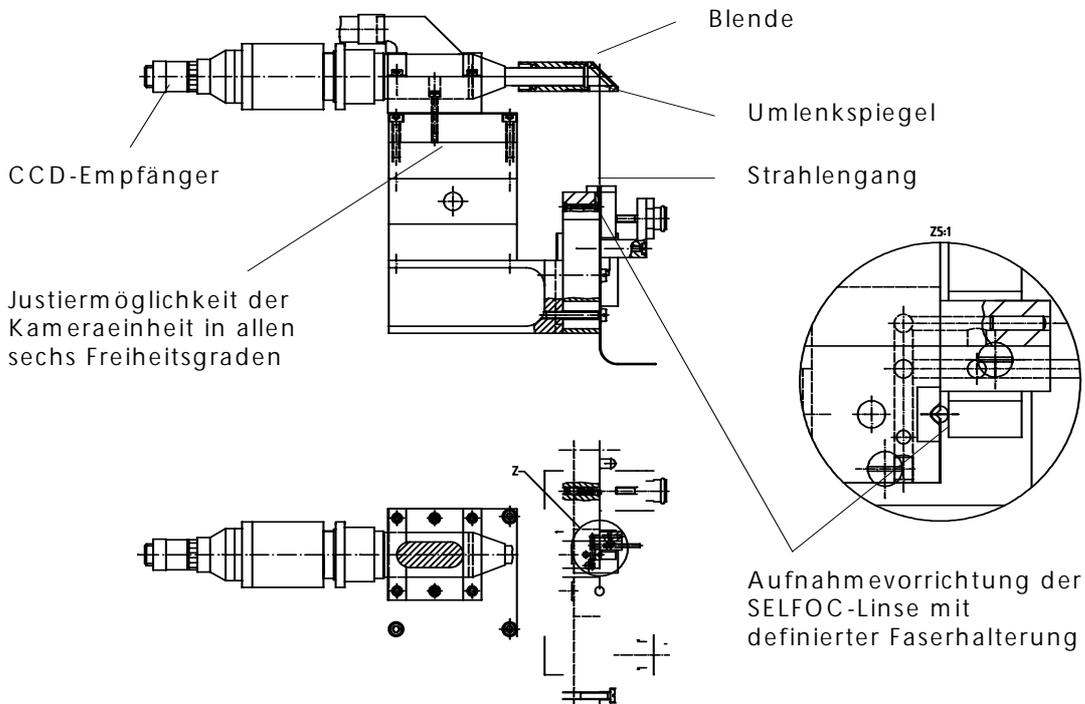


Abb. 6.19 Schematischer Aufbau der Justieranordnung in der Montageumgebung

Mittels dieser Justieranordnung lässt sich für das vorgestellte Demonstratorsystem ein automatisierter Montageprozess realisieren, der wie folgt abläuft:

1. Die SELFOC-, SAC- und FAC-Linse werden in einem Pick-and-Place-Verfahren nacheinander von den vorgestellten Sauggreifern zentriert und positionsgenau aus dem Magazin entnommen.
2. Der Roboter schwenkt bestückt zur Montageplattform und setzt die SELFOC-Linse in die Aufnahme ab, in der diese fixiert wird. Die Stirnfläche der SELFOC-Linse dient für den weiteren Montageprozess als Bezugsgröße. Die Montageumgebung oberhalb dieser Aufnahme bietet ausreichenden Raum zum Einschwenken der für den Montageablauf benötigten Werkzeuge.
3. Der in den Revolver integrierte Dosierkopf wird über der Linse positioniert und appliziert Klebstoff mit einem definierten Volumen auf der Stirnfläche der SELFOC-Linse.
4. Während des ersten Fügevorganges wird die SAC-Linse an die Fügeposition angenähert (Sitz im Klebstoffbett). Anschließend wird die Linse in einer Rasterbewegung über dem Fügeort in den für die Justierung maßgebenden Richtungen und Winkeln verfahren. Die Positionen des Rasters werden bzgl. der auftretenden Intensität mit dem Bildverarbeitungssystem gemessen und ausgewertet.

5. Aus dem Vergleich der Messmatrix mit dem Positionsraaster wird ein Intensitätsmaximum bestimmt, das der optimalen Fügeposition entspricht. Aufgrund dieser Korrekturdaten wird die SAC-Linse an die Fügeposition bewegt, vollständig in den Klebstofftropfen eingedrückt und der Klebstoff mit UV-Strahlung ausgehärtet.
6. In den nächsten Schritten werden Klebvorgang, Annäherung, Positionsraaster, Fügevorgang und Aushärtvorgang für die FAC-Linse wiederholt.

Abb. 6.20 zeigt eine Folge von Bildern der Justierschritte einer FAC-Linse. Die Aufnahmen wurden in Abständen von $10\mu\text{m}$ -Schritten aufgenommen und stellen die symmetrische Intensitätsverteilung aus Abb. 6.18 dar, die durch die unterschiedliche Ablenkung des Justierstrahls bei Abweichung der Linse von der Sollage hervorgerufen wird. In Abb. 6.20d erreicht die gemessene Intensität ein Maximum, d.h. das Bauteil ist entsprechend dem Zentrum des Justierlasers ausgerichtet. Die Ringe um das eigentliche Messzentrum sind auf Beugungseffekte an der Blende der Justieranordnung zurückzuführen. Die Intensität liegt aber unterhalb des Grenzwerts der Messung, so dass eine eindeutige Bestimmung der Fläche des Strahlencentrums gewährleistet ist. Die Funktionsweise des Justierprinzips wurde durch die Umsetzung in die automatisierte Montageumgebung qualitativ bestätigt und quantitativ untersucht.

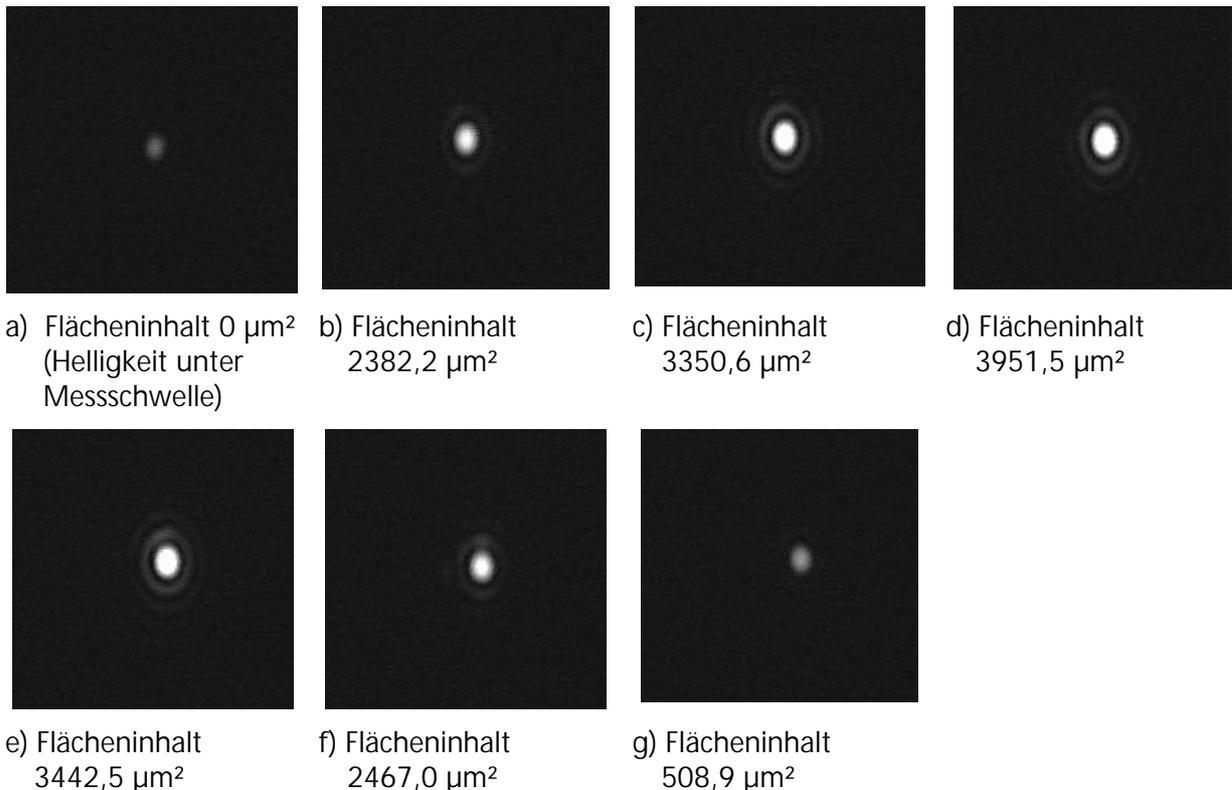


Abb. 6.20 (a-g) Messaufnahmen zur Justierung der FAC-Linse

6.3 Charakterisierung der gefügten Baugruppen

Ziel dieser Charakterisierung ist eine Bewertung der vorgestellten Montageverfahren hinsichtlich der erzielbaren Fügeergebnisse, um daraus Rückschlüsse auf deren Einsatzbereiche für automatisierte Montageprozesse ziehen zu können. Um eine aussagekräftige Bewertung der Fügequalität für diese Montageprozesse durchführen zu können, wurde innerhalb der Untersuchungen jeweils eine ausreichende Anzahl Baugruppen gefügt. Für die Bewertung wurden die Baugruppen anhand von zwei Verfahren bzgl. der Fügequalität charakterisiert.

6.3.1 Charakterisierung anhand geometrischer Merkmale

Aus den Vorgaben des optischen Designs und den Berechnungen aus Kap. 5 ergibt sich eine definierte Fügegeometrie der mikrooptischen Baugruppe mit maximal zulässigen Abweichungen der Fügepositionen. Diese Mustergeometrie wurde als Vergleichsmaßstab für die Bestimmung der Ist-Geometrie der gefügten Baugruppen verwendet. Über ein Bildverarbeitungssystem (Optimas[®]), das an ein Messmikroskop gekoppelt ist, wurde die Ist-Fügeposition der Komponenten gemessen, mit der Soll-Position des optischen Designs verglichen und die daraus resultierenden Differenzen (Fügeabweichungen) ermittelt. Die Parameter, die zur Bewertung der Baugruppen dienen, lassen sich folgendermaßen untergliedern:

- Lage der Flächenschwerpunkte der einzelnen Fügekomponenten bzgl. der Bezugsachse ($\Delta T_x, \Delta T_y$)
- Winkelverdrehung / -verkipfung der Bauteile ($\Delta\phi_i$)
- Abstand der Bauteile in Richtung der Bezugsachse (ΔT_z)

Die Messgenauigkeit, die mit diesem Aufbau realisierbar ist, liegt im Bereich von $0,1\mu\text{m}$. Abb. 6.21 zeigt eine Prinzipskizze des verwendeten Messaufbaus. Die ermittelten Abweichungen können in Strahlrechnungssimulationen (vgl. Kap. 5) eingesetzt werden, um eine Aussage über die theoretisch erreichbare Koppeleffizienz und damit der Baugruppengüte der jeweiligen Baugruppe zu erhalten. Diese Aussage dient als Vergleich zu den Messergebnissen des zweiten Charakterisierungsverfahrens anhand der optischen Funktion der Gesamtbaugruppe.

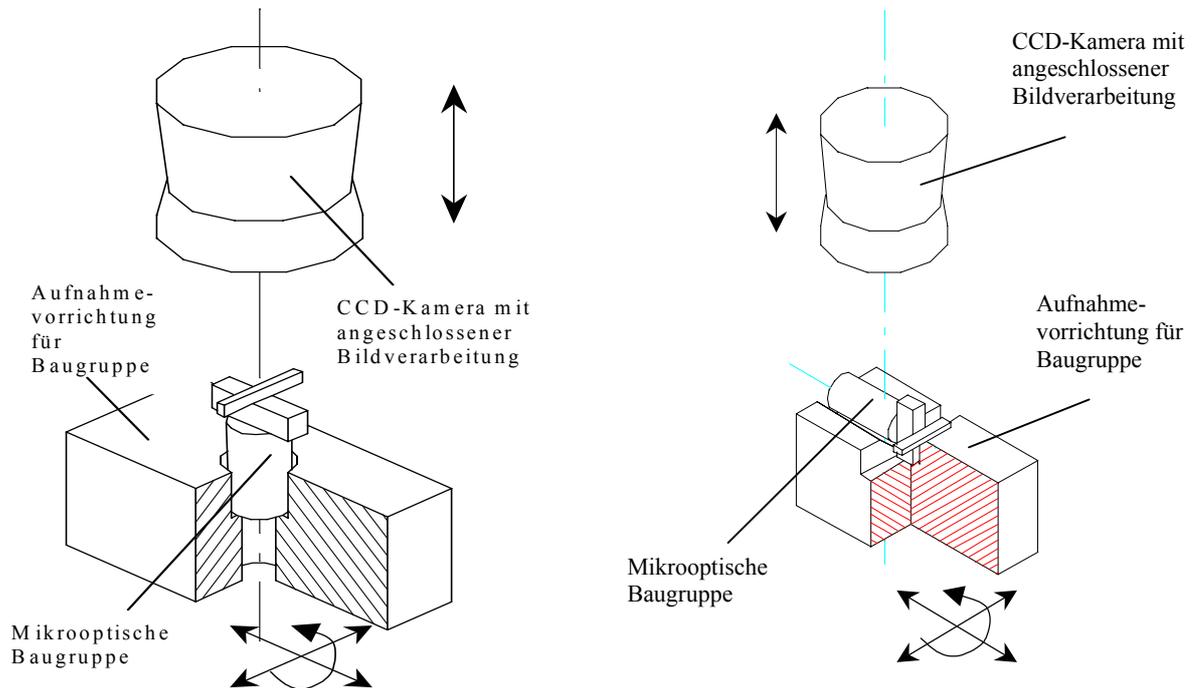


Abb. 6.21 Prinzipskizze der Messaufbauten zur Messung der Fügegeometrie der Baugruppen

6.3.2 Charakterisierung der optischen Funktion

In einem zweiten Verfahren wurden die Baugruppen bzgl. der optischen Funktion charakterisiert. Hierfür wurden die Baugruppen reproduzierbar in den Funktionsaufbau des Gesamtsystems "Laserdiode-mikrooptische Baugruppe-Glasfaser" (Abb. 4.1) eingebaut und die Laserdiode gegenüber der mikrooptischen Baugruppe justiert. Als Regelgröße dieser Justieranordnung dient die maximale Effizienz der Lichteinkopplung. Abb. 6.22 zeigt den hierfür realisierten Messaufbau. Der Messvorgang gestaltet sich folgendermaßen:

- Die Baugruppe wird in eine zylindrische Fassung eingesetzt, deren Bohrung eine Spielpassung (Gleitsitz) zur Aufnahme der SELFOC-Linse aufweist. In diese Fassung ist zusätzlich eine Negativstruktur der gekreuzten GRIN-Linsen eingearbeitet, um die mikrooptische Baugruppe gegen Beschädigung zu schützen und für den Justierprozess winkelnau vorzupositionieren.
- Die Hülse ist mit einer Multimodefaser vorkonfektioniert. Die Faser ist in einem Ferrul gefasst, das über eine Spielpassung (Schiebesitz) und einen definierten Anschlag in der Fassung befestigt ist. Hierdurch wird der vorgeschriebene Abstand zwischen Strahlaustrittsfläche der SELFOC-Linse und Strahleintrittsfläche der Faser von 1,5mm erreicht.
- Während des Justierprozesses werden die beiden Subbaugruppen Laserdiode und mikrooptisches System zueinander ausgerichtet. Hierzu wird ein hochauflösendes

Positioniersystem (absolute Wiederholgenauigkeit $<300\text{nm}$) eingesetzt, auf dem die Baugruppen befestigt werden und mit dem eine Justierung in den Koordinatenrichtungen x,y,z und φ_z gewährleistet wird.

- Zur Ermittlung der Regelgröße der Intensitätsverteilung werden die Subbaugruppen innerhalb eines vorgegebenen Positionsbereiches nach definierten Rasterbahnen zueinander ausgerichtet und die in die Faser eingekoppelte Leistung über einen wellenlängenabhängigen Leistungsdetektor aufgenommen.
- Anhand der Korrelation der gemessenen Intensitätsverteilung innerhalb des Rasterfeldes und der zugehörigen Positionskoordinaten wird die optimale Fügeposition ermittelt und die Subbaugruppen automatisiert an diese Position bewegt.

Die Ergebnisse dieser Messungen ergeben eine qualitative Beschreibung der Baugruppengüte bzgl. der Funktion des Gesamtsystems. Über eine Mehrfachmessung für die jeweilige Subbaugruppe und eine anschließende Mittelwertbildung wird der Messfehler der Justieranordnung minimiert.

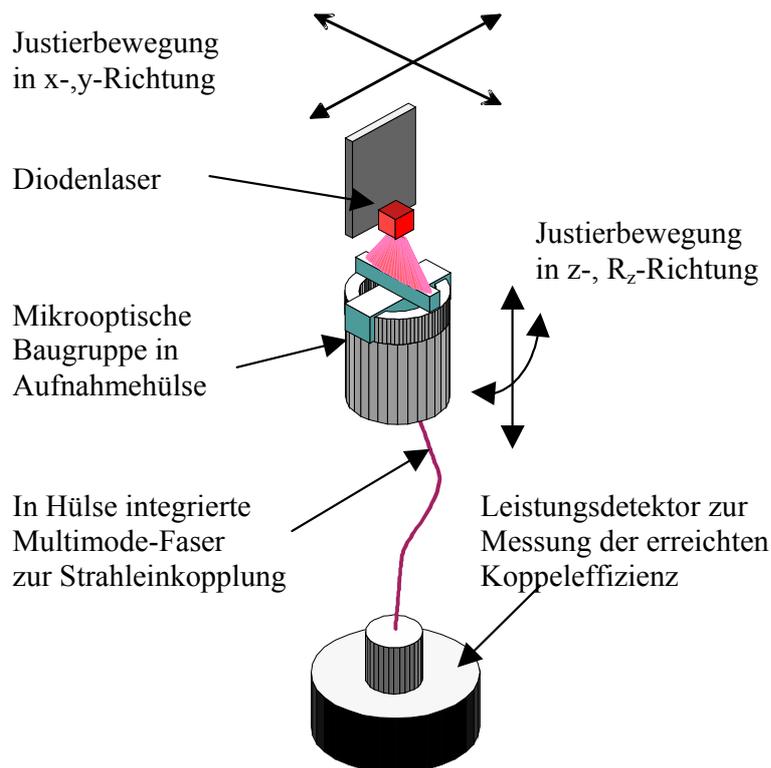


Abb. 6.22 Prinzipskizze des Messaufbaus zur Messung der Koppel-effizienz des Gesamtsystems

Einschränkung der Messergebnisse:

Bei den Untersuchungen dieser Arbeit wurde darauf verzichtet, das mikrooptische System fest mit der Laserdiode zu verbinden, da eine geeignete Klebverbindung nur mit Beschädigung der Laserdiode wieder zu lösen wäre. Der Aufbau von über 100 Komplettsystemen konnte aus Kostengründen nicht realisiert werden. Der Prozess wurde daher idealisiert für die Abweichungen dieser einen Laserdiode durchgeführt. Bezogen auf eine Serienfertigung sind die Fertigungs- und Fügegenauigkeiten der eingesetzten Laserdioden auf einer zugehörigen Halterung ebenfalls mit in die Fehlerrechnung und den Prozessablauf einzubeziehen.

7 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Die in diesem Kapitel aufgeführten Ergebnisse beziehen sich auf die Messwerte der Charakterisierung der Gesamtbaugruppen, die innerhalb der experimentellen Untersuchungen mit den vorgestellten Lösungen zur automatisierten Mikromontage gefügt wurden.

7.1 Charakterisierung der gefügten Baugruppen

7.1.1 Geometrische Messungen

Ziel der geometrischen Charakterisierung der Baugruppen ist es, die Vorgaben des optischen Designs mit der realen Fügegeometrie der Baugruppen zu vergleichen und anhand dieser Ergebnisse Rückschlüsse auf den Einfluss der Einzelabweichungen innerhalb der untersuchten Montageprozesse für das jeweilige Positionier- und Justierverfahren zu ziehen.

Tab. 7.1 zeigt die Auswertung der Messergebnisse hinsichtlich der Genauigkeiten, die für die vorgestellten Montageprozesse und bezogen auf die einzelnen Fügeschritte erreicht wurden. Die angegebenen Koordinatenrichtungen beziehen sich auf das Koordinatensystem, das durch die Abb. 4.1 und 5.4 vorgegeben ist. Die Abweichungen der einzelnen Fügeschritte zu den Vorgaben des optischen Designs beziehen sich auf den Flächenschwerpunkt der SELFOC-Linse, der den Bezugspunkt der Fügeprozesse und nach Abb. 5.12 gleichzeitig die empfindlichste Komponente bzgl. lateraler Abweichungen im mikrooptischen System darstellt. Abgeleitet aus diesen Ergebnissen veranschaulichen die Abbildungen 7.1 bis 7.3 vergleichend die Abweichung der Messwerte von den Vorgaben des optischen Designs.

Die Ergebnisse aus Tab. 7.1 zeigen deutlich, dass mit den untersuchten Montageverfahren Fügegenauigkeiten $< 8\mu\text{m}$ erreichbar sind. Differenzen in der Fügequalität ergeben sich durch die unterschiedliche Anzahl von Einflussgrößen der einzelnen Prozesse. Diese sind in Kap. 5 ausführlich dargestellt. Vergleicht man die Ergebnisse der einzelnen Verfahren miteinander, zeigt sich, dass die Messwerte für die Justierung der Baugruppen anhand der optischen Funktion unter den zulässigen Abweichungen des optischen Designs liegen. Die Messergebnisse für die Baugruppen, die anhand geometrischer Konturmerkmale justiert wurden, bewegen sich ebenfalls innerhalb der Wertevorgaben. Die absoluten Fügegenauigkeiten sind aber geringer. Mit dem Montageverfahren der Positionierung mit Hilfe von Fügevorrichtungen konnten die Vorgaben des optischen Designs nicht erfüllt werden. Die erreichten Fügegenauigkeiten liegen hier um ca. $3\text{--}4\mu\text{m}$ über den Wertevorgaben. Dies ist insbesondere durch die größere Anzahl systematischer Fehleranteile bedingt.

| Prozessschritt | Vorgaben des optischen Designs | Positionierung mit Fügevorrichtung | | Justierung anhand der Geometrie | | Justierung anhand der optischen Funktion | |
|---|---|--|--|--|--|--|--|
| | | Zulässige Fügeabweichungen | Ermittelte Abweichungen | Abweichung zu Solltoleranzen | Ermittelte Abweichungen | Abweichung zu Solltoleranzen | Ermittelte Abweichungen |
| 1. Abweichung der Flächenschwerpunkte von SELFOC- und SAC-Linse [μm bzw. $^\circ$] | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 7$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,13^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 2^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 7,5$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,6^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 4,5$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 1$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 4$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 5$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,4^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 1$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 0$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 6$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,5^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 0$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 1$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ |
| 2. Abweichung der Flächenschwerpunkte von SELFOC- und FAC-Linse [μm bzw. $^\circ$] | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,13^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 2^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 6$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,5^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 0$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 2,5$ $\Delta T_z = \pm 5$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,3^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 0,5$ $\Delta T_z = \pm 0$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 2$ $\Delta T_z = \pm 7$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,4^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 0$ $\Delta T_z = \pm 0$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ |
| 3. Fügeabweichungen bezogen auf die Gesamtbau- gruppe [μm bzw. $^\circ$] | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 15$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,6^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,26^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 4^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 7,5$ $\Delta T_y = \pm 6$ $\Delta T_z = \pm 16$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,6^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 1,1^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \pm 4,5$ $\Delta T_z = \pm 1$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 2,5$ $\Delta T_y = \pm 4$ $\Delta T_z = \pm 10$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,5^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,4^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,7^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 4$ $\Delta T_y = \pm 2,5$ $\Delta T_z = \pm 10$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \pm 2$ $\Delta T_z = \pm 13$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,9^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 0$ $\Delta T_y = \pm 0$ $\Delta T_z = \pm 0$ $\Delta T\phi_x = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0^\circ$ |

Tab. 7.1 Ergebnisse der geometrischen Charakterisierung der gefügten Baugruppen

Die Abbildungen 7.1 bis 7.3 veranschaulichen die beschriebenen Unterschiede der Fügegenauigkeiten, die mit den untersuchten Montageprozessen für die einzelnen Fügeschritte erreicht werden können. Auffällig sind die vergleichsweise hohen Abweichungen in Richtung der Bezugsachse (ΔT_z). Diese sind durch Differenzen in der Einstellung der Klebschichtdicke zu erklären, da sich die Viskosität des Klebstoffs aufgrund der Umgebungsbedingungen und über den Zeitraum, in dem die Baugruppen gefügt wurden, ändern kann. Die Klebschichtdicke wird über eine definierte Fügekraft eingestellt, die über die in die Greifer integrierte Kraftsensoren aufgenommen wird. Bei Veränderung der Viskosität treten Abweichungen im Verhältnis Fügekraft zu Klebschichtdicke auf, die die Fügeposition beeinflussen. Für die Justierung anhand der optischen Funktion ist eine höhere Genauigkeit aufgrund der relativen Unempfindlichkeit der Justieranordnung in ΔT_z ebenfalls nicht möglich. Die besten Ergebnisse liefert hier das Verfahren der geometrischen Justierung, da die hierbei verwendeten Regelgrößen gegenüber allen Koordinatenrichtungen empfindlich sind. Über die Messung des Abstandes zwischen den Fügeflächen der Komponenten kann so auch die Klebschichtdicke (ΔT_z) definiert eingestellt werden.

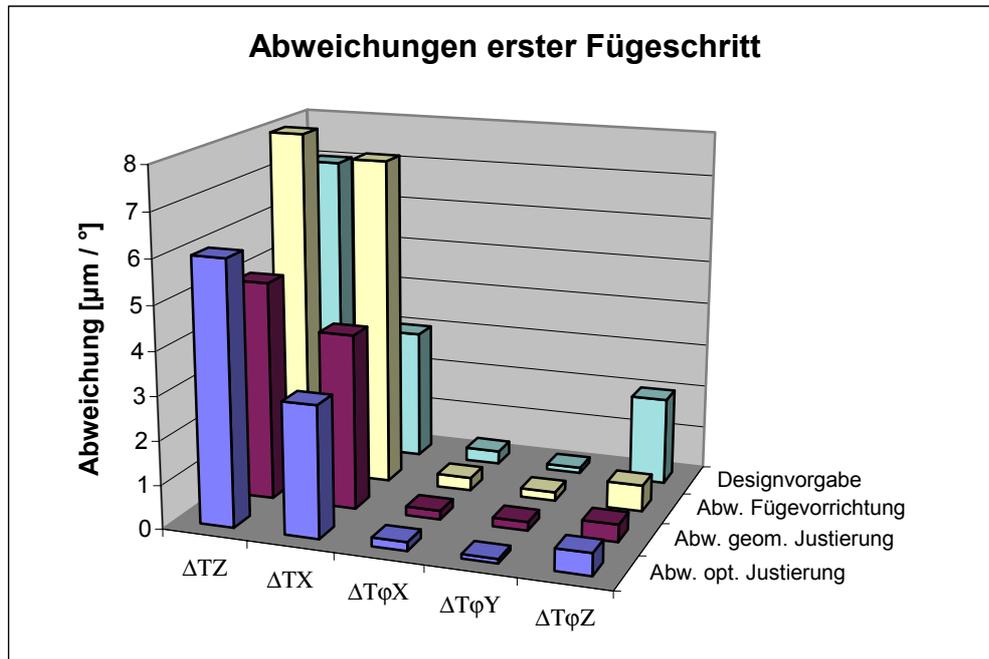


Abb. 7.1 Vergleich der Abweichungen beim ersten Fügescritt (Restbaugruppe optimal justiert vorausgesetzt)

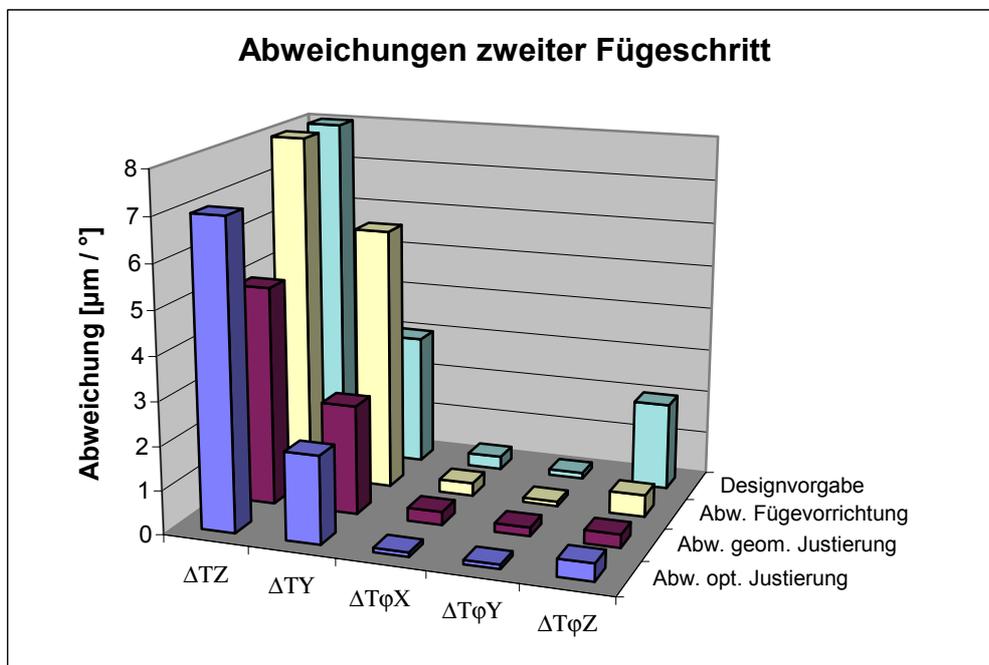


Abb. 7.2 Vergleich der Abweichungen beim zweiten Fügescritt (Restbaugruppe optimal justiert vorausgesetzt)

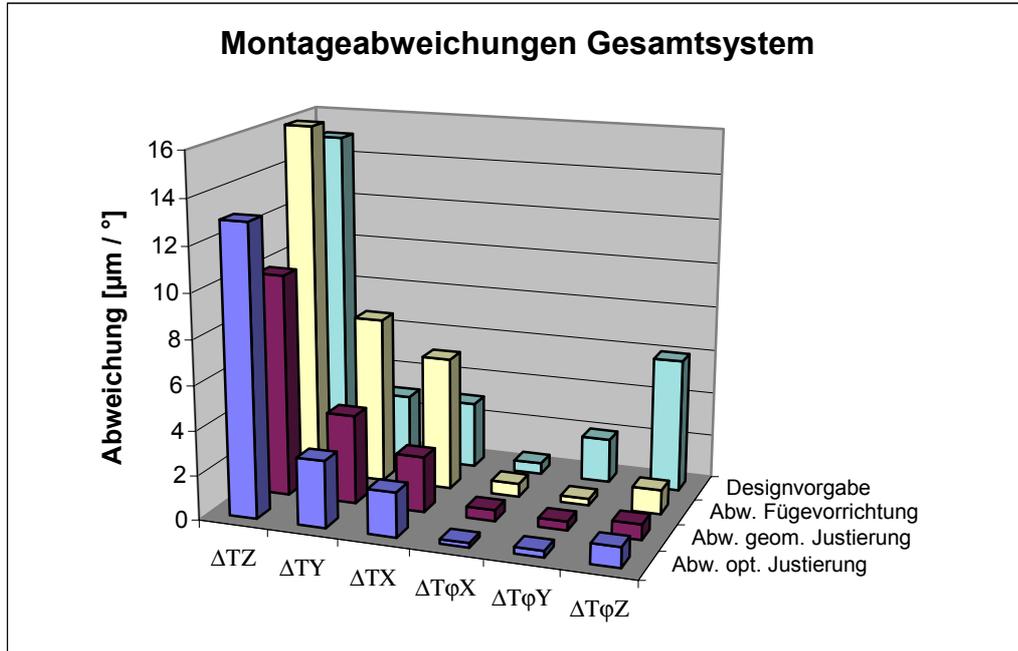


Abb. 7.3 Vergleich der gesamten Fügeabweichungen bezogen auf die gefügte mikrooptische Baugruppe

Die Auswirkungen, die die gemessenen Lageabweichungen auf die Funktion des optischen Systems haben, lassen sich unter den für die Simulation beschriebenen idealisierten Randbedingungen durch die Berechnung der theoretisch erreichbaren Koppelleffizienzen ermitteln. Tabelle 7.2 und Abb. 7.4 stellen diese Zusammenhänge vergleichend dar.

| Prozessschritt | Vorgaben des optischen Designs | Positionierung mit Fügevorrichtung | | Justierung anhand äußerer Merkmale | | Justierung anhand der optischen Funktion | |
|--|--|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| | | Gemessene Abweichungen [µm] | Theoretische Koppelleffizienz [%] | Gemessene Abweichungen [µm] | Theoretische Koppelleffizienz [%] | Gemessene Abweichungen [µm] | Theoretische Koppelleffizienz [%] |
| 1. Abweichung der Flächenschwerpunkte von SELFOC- und 1. GRIN-Linse [µm] | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 7$ $\Delta T_{\phi_x} = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T_{\phi_y} = \pm 0,13^\circ$ $\Delta T_{\phi_z} = \pm 2^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 7,5$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta T_{\phi_x} = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T_{\phi_y} = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T_{\phi_z} = \pm 0,6^\circ$ | 74,1% | $\Delta T_x = \pm 4$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 5$ $\Delta T_{\phi_x} = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T_{\phi_y} = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T_{\phi_z} = \pm 0,4^\circ$ | 80,6% | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \text{n.erf.}$ $\Delta T_z = \pm 6$ $\Delta T_{\phi_x} = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T_{\phi_y} = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T_{\phi_z} = \pm 0,5^\circ$ | 90,9% |

| Prozessschritt | Vorgaben des optischen Designs | Positionierung mit Fügevorrichtung | | Justierung anhand äußerer Merkmale | | Justierung anhand der optischen Funktion | |
|---|---|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| | | Gemessene Abweichungen [μm] | Theoretische Koppel-effizienz [%] | Gemessene Abweichungen [μm] | Theoretische Koppel-effizienz [%] | Gemessene Abweichungen [μm] | Theoretische Koppel-effizienz [%] |
| 2. Abweichung der Flächenschwerpunkte von SELFOC- und 2. GRIN-Linse [μm] | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,13^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 2^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 6$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,5^\circ$ | 91,7% | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 2,5$ $\Delta T_z = \pm 5$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,3^\circ$ | 91,7% | $\Delta T_x = \text{n.erf.}$ $\Delta T_y = \pm 2$ $\Delta T_z = \pm 7$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,4^\circ$ | 91,7% |
| 3. Abweichungen bzgl. der Gesamtbaugruppe [μm] | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 15$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,6^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,26^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 4^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 7,5$ $\Delta T_y = \pm 6$ $\Delta T_z = \pm 16$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,6^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 1,1^\circ$ | 73,6% | $\Delta T_x = \pm 4$ $\Delta T_y = \pm 2,5$ $\Delta T_z = \pm 10$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,5^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,4^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,7^\circ$ | 77% | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \pm 2$ $\Delta T_z = \pm 13$ $\Delta T\phi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\phi_y = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\phi_z = \pm 0,9^\circ$ | 88,4% |

Tab. 7.2 Berechnung der theoretisch erreichbaren Koppel-effizienzen unter Verwendung der geometrisch ermittelten Fügeabweichungen der gefertigten Baugruppen

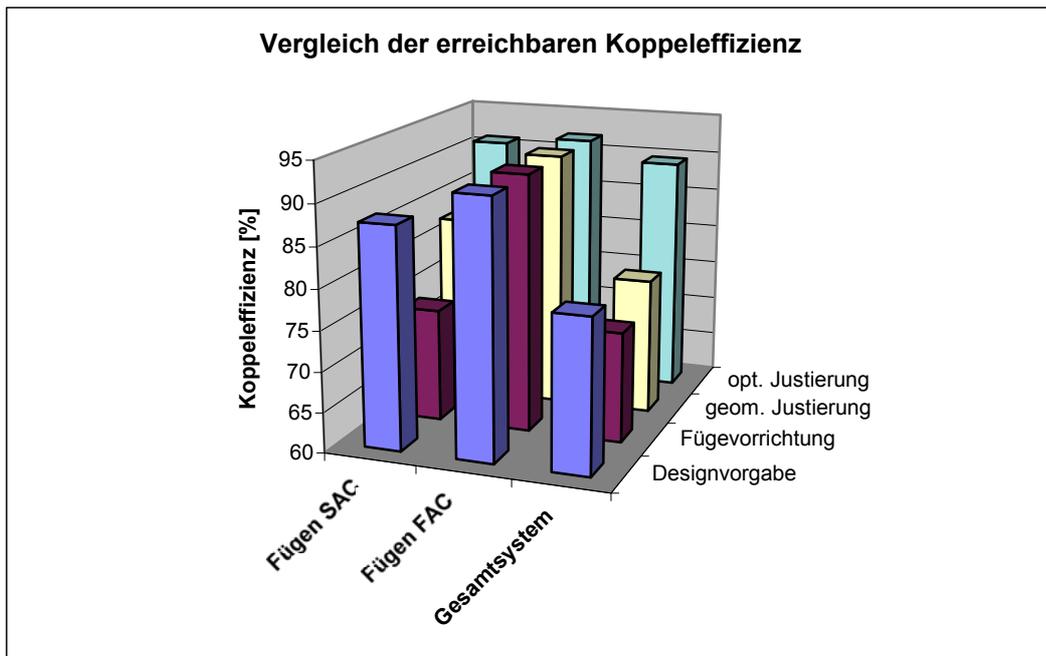


Abb. 7.4 Vergleich der theoretisch erreichbaren Koppel-effizienzen

Diese Simulationen bzgl. der Messwerte bestätigen, dass mit den gefügten Baugruppen Koppelleffizienzen erreicht werden müssen, die im Bereich der Vorgaben des optischen Designs liegen. Die Effizienzwerte bilden die Diskussionsgrundlage für den Vergleich mit den Werten der experimentellen Koppelleffizienzmessungen. Bzgl. der Simulationenwerte der Koppelleffizienzen ist einschränkend zu beachten, dass sowohl für die einzelnen Fügeschritte als auch für die Betrachtung der gesamten mikrooptischen Baugruppe ein optimal justierter Funktionsaufbau der übrigen Systemkomponenten (LD, Faser) zugrunde liegt.

7.1.2 Koppelleffizienz der gefügten Baugruppen

Mit Hilfe des zweiten Prüfverfahrens wurde die Fügequalität der mikrooptischen Baugruppe anhand der optischen Funktion bestimmt. Hierzu werden die Baugruppen nach Abb. 6.20 in den Funktionsaufbau des Gesamtsystems integriert und die effektive Strahlleistung der Baugruppe am Systemausgang (Multimode-Faser) über einen Leistungsdetektor gemessen. Tabelle 7.3 zeigt eine Übersicht über die Ergebnisse dieser Messungen, die für alle gefügten Baugruppen der untersuchten Montageprozesse bzgl. unterschiedlicher Ausgangsleistungen der Laserdiode durchgeführt wurden.

| Ausgangsleistung der Laserdiode [mW] | Vorgabe des optischen Designs KE [%] | | Positionierung mit Fügevorrichtung | | Justierung anhand äußerer Merkmale | | Justierung anhand der optischen Funktion | |
|---|--------------------------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|--|-----------------|
| | KE _{max} | KE _{gef.} | Eingek. Leistung [mW] | KE [%] gemessen | Eingek. Leistung [mW] | KE [%] gemessen | Eingek. Leistung [mW] | KE [%] gemessen |
| 50 | 92% | 80% | 35,47 | 70,94 | 36,58 | 73,16 | 41,26 | 83,14 |
| 100 | 92% | 80% | 68,28 | 68,2 | 74,23 | 74,23 | 79,99 | 81,04 |
| 150 | 92% | 80% | 102,35 | 68,23 | 109,56 | 73,04 | 125,78 | 83,85 |
| 200 | 92% | 80% | 142,56 | 71,28 | 151,94 | 75,97 | 163,84 | 81,92 |
| 250 | 92% | 80% | 179,37 | 71,74 | 188,76 | 75,5 | 199,68 | 79,87 |
| 300 | 92% | 80% | 214,78 | 71,59 | 228,86 | 76,28 | 248,51 | 82,83 |
| 350 | 92% | 80% | 245,54 | 70,15 | 256,81 | 73,37 | 294,33 | 84,09 |
| 400 | 92% | 80% | 276,52 | 69,13 | 290,71 | 72,67 | 290,71 | 82,78 |
| 450 | 92% | 80% | 309,42 | 68,76 | 327,41 | 72,75 | 372,68 | 82,81 |
| 500 | 92% | 80% | 348,96 | 69,79 | 369,57 | 73,91 | 369,57 | 82,52 |
| Durchschnittliche Koppelleffizienz | | | | 69,9% | | 74,3% | | 82,5% |

Tab. 7.3 Mittelwerte der Koppelleffizienzmessung bzgl. der gefügten Baugruppen

Grundlage dieser Messwerte ist eine statistische Auswertung der gefügten Baugruppen über mehrere Wiederholungsmessungen pro Baugruppe und die Mittelung der Messwerte über die Anzahl der gefügten Baugruppen. Zur Fehlerminimierung bei den Vergleichsmessungen wurden diese unter konstanten Umgebungsbedingungen (Reinraumbedingungen, Temperaturkonstanz $\pm 1\text{K}$, definierte Erwärmungsphase der Laserdiode) durchgeführt.

Tab. 7.3 fasst die Ergebnisse dieser Koppeffizienzmessungen zusammen. Diese bestätigen die unterschiedlichen Fügequalitäten der untersuchten Montageprozesse anhand der jeweils erreichten Koppeffizienzen. Die Abbildungen 7.5 und 7.6 zeigen eine graphische Darstellung der Messergebnisse, wobei lediglich die Justierung anhand der optischen Funktion die geforderte Funktion von 80% Koppeffizienz erfüllt. Die übrigen Montageverfahren weisen entsprechend der in Kapitel 5 aufgezeigten Unterschiede der Einflussgrößen einen Abfall der Funktion bis auf ca. 70% auf.

Vergleicht man die theoretisch berechneten Koppeffizienzen aus Tab. 7.2 mit den durchschnittlichen Messwerten aus Tab. 7.3 erkennt man eine systematische Verschlechterung der Koppeffizienzen bzgl. aller untersuchten Verfahren von 4-5%. Eine Erklärung für diese Abweichungen liegt in der Aufnahme der Baugruppe in den Funktionsaufbau mittels einer mechanischen Halterung (Hülse mit gekoppelter Faser). Diese wurde als Wechselaufnahme konzipiert, um alle Baugruppen charakterisieren zu können, wodurch Abweichungen auftreten, die bei der Simulation nicht berücksichtigt wurden. Die Komponenten wurden dabei als ideal justiert betrachtet. In Wirklichkeit treten folgende Abweichungen auf:

- Die Ausrichtung der Laserdiode auf dem Träger. Diese Abweichung ist für die vorliegenden Auswertungen von untergeordneter Bedeutung, da diese durch den Justiervorgang kompensiert wird. Messungen zum Nah- und Fernfeld der Laserdiode haben ergeben, dass die Messwerte im Bereich der Herstellerangaben liegen, so dass bzgl. der Laserfunktion ebenfalls keine maßgebenden Abweichungen zu erwarten sind.
- Die Ausrichtung der mikrooptischen Baugruppe zur Stirnfläche der Faser (Einkoppelstelle der Lichtleistung). Diese ist abhängig von den Fertigungsabweichungen der Bohrung und dem Achsversatz der beiden Bohrungen für Baugruppe und Ferrul mit integrierter Faser. Basierend auf mehrfachen Messungen wurde ein zufälliger Fehler in x- und y-Richtung von $\pm 4\ \mu\text{m}$ und in z-Richtung von $+40\ \mu\text{m}$ bezogen auf das Gesamtsystem festgestellt, der durch den Justiervorgang nicht ausgeglichen werden kann. Um eine Aussage über den Einfluss dieses Fehlers auf die Messung zu erhalten, wurden Simulationen für diese Systemkomponente durchgeführt (Abb. 7.7). Aus den Ergebnissen der Simulation und den zulässigen Abweichungen aus Tab. 4.2 lässt sich ableiten, dass Fügeabweichungen in den obengenannten Dimensionen nur einen geringen Einfluss auf die Funktion des mikrooptischen Systems ausüben. Eine Verschlechterung des Effizienzverlustes von 4% bezogen auf das Gesamtsystem ist aber vorstellbar.
- Als zusätzliche Einflussgröße sind Verschmutzungen und Blasen in den Klebstoffschichten denkbar. Bei den geometrischen Messungen wurden solche Fehler aber nur vereinzelt festgestellt.

Die Abbildungen 7.5 und 7.6 weisen außerdem Nichtlinearitäten auf, die untypisch für Leistungskennlinien von Dioden sind. Diese sind auf Modensprünge der Laserdiode zurückzuführen, die eine unterschiedliche Ausleuchtung der Faser über den Messvorgang

verursachen können. Bezogen auf die tendenzielle Beurteilung der Verfahren ist dieses Verhalten aber irrelevant.

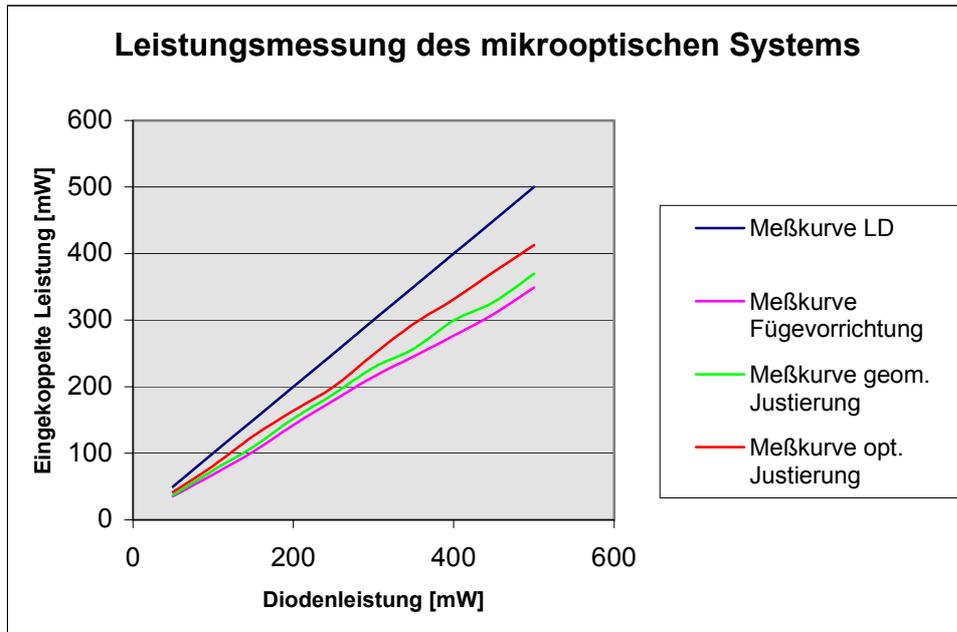


Abb. 7.5 Vergleich der Ergebnisse der Leistungsmessung der mikrooptischen Baugruppen

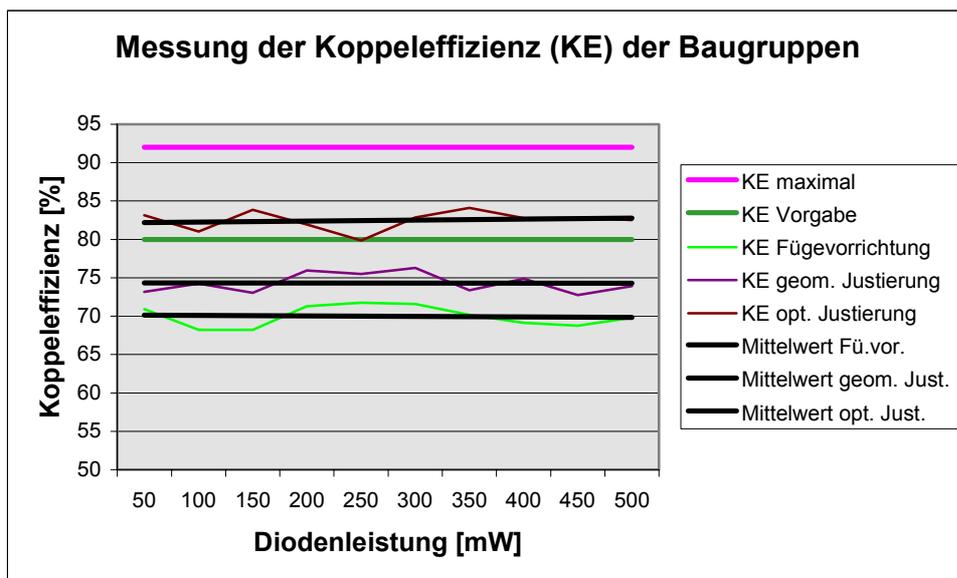


Abb. 7.6 Vergleich der Messergebnisse der Koppelleffizienzmessung

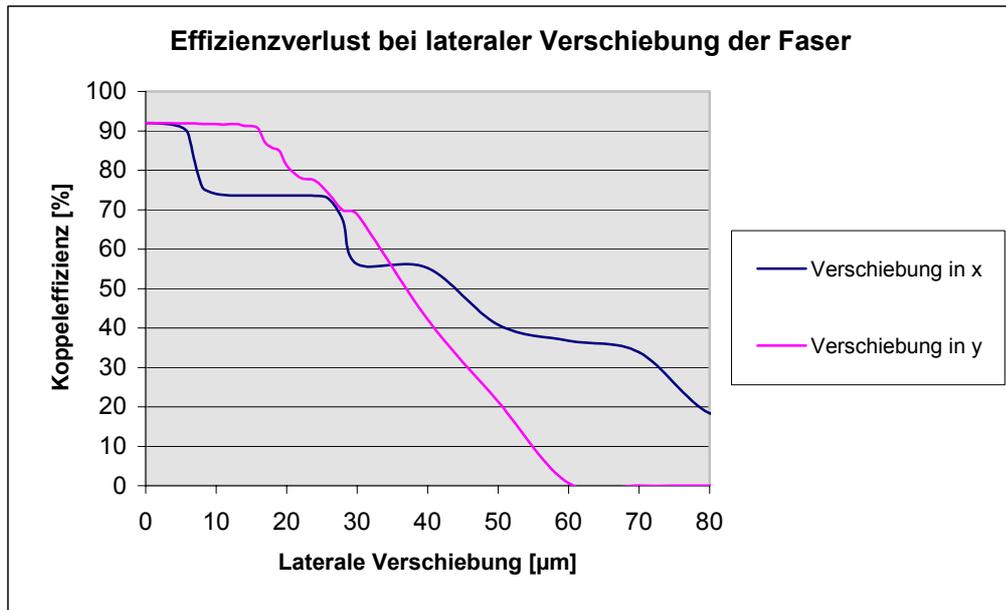


Abb. 7.7 Abnahme der Koppeleffizienz bei lateraler Verschiebung der Multimode-Faser

8 Diskussion

8.1 Vergleich der Untersuchungsergebnisse

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich zwei grundsätzliche Aussagen ableiten:

1. Es wurde eine Systematik zur theoretischen Fehleranalyse komplexer automatisierter Montageprozesse mikrooptischer Systeme aufgestellt, die als Hilfsmittel zur Auslegung der benötigten Prozesse, der Montageumgebung sowie zur Abschätzung der Montageergebnisse genutzt werden kann.
2. Es wurden automatisierte Montageprozesse für die Montage mikrooptischer Systeme entwickelt, die auf dem Einsatz von Fügevorrichtungen zur Positionierung der Bauteile bzw. auf Justieranordnungen basieren. Die Eignung dieser Prinzipien für die automatisierte Mikrooptikmontage konnte anhand der durchgeführten Untersuchungen eindeutig nachgewiesen werden. Aus den Fügegenauigkeiten, die mit den jeweiligen Verfahren erreicht wurden, lassen sich deren mögliche Anwendungsgebiete ableiten.

In Tab. 8.1 werden die ermittelten Ergebnisse bzgl. der einzelnen Fügeschritte und der untersuchten Montageverfahren vergleichend gegenübergestellt. Diese umfassen sowohl die Fügeabweichungen, die sich aus den theoretischen Berechnungen und den experimentellen Untersuchungen ergeben, als auch die Simulation der Koppeffizienz, die aus den Abweichungen resultiert. Zur Beurteilung der einzelnen Ergebnisse werden diese mit den Vorgaben des optischen Designs verglichen. Hieraus folgt grundsätzlich:

1. Die simulierten Koppeffizienzen aus den theoretisch ermittelten und gemessenen Abweichungen liegen für die einzelnen Fügeschritte sehr nahe beieinander.
2. Die ermittelten Koppeffizienzen der experimentellen Messungen weichen dagegen deutlich von den Werten der simulierten Koppeffizienz des Gesamtsystems ab.
3. Die Abweichungen zwischen dem ersten und zweiten Fügeschritt verursachen unterschiedlich große Effizienzverluste, obwohl der Betrag der Abweichungen vergleichbar groß ist.
4. Die Addition der Abweichungen beider Fügeschritte verursacht einen deutlichen Abfall der Koppeffizienz gegenüber den einzelnen Fügeschritten.

| Prozessschritt | Vorgabe opt. Design | Positionierung mit Fügevorrichtung | | | Justierung anhand äußerer Merkmale | | | Justierung anhand der optischen Funktion | | |
|--|---|--|--|-----------------------|--|--|-----------------------|--|--|-----------------------|
| | | Zulässige Abweichungen für KE von 80% | Theorie | Experimentell (geom.) | Experimentell (opt.) (nur KE) | Theorie | Experimentell (geom.) | Experimentell (opt.) (nur KE) | Theorie | Experimentell (geom.) |
| 1. Abweichung der Flächenschwerpunkte von SELFOC- und SAC-Linse [µm] | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \text{n. erf.}$ $\Delta T_z = \pm 7$ $\Delta T\varphi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\varphi_y = \pm 0,13^\circ$ $\Delta T\varphi_z = \pm 2^\circ$ | $\Delta T_x = 0 / -4$ $\Delta T_y = \text{n. erf.}$ $\Delta T_z = +1 / -3$ $\Delta T\varphi_x = 0,2^\circ$ $\Delta T\varphi_y = 0,1^\circ$ $\Delta T\varphi_z = 0,1^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 7,5$ $\Delta T_y = \text{n. erf.}$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,6^\circ$ | | $\Delta T_x = \pm 4,5$ $\Delta T_y = \text{n. erf.}$ $\Delta T_z = \pm 5,5$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,1^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,1^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 4$ $\Delta T_y = \text{n. erf.}$ $\Delta T_z = \pm 5$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,4^\circ$ | | $\Delta T_x = \pm 0,5$ $\Delta T_y = \text{n. erf.}$ $\Delta T_z = \pm 3$ $\Delta T\varphi_x = \pm 0,1^\circ$ (kann nur indirekt erfasst werden) | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \text{n. erf.}$ $\Delta T_z = \pm 6$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,5^\circ$ | |
| Koppeleffizienz | 85,4% | 88,0% | 74,0% | | 89,1% | 80,6% | | 91,8% | 90,9% | |
| 2. Abweichung der Flächenschwerpunkte von SELFOC- und FAC-Linse [µm] | $\Delta T_x = \text{n. erf.}$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta T\varphi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta T\varphi_y = \pm 0,13^\circ$ $\Delta T\varphi_z = \pm 2^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n. erf.}$ $\Delta T_y = +0 / -2$ $\Delta T_z = +2 / -4$ $\Delta T\varphi_x = 0,1^\circ$ $\Delta T\varphi_y = 0,5^\circ$ $\Delta T\varphi_z = 0,4^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n. erf.}$ $\Delta T_y = \pm 6$ $\Delta T_z = \pm 8$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,5^\circ$ | | $\Delta T_x = \text{n. erf.}$ $\Delta T_y = \pm 5,5$ $\Delta T_z = \pm 6,5$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,1^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,1^\circ$ | $\Delta T_x = \text{n. erf.}$ $\Delta T_y = \pm 2,5$ $\Delta T_z = \pm 5$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,3^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,3^\circ$ | | $\Delta T_x = \text{n. erf.}$ $\Delta T_y = \pm 0,5$ $\Delta T_z = \pm 3$ $\Delta T\varphi_x = \pm 0,1^\circ$ (kann nur indirekt erfasst werden) | $\Delta T_x = \text{n. erf.}$ $\Delta T_y = \pm 2$ $\Delta T_z = \pm 7$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,1^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,1^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,4^\circ$ | |
| Koppeleffizienz | 91,2% | 91,7% | 91,7% | | 91,7% | 91,7% | | 91,9% | 91,7% | |
| 3. Abweichungen bzgl. der Gesamtbaugruppe [µm] | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \pm 3$ $\Delta T_z = \pm 15$ $\Delta T\varphi_x = \pm 0,6^\circ$ $\Delta T\varphi_y = \pm 0,26^\circ$ $\Delta T\varphi_z = \pm 4^\circ$ | $\Delta T_x = +5 / -3$ $\Delta T_y = -4 / -14$ $\Delta T_z = +1 / -9$ $\Delta T\varphi_x = 0,6^\circ$ $\Delta T\varphi_y = 0,4^\circ$ $\Delta T\varphi_z = 0,5^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 7,5$ $\Delta T_y = \pm 6$ $\Delta T_z = \pm 16$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,6^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,3^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 1,1^\circ$ | | $\Delta T_x = \pm 4,5$ $\Delta T_y = \pm 5,5$ $\Delta T_z = \pm 12$ $\Delta T\varphi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\varphi_y = \pm 0,2^\circ$ $\Delta T\varphi_z = \pm 0,2^\circ$ | $\Delta T_x = \pm 4$ $\Delta T_y = \pm 2,5$ $\Delta T_z = \pm 10$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,5^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,4^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,7^\circ$ | | $\Delta T_x = -1 / -3$ $\Delta T_y = -1 / -3$ $\Delta T_z = \pm 6$ $\Delta T\varphi_x = \pm 0,2^\circ$ (kann nur indirekt erfasst werden) | $\Delta T_x = \pm 3$ $\Delta T_y = \pm 2$ $\Delta T_z = \pm 13$ $\Delta\varphi_x = \pm 0,2^\circ$ $\Delta\varphi_y = \pm 0,3^\circ$ $\Delta\varphi_z = \pm 0,9^\circ$ | |
| Koppeleffizienz | 80,0% | 73,7% | 73,6% | 69,9% | 80,7% | 77,0% | 74,3% | 88,0% | 88,4% | 82,5% |
| Abweichung zur theoretischen Effizienz | | | -0,1% | -3,8% | | -3,7% | -6,4% | | +0,4% | -5,5% |
| Abweichung zur Vorgabe des opt. Designs | | | -6,4% | -10,1% | | -3,0% | -5,7% | | +8,8% | +2,5% |

Tab. 8.1 Vergleich der ermittelten Abweichungen und Koppeleffizienzwerte für die untersuchten Positionier- und Justierverfahren

Diese Differenzen lassen sich anhand der charakteristischen Strahlableitung des Systems (vergl. Kap. 5, Abb. 5.15 bis 5.17) folgendermaßen beschreiben und diskutieren.

- Aufgrund des Profils der Strahlformung auf der Stirnfläche der Faser (Einkoppefläche) erfolgt bei lateraler Verschiebung der Komponenten eine unterschiedlich starke Ablenkung des Intensitätsprofils und daraus resultierend ein unterschiedlich großer Effizienzverlust.
- Bei gleichzeitiger Ablenkung der Intensitätsverteilung in horizontaler und vertikaler Richtung (x,y) kommt es aufgrund der kreisförmigen Einkoppefläche der Faserstirnfläche

zu einer Verstärkung der Auslöschung der Intensität (Abb. 8.1). Dies erklärt insbesondere den starken Abfall der Koppelleffizienzwerte von bis zu 10% für die Gesamtbaugruppe, wenn SAC- und FAC-Linse mit deren unterschiedlicher Empfindlichkeit in x- bzw. y-Richtung gefügt werden.

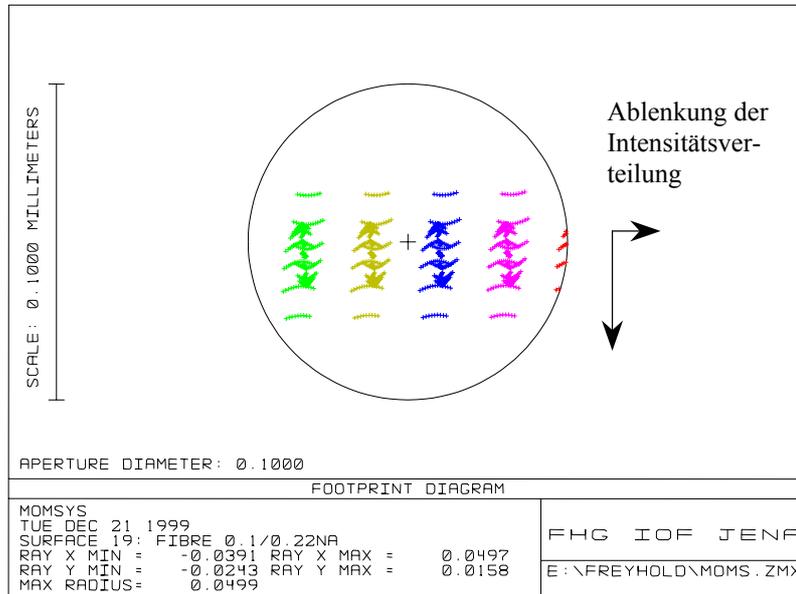


Abb. 8.1 Laterale Ablenkung der Intensitätsverteilung in x- und y-Richtung

Die weiteren Abweichungen zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten lassen sich folgendermaßen erklären:

1. Die Werte der Koppelleffizienz, die aus den Berechnungen und der geometrischen Charakterisierung der Baugruppen hervorgehen, weisen Abweichungen <1% auf. Diese sind für die vergleichenden Betrachtungen vernachlässigbar klein und bestätigen die Übertragbarkeit der Abschätzung von Montageabweichungen auf komplexe automatisierte Montageprozesse der Mikrooptik. Das Justierverfahren anhand äußerer Merkmale weicht hiervon aus folgendem Grund ab:
 - Die größeren Abweichungen bei den Koppelleffizienzen dieses Justierverfahrens sind auf eine fehlerhafte Abschätzung der Einflussgrößen zurückzuführen. Dies gilt insbesondere für die Abweichungen, die durch den komplexen dreidimensionalen Bildverarbeitungsprozess hervorgerufen werden. Die Genauigkeit dieses Systems hängt von den Einflussgrößen Kalibrierung, Positionierung, Bauteilgüte und Beleuchtung ab. Diese Faktoren beeinflussen sich auch gegenseitig, woraus eine Verfälschung des Messergebnisses resultieren kann. Besonders empfindlich sind die Messungen bzgl. der Winkellage der Bauteile im Raum. Durch eine veränderte Beleuchtung bzw. Ausbrüche der Bauteilkanten innerhalb der Messbereiche kommt es zu Fehlern bei der Kantendetektion, die einen Fehler bei der Berechnung des Flächenschwerpunktes und damit bei der Bestimmung der Fügeposition hervorrufen.

2. Der Vergleich der Koppelleffizienzen aus den theoretischen Berechnungen und den experimentellen Untersuchungen zeigt einen Abfall der Werte von Theorie zu Experiment von ca. 5% für die untersuchten Verfahren.
- Aufgrund der deutlichen Unterschiede der Messergebnisse aus geometrischer Charakterisierung der Bauteile und Funktionsprüfung, muss diese zusätzliche Fehlergrößen aufweisen. Hierzu zählen:
 - Mangelhafte Antireflexionsschichten der Bauteile und eine daraus folgende Verschlechterung der Transmission
 - Verschmutzungen der Baugruppen (Stirnflächen, Fügeflächen und Klebschicht), die Streuverluste an den Partikeln bewirken
 - Lageabweichungen der Bezugsachse von SELFOC-Linse und Faser in der Fassung von $\pm 4\mu\text{m}$ (Kap. 7)
 - Verluste an der Koppelstelle Faser / Detektor

Legt man den ermittelten Effizienzabweichungen Richtwerte [16] für Verluste an nicht entspiegelten Übergangsflächen (4%) und die in Kap. 7 erläuterten Verluste aufgrund der Lageabweichungen der Bezugsachse von SELFOC-Linse und Faser zugrunde, so liegen die experimentellen Abweichungen im Bereich der zu erwartenden Verlustbeträge für die Funktionsprüfung.

8.2 Anwendungsbereiche der untersuchten Montageprozesse in der automatisierten Montage mikrooptischer Systeme

Tabelle 8.2 stellt die Ergebnisse dar, die für die untersuchten Montageprozesse bzgl. der Fügegenauigkeiten erreicht wurden, und beschreibt die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren.

| | Positionierung | Justierung | |
|--|--|---|---|
| | mit Fügevorrichtungen | anhand äußerer Merkmale | anhand der optischen Funktion |
| Funktionsprinzip | Positionierung des Bauteils anhand dessen Geometrie über mechanische Anschläge und unterstützende Haltemechanismen | Justierung des Bauteils anhand dessen Geometrie bzw. Kontur über ein 3D-Inspektionssystem | Justierung des Bauteils anhand einer optischen Regelgröße, die der realen Funktion bzw. einer geeigneten Hilfsfunktion entspricht |
| Ergebnisse bzgl. Justiergenauigkeit des Demonstratorsystems | <ul style="list-style-type: none"> Erreichte Genauigkeit pro Fügeschritt $\pm 8\mu\text{m}$ Erreichte Koppel-effizienzen ca. 70% | <ul style="list-style-type: none"> Erreichte Genauigkeit pro Fügeschritt $\pm 4\mu\text{m}$ Erreichte Koppel-effizienzen >75% | <ul style="list-style-type: none"> Erreichte Genauigkeit pro Fügeschritt $\pm 2,5\mu\text{m}$ Erreichte Koppel-effizienzen >80% |
| Vorteile des Verfahrens | <ul style="list-style-type: none"> kostengünstiges Verfahren relativ hohe Reproduzierbarkeit der Position über definierte Anschläge Verfahren auch für Mikrosysteme ohne optische Funktion geeignet | <ul style="list-style-type: none"> Hohe Fügegenauigkeit durch geregelten Prozess Erfassung der Fügeabweichungen in allen Freiheitsgraden mit hoher Genauigkeit Verfahren auch für Mikrosysteme ohne optische Funktion geeignet | <ul style="list-style-type: none"> Hohe Fügegenauigkeit durch geregelten Prozess Teilweise Kompensation von Fügeabweichungen möglich Qualitätssicherung durch Funktionsprüfung bei Montagevorgang |
| Nachteile des Verfahrens | <ul style="list-style-type: none"> kein geregelter Prozess direkte Abhängigkeit von Fertigungsabweichungen der Komponenten und den Abweichungen zwischen geometrischer Achse und Bezugsachse Abweichungen addieren sich auf | <ul style="list-style-type: none"> hoher Geräteaufwand direkte Abhängigkeit von Fertigungsabweichungen der Komponenten und den Abweichungen zwischen geometrischer Achse und Bezugsachse Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen (Beleuchtung, Kalibrierung) Abweichungen addieren sich auf | <ul style="list-style-type: none"> hoher Geräteaufwand Funktionsaufbau in der Montageumgebung nur bedingt realisierbar Keine direkte Zuordnung der Einflussgrößen auf Abweichungen des jeweiligen Fügeschritts möglich |

Tab. 8.2 Gegenüberstellung der untersuchten Montageprozesse

Aus diesen Ergebnissen lassen sich für die untersuchten Verfahren folgende Anwendungsbereiche ableiten:

- Die **Positionierung** von mikrooptischen Komponenten **mit Fügevorrichtungen** kann die Vorgaben des optischen Designs zur Realisierung der Funktion dieses Demonstratorsystems nicht erfüllen. Trotzdem ist dieses Montageprinzip für den Einsatz in der automatisierten Mikromontage geeignet. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mit diesem Aufnahmeprinzip eine hohe Reproduzierbarkeit des Positioniervorganges erreicht wird. Die Positioniergenauigkeit und damit das Fügeergebnis resultiert aus den Fertigungsabweichungen der Vorrichtung und der Systemkomponenten, so dass diese aufgabenspezifisch je nach Komplexität der Anordnung und dem einsetzbaren Fertigungsverfahren der Vorrichtung weit höhere Genauigkeiten erreichen können. Ein Beispiel hierfür ist die submikrometergenaue Positionierung von Fasern in Si-V-Nuten.

Allgemein kann man sagen, dass dieses Verfahren sehr kostengünstig und für Genauigkeitsforderungen im Bereich von $\pm 10\mu\text{m}$ bis $\pm 50\mu\text{m}$ pro Fügeschritt einsetzbar ist. Dabei ist zu beachten, dass die tatsächlich erreichbare Fügegenauigkeit direkt von der Komplexität des Gesamtsystems abhängt. Der Prozess ist sehr gut in manuelle Fertigungsprozesse und einfache automatisierte Montageprozesse zu integrieren. Aufgrund der eingesetzten Mechanismen zur Positionsunterstützung werden für diesen Prozess keine hochgenauen Positioniereinheiten benötigt und somit zusätzlich Kosten reduziert.

- Der Einsatz einer Justieranordnung zur **Justierung** der Bauteile anhand **äußerer Merkmale**, erfüllt die Vorgaben des Designs für dieses Beispiel annähernd vollständig und erreicht eine gute Funktion der Baugruppen. Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber allen anderen liegt in der dreidimensionalen Erfassung der Bauteile in allen Freiheitsgraden durch nur ein Sensorsystem. Dieser Vorteil ist aber verbunden mit einem hohen Aufwand der Systemperipherie (Kameras, Beleuchtung) und einer geeigneten Kalibrierung des Montageraumes, um eine hohe Fügequalität zu erreichen. Mit den erreichten Genauigkeiten von $\pm 4\mu\text{m}$ pro Fügeschritt ist dieses Montageverfahren für die meisten Montageaufgaben geeignet, die in der Mikrooptik auftreten. Die Gerätekosten für dieses Verfahren sind allerdings sehr hoch, so dass der Einsatz von der Aufgabe und deren Kosteneffizienz abhängt.

Alternativ kann die Justieranordnung auch aus einer zweidimensionalen Bildverarbeitung mit unterstützenden Sensoren für die dritte Dimension (z.B. Kraftsensorik) aufgebaut sein. Ein Problem bei der Umsetzung einer solchen Anordnung ist die schwierige Integration der Sensoren aufgrund des beschränkten Bauraumes in Aufbauten der Mikromontage. Grundsätzlich werden auf dieser Basis ähnliche Ergebnisse erreichbar sein.

Ein weiterer Vorteil dieses Montageprozesses ist die Unabhängigkeit von der Funktion der Baugruppe und die Übertragbarkeit auf Mikrosysteme aus den Bereichen der Fluidik und Mechanik, die einen hohen Anteil bei der Entwicklung der Mikrosystemtechnik haben werden.

- Die **Justierung anhand der optischen Funktion** der Baugruppe ist für das untersuchte mikrooptische System die Justieranordnung, mit der die höchste Fügequalität erreicht wurde. Die Vorgaben des optischen Designs wurden für diesen Montageprozess mit Justiergenauigkeiten pro Fügeschritt von $\pm 2\mu\text{m}$ vollständig erfüllt. Dabei wurde die

Justierung nicht unter Funktionsbedingungen sondern anhand einer alternativen Regelgröße zur Justierung einer Subbaugruppe durchgeführt.

Für mikrooptische Baugruppen ist diese Art der Justierung allgemein das effektivste Verfahren und lässt sich mit einem vertretbaren Aufwand realisieren. Das Verfahren ist allerdings an Baugruppen der Optik gebunden und kann nicht auf andere Systeme der Mikrotechnik übertragen werden.

Ein Nachteil bei der Justierung anhand der optischen Funktion kann die Integrierbarkeit eines Funktionsaufbaus in die Montageumgebung sein. Eine Unterteilung des Systems in Subbaugruppen und der Einsatz eines alternativen Aufbaus zur Funktionsmessung kann eine Verschlechterung der Justierempfindlichkeit und daraus resultierend der Fügegenauigkeiten bewirken. Dies bedeutet einen zusätzlichen Entwicklungsaufwand, der auch ein Ausschlusskriterium des Justierprinzips bedeuten kann.

Ein weiterer Nachteil ist, dass nicht alle geometrischen Parameter (Winkelorientierung, Fügeabweichung entlang der Bezugsachse) die gleiche Justierempfindlichkeit aufweisen, wenn diese für die Funktion der Baugruppe von geringerer Bedeutung sind. Bei nachfolgenden Montagevorgängen können diese geometrischen Ungenauigkeiten aber zu Kollisionen o.ä. führen. Zur Lösung dieser Problemstellung ist es nötig zusätzliche Sensoren (Kraftsensorik, Autokollimationsfernrohr, o.ä.) in die Montageumgebung zu integrieren.

Um die Vorteile aller Verfahren innerhalb des ganzheitlichen Montageprozesses zu nutzen, wird es sinnvoll sein, die **untersuchten Lösungen** zur Bearbeitung von Teilprozessen der Aufgabe **geeignet zu kombinieren**. Viele Mikrosysteme bestehen aus Subbaugruppen, die unterschiedliche Genauigkeitsforderungen aufweisen. Für hohe Stückzahlen sind bei solchen Montageaufgaben Parallelaufbauten mit unterschiedlichen Positionier- und Justierverfahren ökonomisch sinnvoll einsetzbar, so dass ein hoher Durchsatz bei möglichst geringen Kosten realisiert werden kann.

8.3 Optimierung der Montageprozesse

8.3.1 Allgemeine Optimierungsansätze

Zukünftig werden die Montageprozesse durch die Weiterentwicklung der benötigten Montageperipherie optimiert werden und dadurch die Montageergebnisse weiter verbessern. Dies wirkt sich folgendermaßen aus:

- Die Kosten für die in der Mikromontage erforderlichen hochgenauen Positioniersysteme werden sinken, so dass sich die Rentabilität automatisierter Prozesse auch für geringere Stückzahlen verbessert.
- Durch Weiterentwicklungen in der Fertigungstechnik werden zukünftig die Fertigungsabweichungen der Bauteile (Systemkomponenten, Vorrichtungen,

Handhabungswerkzeuge) weiter sinken. Hierdurch kann ein entscheidender Faktor der Einflussgrößen minimiert werden.

- Aufgrund des zunehmenden Einsatzes mikrotechnischer Komponenten werden auch die Prinzipien zur Handhabung der Komponenten weiterentwickelt werden und in der industriellen Fertigung einsetzbar sein. Hierbei liegt der Bedarf insbesondere in der hochgenauen, reproduzierbaren Zentrierung der Bauteile, um eine Reduzierung der Gesamtabweichungen zu erreichen.
- Die Weiterentwicklung der Mikroelektronik wird auch die Bildverarbeitungssysteme verbessern. Es werden Empfänger mit geringeren Pixelgrößen eingesetzt werden, wodurch die Auflösung der Aufnahme gesteigert und die Fehler bei der Bauteilerkennung gesenkt werden.
- Die Verwendung eines dreidimensionalen Bildverarbeitungssystems bei den durchgeführten Untersuchungen basiert auf der mangelhaften Verfügbarkeit miniaturisierter Sensortechnik. Durch die Entwicklung der Mikrosystemtechnik werden zukünftig geeignete Sensoren (Kraft, Weg, etc.) mit ausreichenden Messbereichen verfügbar sein, die, integriert in die Justieranordnung, die Fügeabweichungen weiter reduzieren werden.

Grundsätzlich wird für jede einzelne Montageaufgabe zusätzlich eine Kosten / Nutzen-Analyse durchgeführt werden müssen, um den für die Aufgabe geeigneten Montageprozess zu ermitteln.

8.3.2 Optimierung bei der Positionierung mit Fügevorrichtungen:

Diese allgemeinen Optimierungsmöglichkeiten lassen sich für die Montage mit Fügevorrichtungen folgendermaßen ergänzen:

- Großen Einfluss auf das erreichbare Montageergebnis haben die Fertigungsabweichungen der Bauteile. Die Fertigung von Fügevorrichtungen mit verbesserter Fügequalität und der daraus resultierenden Verbesserung der Aufnahmeposition in der Vorrichtung ist in jedem Fall sinnvoll.
- Zusätzlich kann der Haltemechanismus der Vorrichtung verbessert werden. Über eine Erhöhung der Saugkraft bzw. einer Optimierung der Krafteinleitung könnte die Positionsabweichung bei der Aufnahme der Bauteile in der Vorrichtung minimiert werden.
- Zur Optimierung der Aufnahmegenaugigkeit können die Anschläge der Vorrichtung mit einem definierten Untermaß gefertigt werden. Da bei der Positionierung der Bauteile an den fixen Anschlägen keine symmetrische Verteilung der Abweichungen sondern eine einseitige Abweichung von der Soll-Position auftritt, kann durch diese Maßnahme die Häufigkeitsverteilung zugunsten der Soll-Position verschoben werden.

8.3.3 Optimierung für bildverarbeitende Verfahren

Für die Montageprozesse der Justierung anhand äußerer Merkmale bzw. anhand der optischen Funktion sind folgende ergänzende Optimierungsansätze denkbar:

- Zur Genauigkeitserhöhung der Kantendetektion ist eine Verbesserung der Fertigungsqualität nötig. Durch die Verbesserung der Bauteiloberflächen und eine Minimierung der Kantenausbrüche wird der Kontrast des Grauwertverlaufs erhöht und die Positionsbestimmung der Kante verbessert.
- Eine Miniaturisierung des Detektors bzw. der Bildverarbeitungseinheit, um eine bessere Einbindung in die raumbegrenzte Montageumgebung zu ermöglichen (z.B. Integration einer Faseroptik in das Greifwerkzeug).

Ziel bei der Umsetzung dieser Optimierungsmöglichkeiten in die verschiedenen Montageprozesse ist es, die Fügegenauigkeiten grundsätzlich weiter zu steigern. Insbesondere bei der Positionierung mit Fügevorrichtungen ist es das Ziel, sich an Genauigkeiten von kleiner $1\mu\text{m}$, die bei der Positionierung einer Faser in eine Si-V-Nut erreicht werden, anzunähern und so die Einsatzmöglichkeiten für dieses Montageprinzip zu erhöhen.

Die zur Verwirklichung dieser Optimierungsansätze nötigen Arbeiten hätten den Umfang dieser Arbeit überschritten und wurden daher nicht weiter umgesetzt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Da geeignete Montageprozesse zur Fertigung hybrider mikrooptischer Systeme z.Z. fehlen, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Entwicklung geeigneter Prozesse für diese Aufgabe. Diese Prozesse werden zukünftig benötigt, um die Forderung nach Fügegenauigkeit und Reproduzierbarkeit bei steigenden Stückzahlen in der mikrooptischen Industrie und gleichzeitiger Miniaturisierung der Komponenten erfüllen zu können. Dabei stellt sich die grundlegende Frage, ob die Umsetzung dieser Forderungen mit preisgünstigen, unregelmäßigen Positionierverfahren realisiert werden kann oder eine Regelung der Fügeposition in Form von Justieranordnungen in den Montageprozess integriert werden muss.

Die Forderungen an die Fügegenauigkeiten werden in der Mikrooptik durch das optische Design der Optikbaugruppe vorgegeben. Um die Realisierbarkeit der Genauigkeitsforderungen abschätzen zu können, sind alle Abweichungen zu erfassen. Zum besseren Verständnis dieser Vorgehensweise wurde diese an einem beispielhaften Demonstratorsystem durchgeführt. Dieses System beinhaltet mehrere unterschiedliche mikrooptische Komponenten und gewährleistet die Übertragbarkeit auf andere optische Baugruppen. Für die Fehlerbetrachtung ist grundsätzlich eine Unterscheidung zwischen zufälligen und systematischen Fehlergrößen vorzunehmen, um den Betrag und die Orientierung der Abweichungen für die Berechnungen bestimmen zu können. Zusätzlich werden die Einflussgrößen des Montageprozesses nach Messfehlern oder Fertigungsabweichungen unterschieden. Beide lassen sich durch eine Reihenentwicklung nach Taylor beschreiben und über eine Addition zu einer Gesamtabweichung zusammenfassen.

Grundsätzlich werden bei jedem Montageprozess zur Realisierung der Teilprozesse Zuführung, Handhabung, Positionierung, Fügen und Funktionsprüfung periphere Einheiten und Vorrichtungen benötigt. Für den Montageprozess des vorliegenden Demonstratorsystems wurde ein Präzisions-Sechs-Achsen-Knickarm-Roboter als Positioniersystem eingesetzt, der eine Positioniergenauigkeit kleiner ein Mikrometer gewährleistet. Außerdem wurden in dieser Arbeit Komponenten für die beschriebenen Teilprozesse entwickelt, die bzgl. der Fertigungsgenauigkeiten, des Materials, und der erforderlichen Geometrien für Greifwerkzeuge und Bauteilaufnahmen an das vorgegebene Anforderungsprofil angepasst wurden. Die verwendeten Prinzipien dieser Vorrichtungen sind so konzipiert, dass deren Übertragung auf andere Aufgaben einfach möglich ist.

Die Ausrichtung der mikrooptischen Systemkomponenten entsprechend den Vorgaben eines optischen Designs kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

1. Über einen unregelmäßigen Montageprozess, dessen Fügegenauigkeit durch eine einmalige Positionierung der Komponenten ohne die Möglichkeit einer Korrektur vorgegeben ist. Ein Beispiel hierfür ist die Positionierung der Bauteile mit Hilfe von Fügevorrichtungen, in denen diese über definierte Anschläge zueinander ausgerichtet werden.

2. Über Montageprozesse mit integrierten Justieranordnungen, die sich anhand der Regelgröße weiter in zwei Prinzipien untergliedern lassen:
 - eine Justierung der Komponenten anhand charakteristischer äußerer Merkmale (Kanten, Justiermarken) und
 - eine Justierung der Komponenten anhand der optischen Funktion

Diese Verfahren weisen Unterschiede bzgl. der Integrationsfähigkeit in die Montageumgebung, der benötigten Peripherie und der theoretisch erreichbaren Fügegenauigkeiten auf. Zur Charakterisierung dieser Montageprozesse in der automatisierten Mikrooptikmontage wurden beispielhafte Untersuchungen anhand des Demonstratorsystems durchgeführt. Aufbauend auf dem beschriebenen Positioniersystem wurde für jedes Montageverfahren eine geeignete Montageumgebung entwickelt und experimentell umgesetzt. Diese Experimentalaufbauten bestehen aus:

1. Einer Fügevorrichtung für den unregelmäßigen Montageprozess. In dieser Vorrichtung werden die Fügekomponenten über definierte Anschläge zueinander ausgerichtet. Zusätzlich sind in die Vorrichtung Hilfsmechanismen eingebaut, die eine Fixierung der Bauteile an der vorgegebenen Position gewährleisten.
2. Einer Justieranordnung mit zwei hochgenauen telezentrischen Kameras, die nach dem Prinzip der passiven Photogrammetrie eine dreidimensionale Justierung der Komponenten anhand charakteristischer äußerer Merkmale (Kanten, Justiermarken) ermöglicht.
3. Einer Justieranordnung, die eine Justierung der Komponenten anhand der optischen Funktion realisiert. Hierzu wird ein Justierstrahl in die Baugruppe eingekoppelt und die Bauteile bzgl. maximaler Intensität zueinander ausgerichtet.

Entsprechend der beschriebenen Aufschlüsselung der Einflussgrößen wurden diese für alle Montageprozesse und den daran beteiligten Einheiten messtechnisch bestimmt und anhand der Fehlerrechnung eine Berechnung der Fügeabweichungen durchgeführt. Die Ergebnisse liefern folgende Abstufung der theoretisch erreichbaren Fügegenauigkeiten bezogen auf die untersuchten Montageprozesse:

- $\pm 8\mu\text{m}$ beim Einsatz der Fügevorrichtung
- $\pm 3\mu\text{m}$ bei der Justierung anhand äußerer Merkmale
- $\pm 2\mu\text{m}$ bei der Justierung anhand der optischen Funktion

Die Differenzen zwischen den Ergebnissen der theoretisch erreichbaren Fügegenauigkeiten basieren auf der unterschiedlichen Anzahl an Einflussgrößen beim jeweiligen Montageprozess. Um die berechneten Werte zu bestätigen, wurden für die verschiedenen Montageprozesse experimentelle Untersuchungen mit einer Probenanzahl von jeweils mehr als 30 Baugruppen durchgeführt. Hierzu wurde das mikrooptische System des Demonstrators mit dem jeweiligen Verfahren gefügt und die Proben mittels zwei Messverfahren bzgl. der Funktion und der geometrischen Fügequalität ausgewertet. Die Messwerte ergeben folgende Fügeabweichungen:

- $\pm 8\mu\text{m}$ beim Einsatz der Fügevorrichtung
- $\pm 4\mu\text{m}$ bei der Justierung anhand äußerer Merkmale

- $\pm 2,5\mu\text{m}$ bei der Justierung anhand der optischen Funktion

Die Ergebnisse der optischen Simulationsrechnungen, der geometrischen Charakterisierung der gefügten Baugruppen sowie die experimentellen Messwerte der Koppel effizienzen weisen Differenzen mit systematischem Charakter auf. Diese lassen sich zurückführen auf:

- Fehlerhafte Annahmen bei den theoretischen Betrachtungen, insbesondere für die Messfehler beim Einsatz des dreidimensionalen Bildverarbeitungsprozesses (komplexe gegenseitige Beeinflussung der Einflussgrößen Kalibrierung, Positionierung, Bauteilgüte und Beleuchtung).
- Mangelhafte Antireflexionsschichten der Bauteile und eine daraus folgende Verschlechterung der Transmission
- Positionierabweichungen der optischen Baugruppe innerhalb des Aufbaus zur Funktionsprüfung. Diese Abweichungen konnten in der Fehlerrechnung des jeweiligen Montageprozesses nicht berücksichtigt werden.
- Verluste an der Koppelstelle Faser / Detektor

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen aber, dass alle Verfahren für Aufgaben der Mikrooptikmontage geeignet sind. Die jeweiligen Einsatzbereiche sind primär von den geforderten Genauigkeiten der Aufgabe, der Montageumgebung und den Kosten der Prozessaufbauten abhängig und teilen sich wie folgt auf:

- Aufgrund der geringen Gerätekosten sind Montageprozesse auf Basis von Fügevorrichtungen geeignet für Genauigkeitsforderungen größer $\pm 10\mu\text{m}$. Dies gilt insbesondere für manuelle Fertigungsprozesse und einfache automatisierte Montageprozesse, die keine hochgenauen Positioniereinheiten benötigen. Die tatsächlich erreichbaren Fügegenauigkeiten dieses Verfahrens sind aufgrund der fehlenden Regelung direkt von der Qualität der beteiligten Komponenten abhängig. D.h., die Fertigungsabweichungen der Vorrichtung und aller Fügekomponenten sind entscheidend für die erreichbaren Fügegenauigkeiten.
- Die untersuchten Montageprozesse, die auf einer Justieranordnung basieren, sind aufgrund höherer Fügegenauigkeiten auch für Aufgaben im Bereich $< 10\mu\text{m}$ geeignet.
 - Mit Hilfe der Justierung anhand äußerer Merkmale können Genauigkeiten deutlich kleiner $\pm 10\mu\text{m}$ pro Fügeschritt erreicht werden. Dieser Genauigkeitsbereich reicht für viele Aufgaben in der Mikrooptik aus. Für die aufgabenspezifisch erreichbaren Fügegenauigkeiten sind aber auch hier die Einflussgrößen, wie Beleuchtung und Fertigungsqualität der Komponenten entscheidend. Desweiteren ist der Einsatz dieses Verfahrens aufgrund der sehr hohen Gerätekosten von ökonomischen Gesichtspunkten abhängig.
 - Anordnungen zur Justierung mikrooptischer Baugruppen anhand der optischen Funktion stellen eine sehr effiziente Montagevariante dar, die nicht sehr kostenintensiv ist. Mit der hier verwendeten Justieranordnung wurden Justiergenauigkeiten pro Fügeschritt von $\pm 2,5\mu\text{m}$ erreicht. Diese Genauigkeiten können bei Aufgaben, die empfindlichere Justieranordnungen ermöglichen, weiter gesteigert werden. Das Verfahren ist allerdings an Baugruppen der Optik

gebunden und kann nicht auf Systeme anderer mikrotechnischer Aufgaben übertragen werden.

Zukünftig bestehen gute Chancen die Fügeergebnisse bei der Montage mikrooptischer Systeme weiter verbessern. Dies kann insbesondere durch die Weiterentwicklung fertigungstechnischer Verfahren und prozessbegleitender Einrichtungen erreicht werden. Hierdurch werden die Fertigungsabweichungen der Bauteile und Vorrichtungen minimiert sowie das Auflösungsverhalten und die geometrische Integration miniaturisierter Sensor- und Aktortechniken in die Montageumgebung optimiert.

Der Aufwand zur Entwicklung der Montageumgebung und zur Durchführung der Untersuchungen für die drei beschriebenen Montageprozesse war sehr umfangreich. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen lediglich für ein beispielhaftes mikrooptisches Demonstratorsystem durchgeführt. Hierfür wurde ein System bestehend aus unterschiedlichen Linsentypen ausgewählt, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere mikrooptische Systeme zu gewährleisten. Die Ergebnisse können aber dennoch keine vollständige Allgemeingültigkeit für sich beanspruchen, da sowohl die verwendeten Komponenten als auch die untersuchten Prozessvarianten nicht alle möglichen Aufbauten abdecken können.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten eine Grundlage für weitergehende Untersuchungen auf dem Gebiet der automatisierten Mikrooptikmontage. Hier sind insbesondere Untersuchungen hinsichtlich der Verbindung monolithischer und hybrider Komponenten zu modular aufgebauten Mikrosystemen nötig. Damit verbunden sind Untersuchungen auf dem Gebiet der Aufbau- und Verbindungstechnik, um die Forderung der Industrie nach ausreichender Langzeitstabilität der gefertigten Systeme zu erfüllen. Ziel dieser Untersuchungen muss es sein, montagegerechte, preisgünstige Baukastenmodule für die Mikrooptik sowie die Mikrosystemtechnik zu entwickeln und so das Potenzial dieser Technologien für den industriellen Einsatz zu erhöhen.

10 Verzeichnis der Formelzeichen

| Formelzeichen | Erklärung |
|----------------------|---|
| Y | Messgröße |
| \bar{Y} | Mittelwert der Messgröße |
| s | Stichprobenvarianz |
| N | Anzahl der unabhängigen Einzelgrößen |
| i,k,m,n | Laufvariablen |
| x | Messwert |
| K | Korrekturfaktor |
| F | Fehlerbehaftete Funktion von N verschiedenen Fehlergrößen |
| F_0 | Ideale Funktion von N verschiedenen Fehlergrößen |
| ΔF | Gesamtfehler |
| g | Funktion aller unabhängigen Einzelgrößen |
| f | Unabhängige Einzelgrößen |
| h | Systematischer Fehler von f |
| M | Toleriertes Maß |
| M_0 | Schlussmaß |
| M_i | Einzelmaße |
| M'_i | Projizierte Einzelmaße |
| C | Soll- bzw. Toleranzmittenmaß |
| T | Toleranzgrenze |

$T_{i,k,m}$

Allgemeine Funktion der Abweichungen

ΔT_i

Abweichung des Gesamtmontageprozesses bezogen auf alle unabhängigen Einflussgrößen

11 Literaturverzeichnis

- [1] Menz, W., Bley, P.,
Mikrosystemtechnik für Ingenieure
VCH-Verlag Weinheim (1993)
- [2] N.N.
Marktentwicklungsstudie des NEXUS- Network of Excellence in Multifunctional Microsystems-,
1999
- [3] N.N.
VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik
Beuth-Verlag 1990
- [4] Eberhardt, R., et.al.
Abschlußbericht des BMBF-Verbundprojektes „Microfeed“ 1995-1998,
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik,
VDI/VDE-IT, Teltow, 1998
- [5] Heitzelmann E.
Komplexe Visionsysteme für sehende Roboter (4), Algorithmen für die dritte Dimension
In Technische Rundschau 29/30 (1993), S.36-40
- [6] Hoffmann C., Merkel K.
Messen und Prüfen in der rechnergestützten Montage von Präzisionsoptik
In Feinwerktechnik & Messtechnik 99 (1991) 12, S.519-523
- [7] Slomba A.F.
Critical alignment techniques for precision lens assemblies
In Proceedings of SPIE Vol. 1996 Optical Alignment (1993), p.19-26
- [8] Guyenot, V.,
Lichtelektrische Auswertung von Reflexbildern bei der Zentrierfehlerprüfung
In Feingerätetechnik 30 (1981) 3, S. 121-123
- [9] Palumbo L.J.
Automated alignment of complex optical systems using a simplex optimization algorithm
In Proceedings of SPIE Vol. 1996 Optical Alignment (1993), p.88-99
- [10] Pforte, H.,
Werkstoffe der Feinoptik,
Gehlen, 1993
- [11] N.N.
DIN 3140, Maß- und Toleranzangaben für Optikeinzelteile
- [12] N.N.
DIN 58170, Maß- und Toleranzangaben für optische Systeme
- [13] Hanke, P.,
Linsen und Spiegelsysteme exakt positionieren
In Feinwerktechnik und Messtechnik, F+M, Band 99 (1991), Heft 1/2, S.24-26

- [14] Paul R. Yoder, Jr.,
Mounting Lenses in Optical Instruments
Spie Optical Engineering Press, Bellingham, 1995
- [15] N.N.
DIN 58753 Feinkitte für die Optik
Einteilung, Forderungen, Prüfung
- [16] Naumann, H., Schröder, G.,
Bauelemente der Optik
Hanser Verlag, 1992
- [17] Haferkorn, H.,
In Lexikon der Optik,
VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1990
- [18] Springsguth, S.,
Rechnergesteuertes Justierkleben,
In Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Ilmenau, Band 37 (1991) Heft 5, S. 187-195
- [19] Höhne, G., Nönnig, R., Heß, D., Hoffmann, R.,
Justieruntersuchungen zum Ausrichten von optischen und mechanischen Achsen
In 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 20.-23.09.1999,
Vortragsband 3, S. 346-352
- [20] Siebenhaar, C.; Guyenot, V.,
Position adjustment of miniaturized components by application of impulsive force
In International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering (UMES),
Braunschweig 1997
- [21] Illing, M.,
Industrielle Foundry für Si-Oberflächenmikromechanik
In Kongreßband Micro-Engineering 1997, Statusseminar Fertigungstechnik S. 63-68,
- [22] Althaus H.L., et al.,
Microsystems and wafer processes for volume production of highly reliable fiber optic
components for telecom- and datacom- application
In IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology Part B, Vol. 21,
No. 2, May 1998, p. 147-156
- [23] N.N.
BMBF-Projekt "Industrielle Produktion von Mini- und hochintegrierten Endoskopen (MEP),
Statusseminar innerhalb IPA-Seminar: Produktionstechnik für Mikrosysteme "Pro Mikro", Nov.
1996, Institutszentrum der Fraunhofer Gesellschaft, Stuttgart-Vaihingen,
- [24] Eberhardt R., Scheller T., et. al.,
Abschlußbericht des BMBF-Verbundprojektes "Montage mikrooptischer Systeme (MOMSYS)"
1996-1999,
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 61,
VDI/VDE-IT, Teltow, 1999
- [25] Ossig F., et. al.,
Abschlußbericht des BMBF-Verbundprojektes "Montage (MFV)" 1994-1997,
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 61,
VDI/VDE-IT, Teltow, 1997

- [26] Eberhardt, R., et.al.,
In Abschlußbericht des TMWFK-Verbundprojektes „Aufbautechnik von
Mikroklebeverbindungen für die Optik“ 1997-1998,
- [27] Gengenbach, U., et al.,
Montage hybrider Mikrosysteme
In 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik 02.-03.04.1999, Karlsruhe, S.17-24,
Wissenschaftliche Berichte FZKA 6080
- [28] Hesselbach J.,
Advanced technologies for microassembly
In Proceedings of SPIE "Microrobotics and Microsystem Fabrication", Pittsburgh Okt.1997, Vol.
3202, p. 178-190
- [29] Kunstmann, Ch., Weißmantel, H.,
Ein Telemanipulator mit Rückmeldung von Greif- und Fügekräften für die Mikromontage
In 44. IWK Ilmenau, 1999,
- [30] Allegro S., et al.,
Automated microassembly by means of a micromanipulator and external sensors
In Proceedings of SPIE "Microrobotics and Microsystem Fabrication", Pittsburgh Okt.1997, Vol.
3202, p. 108-116
- [31] Andreasch W., et.al.,
Flexible automated assembly of microoptical elements (Optical SMD)
In Proceedings of SPIE Boston Nov.1996, Vol.2906, p. 18-22
- [32] Hollis, R.P.,
Der Robot-Schwarm,
In Bild der Wissenschaft 6/1998
- [33] Lee, S., Fan, L., Wu, M.C.,
Optical MEMS: Huge Possibilities for Lilliputian-sized Devices,
In Optics and Photonics News, p. 25-29, June 1998.
- [34] Ishihara H.,
Miniaturized autonomous robot
In Proceedings of SPIE "Microrobotics and Microsystem Fabrication", Pittsburgh Okt.1997, Vol.
3202, p. 191-196
- [35] N.N.
Produktkatalog Positioniersysteme
Sysmelec 1999
- [36] N.N.
Produktkatalog Motion Control
Newport GmbH 1999
- [37] N.N.
Produktblatt Movemaster RV
Mitsubishi Electric Europe 1998
- [38] N.N.
Produktblatt H454BN
Epson Deutschland GmbH 1999

- [39] Eberhardt, R., Scheller, T., Gebhardt, A.,
Conventional Microfabrication for Microassembly Applications,
In Proceedings of SPIE, Symposium on "Design, Test and Microfabrication of MEMS/MOEMS",
Paris, 30.03-01.04.1999, SPIE Vol. 3680 Part Two, p.687-695,
- [40] N.N.
DIN 32561, „Fertigungsmittel für Mikrosysteme; Werkstückträger, Anschlußmaße und
Toleranzen“, 1998
- [41] Schmutz, W.,
Magazin zur Fixierung von Kleinteilen,
IPA-Seminar: Produktionstechnik für Mikrosysteme "Pro Mikro", Nov. 1996, Institutszentrum
der Fraunhofer Gesellschaft, Stuttgart-Vaihingen,
- [42] Grimme, R., et.al.,
Modular magazine for the suitable handling of microparts in industry
In Proceedings of SPIE "Microrobotics and Microsystem Fabrication", Pittsburgh Okt.1997, Vol.
3202, p. 157-167
- [43] N.N.
Bedienungshandbuch KoordinatenMessgerät Typ UMC 850
Fa. Carl Zeiss
- [44] N.N.
Produktblatt „Opto-taktiler Taster“
Fa. Werth Messtechnik GmbH 1998,
- [45] Hesse, S.,
Greiferpraxis,
Vogel-Verlag1991,
- [46] Seegräber, L.,
Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter
Expert-Verlag 1993
- [47] Eberhardt, R., Scheller, T.,
Automated Assembly of Microoptical Components,
In Proceedings of SPIE "Microrobotics and Microsystem Fabrication", Pittsburgh Okt.1997, Vol.
3202, p. 117-127
- [48] N.N.
Produktkatalog Sommer Automatisierungstechnik, 1999
- [49] N.N.
Firmenkatalog SMC, 1998
- [50] Weiss, K., Kamrath, W.,
Technische Lösungen zur Manipulation von Mikroobjekten bei der Anwendung von Licht- bzw.
Rasterelektronenmikroskopie
In Seminarunterlagen Montage von Mikrosystemen (VDI/VDE-IT), Stuttgart 1999
- [51] N.N.
Produktkatalog Schunk Greiftechnik 1998
- [52] Salim, R., Wurmus, H., et.al.
Microgrippers created in microstructurable glass
In Microsystem Technologies 4 (1997), p. 32-34
Springer Verlag 1997

- [53] Greitmann, R., et.al.
Tactile microgripper for automated handling of microparts
In Sensors and Actuators A53 (1996), p. 410-415
- [54] Hesselbach, J., Pitschellis, R., Stock, H.,
Optimization and Control of Electrically Heated Shape Memory Alloys
In Actuator 1994, Bremen
- [55] Henschke, F.,
Miniaturgreifer und montagegerechtes Konstruieren in der Mikromechanik
VDI-Verlag 1994
- [56] Bark, C.,
Adhäsives Greifen: Die Innovation in der Mikromontage
Kurzinformation Nr. 50 des ipa-iao-teg-s-FhG, 1995, S.3
- [57] Feddema, J.T.,
Experiments in Micromanipulation and CAD-Driven Microassembly
In Proceedings of SPIE "Microrobotics and Microsystem Fabrication", Pittsburgh Okt.1997, Vol. 3202, p. 98-107
- [58] Sulzmann A.,
3D computer vision for microassembly stations and microfabrication
In Proceedings of SPIE "Microrobotics and Microsystem Fabrication", Pittsburgh Okt.1997, Vol. 3202, p. 42-53
- [59] Menzel, E-M.,
Teilbericht des BMBF-Verbundprojektes "Montage mikrooptischer Systeme (MOMSYS)" 1996-1999,
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 61,
VDI/VDE-IT, Teltow, 1999
- [60] Lee, A.,
High-powered laser diode transmitter with integrated microlens for fast axis collimation
In Proceedings of SPIE Microoptics Integration and Assemblies, Apr.1998, Vol. 3289, p. 33-42,
- [61] Laas, F.,
Optische Bauteile positionieren,
In F&M 102 (1994) 3,
- [62] Eberhardt, R., Scheller, T., et.al.,
Mikrooptische Komponenten für die Endoskoptechnik, Schlußbericht
Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur (TMWFK), 1999
- [63] Schreiber, P.,
FhG.IOF, interne Dokumentation, Jena, 1997
- [64] N.N.
Handbuch Strahlformungssoftware ZEMAX 7.2b
Fa. Focus Software, 1998
- [65] Hansen, F.,
Justierung- eine Einführung in das Wesen der Justierung von technischen Gebilden
VEB-Verlag Technik, Berlin, 1967
- [66] Krause, W.,
Gerätekonstruktion
VEB Verlag Technik Berlin, 1986

- [67] Latyev, S.M.,
Zu einigen Fragen der Fehlerkorrektur in Feingeräten
In Feingerätetechnik 31, Heft 4/1982,
- [68] Nönnig, R.,
Lehrblätter zur Vorlesung „Justierung“ des Fachbereiches Konstruktionstechnik
TU Ilmenau 1999
- [69] Gränicher, W.H. Heini,
Messung beendet-Was nun? Einführung und Nachschlagewerk für die Planung und
Auswertung von Messungen
Hochsch-Verlag 1996
- [70] Trumpold, H.,
Toleranzsysteme und Toleranzdesign
Hanser-Verlag 1997
- [71] Jorden, W.,
Form- und Lagetoleranzen
Hanser-Verlag 1998
- [72] N.N.
DIN-ISO 1319
- [73] N.N.
TGL 19115/03 Berechnung von Maß- und Toleranzketten; Maximum-Minimum-Methode
Beuth-Verlag, Berlin
- [74] N.N.
TGL 19115/004-06 Berechnung von Maß- und Toleranzketten; Kompensationsmethode,
Methode der Gruppenaustauschbarkeit
Beuth-Verlag, Berlin
- [75] Taniguchi, N.,
Current Status in and Future of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing
In Annals of CIRP Vol. 32/2/1983, P. 573-582
- [76] N.N.
Produktkatalog LINOS GmbH, 1999
- [77] Meisel, A.,
3D-Bildverarbeitung für feste und bewegte Kameras
Vieweg-Verlag 1994
- [78] N.N.
Produktblatt MACOR®
Corning 1996,
- [79] Urban, K.,
Entwicklung eines modularen Systems zur Handhabung mikrooptischer Bauelemente
Diplomarbeit FH Jena / FhG-IOF, 1996
- [80] Scheller, T., Juhasz, J., Eberhardt, R.,
A force sensing system detecting adhesive thickness during microassembly processes
In H. Reichl, E. Obermeier (ed.): Micro System Technologies 98 (1998), p. 718-720, ISBN 3-
8007-2421-9

- [81] Keil, S.,
Beanspruchungsermittlung mit Dehnmessstreifen
CUNEUS Verlag Zwingenberg 1995
- [82] Döring, M.,
Teilbericht des BMBF-Verbundprojektes "Montage mikrooptischer Systeme (MOMSYS)" 1996-1999,
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 61,
VDI/VDE-IT, Teltow, 1999
- [83] Seifert, R.,
Konzeption und Entwicklung einer Justierungsvorrichtung zum passiven Fügen mikrooptischer Bauteile anhand einer beispielhaften Linsenbaugruppe
Diplomarbeit Fachhochschule Ulm / FhG-IOF
- [84] Lenhardt, K., Kopp, H.,
Teilbericht des BMBF-Verbundprojektes "Montage mikrooptischer Systeme (MOMSYS)" 1996-1999,
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 61,
VDI/VDE-IT, Teltow, 1999

12 Veröffentlichungen

Eberhardt, R., Scheller, T., Tittelbach, G., Guyenot, V.,
Assembly of Microoptical Elements by Adhesive Bonding,
In DVS-Berichte Band 184 Joining Ceramics, Glass and Metal Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS)
Jena, May, 12-14, 1997

Eberhardt, R., Scheller, T.,
Entwicklung eines modularen Montagesystems zum Fügen mikrooptischer Komponenten
In Proceedings of Microengineering 97, Messe Stuttgart, 24-26 Sept. (1997), S.163-170

Eberhardt, R., Scheller, T., Tittelbach, G., Guyenot, V.,
Automated Assembly of Microoptical Components,
In Proceedings of SPIE Vol. 3202, 16-17th Oct. 1997, Pittsburgh Microrobotics and Microsystem Fabrication,
p. 117-127, ISBN 0-8194-2634-2

Scheller, T., Juhasz, J., Eberhardt, R.,
A force sensing system detecting adhesive thickness during microassembly processes
In: H. Reichl, E. Obermeier (ed.): Micro System Technologies 98 (1998), p. 718-720, ISBN 3-8007-2421-9

Eberhardt, R., Scheller, T., et. al.
Automated assembly of microcomponents supported by a 3D-inspection system
In: H. Reichl, E. Obermeier (ed.): Micro System Technologies 98 (1998), p. 249-255, ISBN 3-8007-2421-9

Eberhardt, R., Scheller, T., Gebhardt, A.,
Conventional Microfabrication for Microassembly Applications,
In Proceedings of SPIE, Symposium on "Design, Test and Microfabrication of MEMS/MOEMS", Paris, 30.03-
01.04.1999, SPIE Vol. 3680 Part Two, p.687-695,

Scheller, T.,
Teilbericht zum Abschlußbericht des BMBF-Verbundprojektes "Montage mikrooptischer Systeme
(MOMSYS)" 1996-1999,
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 61,
VDI/VDE-IT, Teltow, 1999 Statusseminar Stuttgart

Eberhardt, R., Scheller, T.,
Montage mikrooptischer Systeme,
In Seminarberichte des iwv München Nr.44, Automatisierte Mikromontage, Handhaben und Positionieren
von Mikrobauanteilen, München 15. April 1999, S. 7-1 bis 7-15,
Herbert Utz Verlag Wissenschaft 1999

Scheller, T., Eberhardt, R.,
Positionier- und Justierprinzipien für die automatisierte Montage mikrooptischer Systeme
In: 44. IWK 99, Tagungsband 3 (1999), S. 316-321

Eberhardt, R., Scheller, T., et.al.,
Mikrooptische Komponenten für die Endoskoptechnik, Schlußbericht
Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur (TMWFK), 1999

Karthe, W., Eberhardt, R., Scheller, T.,
Hybrid Integration of Microoptical Systems – Step by Step to Wafer Scale integration,
Proceedings of the International Seminar on Precision Engineering and Micro Technology, July 2000,
Aachen, Germany, Verlag Rhiem Voerde, p.89-101,

Eberhardt, R., Scheller, T., Mohaupt, M.,
Hybrid Assembly of Microoptical Systems,
In Vorbereitung für MICRO.tec 2000, VDE World Microtechnologies Congress, Sept. 25.-27.2000, Expo
2000, Hannover, Germany

Vorträge:

Eberhardt, R., Scheller, T.,
Entwicklung eines modularen Montagesystems zum Fügen mikrooptischer Komponenten
In Proceedings of Microengineering 97, Messe Stuttgart, 24-26 Sept. (1997), S.163-170

Eberhardt, R., Scheller, T., Tittelbach, G., Guyenot, V.,
Automated Assembly of Microoptical Components,
In Proceedings of SPIE Vol. 3202, 16-17th Oct. 1997, Pittsburgh Microrobotics and Microsystem Fabrication,
p. 117-127, ISBN 0-8194-2634-2

Eberhardt, R., Scheller, T., Gebhardt, A.,
Conventional Microfabrication for Microassembly Applications,
In Proceedings of SPIE, Symposium on "Design, Test and Microfabrication of MEMS/MOEMS", Paris, 30.03-
01.04.1999, SPIE Vol. 3680 Part Two, p.687-695,

Scheller, T.,
Teilbericht zum Abschlußbericht des BMBF-Verbundprojektes "Montage mikrooptischer Systeme
(MOMSYS)" 1996-1999,
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 61,
VDI/VDE-IT, Teltow, 1999 Statusseminar Stuttgart

Scheller, T., Eberhardt, R.,
Positionier- und Justierprinzipien für die automatisierte Montage mikrooptischer Systeme
In: 44. IWK 99, Tagungsband 3 (1999), S. 316-321

13 Anhang

Abbildungsverzeichnis:

| | |
|--|----|
| Abb. 1.1 Schematischer Aufbau des Demonstratorsystems [63]..... | 8 |
| Abb. 2.1 Einzelprozesse des Montageablaufes nach VDI-Richtlinie 2860 [3]..... | 9 |
| Abb. 2.2 Justierung anhand äußerer Merkmale (Ausrichtung des Faserendes in einer V-Nut nach Justiermarken) [26]..... | 13 |
| Abb. 2.3 Komplexer Aufbau einer Justieranordnung zur Messung des optischen Signals (Reflexbild) [8]..... | 13 |
| Abb. 2.4 Beispiele für Montageprinzipien der konventionellen Optik | 15 |
| Abb. 2.5 Flexible Fabrikationslinie [32]..... | 18 |
| Abb. 2.6 Optisches Bauelement in Si-Mikromechanik [33] | 18 |
| Abb. 2.7 Aus Linear- und Drehachsen aufgebautes Positioniersystem [24] | 20 |
| Abb. 2.8 Arbeits- und Schwenkbereich eines Robotersystems [37]..... | 20 |
| Abb. 2.9 Magazin mit formangepassten Aufnahmen [39]..... | 21 |
| Abb. 2.10 Werkstückträger für mikrosystemtechnische Bauteile nach DIN 32561 [40] | 21 |
| Abb. 2.11 Vakuumgreifer [49]..... | 23 |
| Abb. 2.12 piezoelektrischer Greifer [52] | 23 |
| Abb. 2.13 Formgedächtnis-greifer [53]..... | 23 |
| Abb. 2.14 Justiermarke zur Ausrichtung bzgl. einer zylindrischen Linse..... | 24 |
| Abb. 2.15 hochgenaue LIGA-Strukturen als Justiermerkmal..... | 24 |
| Abb. 2.16 Intensitätsmessung zur Positions-ermittlung bei der Justierung [61]..... | 24 |
| Abb. 2.18 Hilfsvorrichtung für die manuelle Mikrooptikmontage einer Endoskop-Frontoptik [62] | 25 |
| Abb. 4.1 Mikrooptisches System zur Strahlformung einer Breitstreifenlaserdiode..... | 30 |
| Abb. 5.1 Schematische Darstellung der Fehlerermittlung bzgl. der Einflussgrößen auf einen Montageprozess [68]..... | 34 |
| Abb. 5.2 Beispielhafte Maßkette an einer Baugruppe | 37 |
| Abb. 5.3 Schematische Darstellung der Einflussgrößen bei einem automatisierten Montageprozess mikrooptischer Komponenten | 40 |
| Abb. 5.4 Erreichbare Bearbeitungsgenauigkeiten bezogen auf das Bearbeitungsverfahren nach Taniguchi [75]..... | 41 |
| Abb. 5.5 Mögliche Verteilungen der Fertigungsabweichungen bei Bearbeitung mikrooptischer Komponenten [71]..... | 42 |
| Abb. 5.6 Bezug der Systemkomponenten im verwendeten Koordinatensystem..... | 43 |
| Abb. 5.7 Einflussgrößen der verwendeten Werkzeuge und Vorrichtungen auf den Montageprozess | 45 |

| | |
|--|----|
| Abb. 5.8 Einflussgrößen auf den Montageprozess bei Einsatz von Fügevorrichtungen | 47 |
| Abb. 5.9 Einflussgrößen auf den Montageprozess bei Justierung anhand geometrischer Merkmale | 50 |
| Abb. 5.10 Einflussgrößen auf den Montageprozess bei Justierung anhand der optischen Funktion | 53 |
| Abb. 5.11 Abnahme der Koppeffizienz bei lateraler Verschiebung der GRIN-Linsen..... | 55 |
| Abb. 5.12 Abnahme der Koppeffizienz bei lateraler Verschiebung der SELFOC-Linse..... | 56 |
| Abb. 5.13 Abnahme der Koppeffizienz bei Winkelabweichung der FAC-Linse..... | 56 |
| Abb. 5.14 Abnahme der Koppeffizienz bei Winkelabweichung der SAC-Linse..... | 57 |
| Abb. 5.15 Intensitätsverteilung bei fehlerfreier Montage der Baugruppe..... | 58 |
| Abb. 5.16 Vertikale Drift der Intensitätsverteilung..... | 58 |
| Abb. 5.17 Horizontale Drift der Intensitätsverteilung | 58 |
| Abb. 5.18 Vergleich der theoretisch erreichbaren Koppeffizienzen bzgl. Fügeschritt und Justierverfahren (s. Tab. 5.7) | 59 |
| Abb. 6.1 Präzisions-Sechs-Achsen-Knickarm-Roboter | 60 |
| Abb. 6.2 Interferometermessungen zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit des Positioniersystems..... | 60 |
| Abb. 6.3 Schematischer Aufbau der Greiferaufnahme [79]..... | 62 |
| Abb. 6.4 Revolverkopfsystem mit Aufnahmen für sieben Werkzeuge..... | 62 |
| Abb. 6.5 Vakuumgreifer mit formangepassten, selbstzentrierenden Aufnahmen | 63 |
| Abb. 6.6 Integration eines Kraftsensors in die Sauggreifer [80] | 63 |
| Abb. 6.7 Schematische Darstellung des Montageteisches | 64 |
| Abb. 6.8 schematischer Aufbau der Fügevorrichtung | 66 |
| Abb. 6.9 Detailansicht der gefertigten Füge-vorrichtung mit Aufnahmekonturen | 66 |
| Abb. 6.10 Fügekomponenten, die durch Anschläge und Positioniermechanismen in der Fügevorrichtung ausgerichtet werden..... | 67 |
| Abb. 6.11 Prinzip der passiven Photogrammetrie zur Bestimmung von Raumpunkten [77]..... | 68 |
| Abb. 6.12 Integration des Bildverarbeitungs-systems in die Montageumgebung | 68 |
| Abb. 6.13 Kalibrieraufnahme | 69 |
| Abb. 6.14 Schwerpunktbestimmung der SELFOC-Linse | 69 |
| Abb. 6.15 Kantenbestimmung der SAC-Linse..... | 69 |
| Abb. 6.16 Kantenbestimmung der FAC-Linse | 69 |
| Abb. 6.17 Prinzipskizze des manuellen Versuchsstandes | 72 |
| Abb. 6.18 Verteilung der gemessenen Flächenintensität für die FAC-Linse..... | 72 |
| Abb. 6.19 Schematischer Aufbau der Justieranordnung in der Montageumgebung..... | 74 |
| Abb. 6.20 (a-g) Messaufnahmen zur Justierung der FAC-Linse | 75 |
| Abb. 6.21 Prinzipskizze der Messaufbauten zur Messung der Fügegeometrie der Baugruppen | 77 |
| Abb. 6.22 Prinzipskizze des Messaufbaus zur Messung der Koppeffizienz des Gesamtsystems .. | 78 |
| Abb. 7.1 Vergleich der Abweichungen beim ersten Fügeschritt (Restbaugruppe optimal justiert vorausgesetzt) | 82 |
| Abb. 7.2 Vergleich der Abweichungen beim zweiten Fügeschritt (Restbaugruppe optimal justiert vorausgesetzt) | 82 |

| | |
|---|----|
| Abb. 7.3 Vergleich der gesamten Fügeabweichungen bezogen auf die gefügte mikrooptische Baugruppe..... | 83 |
| Abb. 7.4 Vergleich der theoretisch erreichbaren Koppeffizienzen..... | 84 |
| Abb. 7.5 Vergleich der Ergebnisse der Leistungsmessung der mikrooptischen Baugruppen | 87 |
| Abb. 7.6 Vergleich der Messergebnisse der Koppeffizienzmessung | 87 |
| Abb. 7.7 Abnahme der Koppeffizienz bei lateraler Verschiebung der Multimode-Faser | 88 |
| Abb. 8.1 Laterale Ablenkung der Intensitätsverteilung in x- und y-Richtung | 91 |