

**Ebene Keramiksubstrate und  
neue Montagetechnologien zum  
Aufbau hybrid-optischer Systeme**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Ilmenau

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Erik Beckert

Jena

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. R. Theska  
Prof. Dr.-Ing. habil. H. Thust  
Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Tünnermann

Eingereicht am: 19.05.2005

Verteidigt am: 09.11.2005

## Kurzfassung der Dissertation

Die vorliegende Arbeit stellt Untersuchungen zum Aufbau hybrid-optischer Systeme auf ebenen Keramiksubstraten vor. Das zugrundeliegende Aufbaukonzept eignet sich für miniaturisierte, freiraumoptisch-zweidimensionale Systeme, mit denen eine Vielzahl von optischen Funktionen realisiert werden kann, ebenso wie zur Integration von Bauelementen der Elektronik und Silizium-Mikromechanik. Basis der Überlegungen ist es, die aus der Fertigung elektronischer Baugruppen bekannte Hybridtechnik für Leiterplatten zu nutzen, welche auf der Verwendung von Keramikmaterialien wie Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und „Low Temperature Cofired Ceramics“ (LTCC) beruht. Solche formstabilen Keramiksubstrate können als Plattform zum Aufbau optischer Systeme genutzt werden, indem mit geeigneten Verfahren mechanische Strukturen in diesen Substraten erzeugt werden, die sich als Fassungen für optische Bauelemente eignen. Die Formenvielfalt dieser Fassungsstrukturen sowie deren geometrische Auslegung sind ein Schwerpunkt der Arbeit. Darüber hinaus werden in einem zweiten Schwerpunkt die Montagetechnologien dargestellt und charakterisiert, die notwendig sind, um optische Bauelemente in solchen Fassungsstrukturen zu positionieren bzw. zu justieren und anschließend zu fügen. Technologien der Elektronikfertigung, bei denen mittels des sogenannten „Pick&Place“ ebenfalls ebene Leiterplatten mit elektronischen Bauteilen bestückt werden, können und müssen dazu geeignet erweitert werden, da die dort zur Verfügung stehenden vier Freiheitsgrade für die Positionierung und Justierung optischer Bauelemente oft nicht ausreichen. Es werden Verfahren vorgestellt, welche die Belange der Optikmontage berücksichtigen und diese mit den Vorteilen des Bestückens von Leiterplatten vereinen.

Die Untersuchungen zu den vorgestellten Lösungsansätzen werden am Beispiel eines optoelektronischen Demonstratorsystems dargestellt. Im Ergebnis schränken nachgewiesene Strukturgenauigkeiten von  $\pm 27 \mu\text{m}$  bis  $\pm 90 \mu\text{m}$  das vorgestellte Aufbaukonzept beim einfachen Positionieren optischer Bauelemente an den mechanischen Anschlüssen der Fassungsstrukturen derzeit noch ein. Mit Justierprozessen hingegen wurden Positioniergenauigkeiten von  $< \pm 5 \mu\text{m}$  erreicht. Unter Berücksichtigung der vielfältigen nichtoptischen Funktionalitäten keramischer Substrate eignen diese sich daher vorwiegend für die nicht unbedingt höchstpräzise Integration von Optik und Elektronik auf einer gemeinsamen Systemplattformen.

## Abstract

“Planar ceramic substrates and new assembly technologies for the packaging of hybrid optical systems”

Subject of the thesis are research results concerning the packaging and assembly of hybrid optical systems. The discussed packaging concept is suitable for miniaturized, free-space and two-dimensional optical systems that allow to realize a broad range of optical functions, but it is also capable for the integration of electronic components as well as silicon micromachined parts. Basic idea is to use planar ceramic printed circuit boards (PCB) made of aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) or Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) as a system platform for the optical assembly. Ceramic PCB are already well known from electronics manufacturing and by additionally embedding mechanical mounting structures within the substrate optical components can be assembled on top of the platform. The geometrical variety of these mounting structures and their design are the first focus of the thesis. In a second part the assembly technologies are described and evaluated that are necessary to place, adjust and finally join optical components in such mounting structures. Procedures from electronics manufacturing and assembly like “Pick& Place” need to be adapted since positioning and adjustment of optical components often require more than four degrees of freedom. In the thesis two types of assembly strategies that take the issues of optical mounting into account and use mechanical stops or the adjusted optical function for a position representation of the component are evaluated.

The investigations were carried out by designing and assembling an optoelectronic demonstrator system. The results show that if the mounting structures within the ceramic PCB are used as mechanical stops for the positioning of optical components the mounting structure accuracies, currently ranging from  $\pm 27 \mu\text{m}$  to  $\pm 90 \mu\text{m}$ , constrain the packaging concept. By using adjustment processes an enhanced positioning accuracy of  $< \pm 5 \mu\text{m}$  was demonstrated. Thus and also concerning the various non-optical functionalities that can be integrated the overall conclusion of the thesis is that ceramic PCB are well suitable for the integration of optics and electronics on a common platform, especially if the demands on the positioning accuracies for the optical components are above  $5 \mu\text{m}$ .

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>9</b>
1.1	Grundlegende Begriffe.....	9
1.2	Zielstellung der Arbeit .....	15
1.3	Applikationsbeispiel „Strahlkollimationsoptik“ .....	17
1.4	Stand der Technik.....	21
<b>2.</b>	<b>Ebene Keramiksubstrate als Plattform für hybrid-optische Systeme.....</b>	<b>31</b>
2.1	Unmittelbare Fassungsstrukturen in ebenen Substraten .....	32
2.2	Strukturierung ebener Keramiksubstrate .....	34
2.2.1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> und LTCC als Materialbasis.....	34
2.2.2	Herstellung ebener Keramiksubstrate .....	37
2.2.3	Verfahren zur Strukturierung .....	39
2.2.4	Thermomechanische Auslegung.....	46
2.3	Varianten von unmittelbaren Fassungen und Referenzstrukturen .....	48
2.3.1	Fassungsstrukturen mit mechanischen Anschlüssen .....	48
2.3.2	Sonstige Fassungsgeometrien und Referenzstrukturen.....	57
2.3.3	Zusammenfassung der theoretischen Überlegungen.....	59
2.4	Aufbaubeispiel Strahlkollimationsoptik.....	60
2.4.1	Konstruktive Auslegung der Systemplattform.....	60
2.4.2	Substratcharakterisierung und Bauelementevermessung .....	64
<b>3.</b>	<b>Montage hybrid-optischer Systeme auf ebenen Keramiksubstraten.....</b>	<b>71</b>
3.1	Besonderheiten bei der Montage optischer Bauelemente .....	72
3.2	Handhabung optoelektronischer Bauelemente .....	73
3.3	Positionier- und Justiertechnologien .....	75
3.4	Fügetechnologien .....	82
<b>4.</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>89</b>
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>93</b>
<b>6.</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>97</b>

## Verzeichnis der Abkürzungen

80Au20Sn	Lotlegierung Gold-Zinn (80 % Gewichtsanteil Gold, 20 % Gewichtsanteil Zinn)
96Sn4Ag	Lotlegierung Zinn-Silber (96 % Gewichtsanteil Zinn, 4 % Gewichtsanteil Silber)
AgPd	Silber-Palladium-Dickschichtpaste
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
AlN	Aluminiumnitrid
ATOM	Advanced Technology for Optoelectronic Modules
BeO	Berylliumoxid
BK7	Borosilikatglas
BKS	Bezugskordinatensystem
CCD	Charge Coupled Device
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid (Gaslaser, Ausgangswellenlänge 10.6 µm)
DCB	Direct Copper Bond
ESD	Electrostatic Discharge
LIGA	Lithografie-Galvanik-Abformung
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramic
MEMS	Mikroelektromechanisches System
MOEMS	Mikrooptoelektromechanisches System
MST	Mikrosystemtechnik
Nd:YAG	Neodym: Yttrium-Aluminium-Granat (Festkörperlaser, Ausgangswellenlänge 1.06 µm)
NTC	Negative Temperature Coefficient (Heißleiter)
PEEK	Polyetheretherketon
PMMA	Polymethylmethacrylat
SMD	Surface Mount Device
SnPb	Lotlegierung Zinn-Blei
TO	Transistor Outline (Richtlinie für Gehäusebauform)
TRIMO-SMD	Three Dimensional Miniaturized Optical SMD-Assembly Technique
UV	Ultraviolettes Licht im Wellenlängenbereich < 400 nm
X22CrNi17	hochlegierter Chrom-Nickel-Stahl, nicht rostend

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

A	Aperturbreite
c	normierte Welligkeit
$c_Y$	normierte Welligkeit in der Substratebene und senkrecht zur optischen Achse
$c_Z$	normierte Welligkeit in der Substratebene und in Richtung der optischen Achse
D	Foliendicke in einem Mehrlagen-Substrat
E	Elastizitätsmodul
$\vec{F}$	Fehlervektor
$F_N$	Normalkraft
$F_R$	Reibkraft
$F_Y$	Positionierkraft
$\vec{K}$	Kantenvektor
n	Lagenzahl in einer Mehrlagen-Struktur
X	X-Richtung, senkrecht zur optischen Achse und parallel zur Substratebene
Y	Y-Richtung, senkrecht zur optischen Achse und senkrecht zur Substratebene
Q	Wärmekapazität
$R_a$	mittlere Rauigkeit
R	Radius
$\vec{R}_{ideal}$	idealer Auf- bzw. Anlagevektor
$R_K$	Radius der Kantenverrundung
$\vec{R}_K$	Kantenverrundungsvektor
$\vec{R}_{Real}$	idealer Auf- bzw. Anlagevektor
$R_{th}$	thermischer Widerstand
rotX	Rotationsachse um X
rotY	Rotationsachse um Y
rotZ	Rotationsachse um Z
Z	Z-Richtung, parallel zur optischen Achse und parallel zur Substratebene

$\alpha$	Temperaturausdehnungskoeffizient
$\beta$	realer Aufgewinkel
$\vec{\delta}_A$	Abstandsänderungsvektor der Auf- bzw. Anlagekanten
$\delta_{A,X}, \delta_{A,Y}, \delta_{A,Z}$	X-, Y-, Z-Komponente des Abstandsänderungsvektors der Auf- bzw. Anlagekante
$\vec{\delta}_K$	allgemeiner Verschiebevektor der Auf- bzw. Anlagekante
$\delta_{K,X}, \delta_{K,Y}, \delta_{K,Z}$	X-, Y-, Z-Komponente des allgemeinen Verschiebevektors der Auf- bzw. Anlagekante
$\delta_R$	Radiustoleranz
$\delta_S$	Schrumpfungstoleranz
$\delta_{S,X}, \delta_{S,Z}$	Schrumpfungstoleranz in der Substratebene
$\delta_{S,Y}$	Schrumpfungstoleranz senkrecht zum Substrat
$\vec{\Delta}$	Verschiebevektor der optischen Achse
$\Delta_X, \Delta_Y$	X-, Y-Komponente des Verschiebevektors der optischen Achse
$\Delta_Z$	Verschiebung entlang der optischen Achse
$\gamma$	idealer Auf- bzw. Anlagewinkel
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	Reibwert
$\theta_{\perp}$	Divergenzwinkel in der von Senkrechten zum p-n-Übergang und Strahlrichtung einer kantenemittierenden Laserdiode („Fast Axis“) gebildeten Ebene
$\theta_{//}$	Divergenzwinkel in der Ebene des p-n-Übergangs einer kantenemittierenden Laserdiode („Slow Axis“)
$\vartheta$	Reibwinkel
$\rho$	Dichte
$\perp$	Richtung senkrecht zur Ebene des p-n-Übergangs einer kantenemittierenden Laserdiode
$//$	Richtung parallel zur Ebene des p-n-Übergangs und senkrecht zur Strahlrichtung einer kantenemittierenden Laserdiode

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena. Sie beinhaltet Ergebnisse von Forschungsprojekten des Instituts und mehreren im Rahmen von Industriekooperationen durchgeführten Arbeiten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Theska für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit und die fachlichen wie auch inhaltlichen Hinweise während der Bearbeitung meiner Promotion.

Ebenso danke ich den Gutachtern Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Thust für die fachlichen Diskussionen und die Bereitstellung von Materialien und Substraten, die wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, und Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Tünnermann, dem Leiter des Fraunhofer Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik, für die Unterstützung meiner Arbeit im Institut.

Kollegen, Projektpartner und Studenten haben mir wertvolle Impulse für diese Arbeit gegeben. Stellvertretend genannt seien hier nur Frau Dr. rer. nat. Ramona Eberhardt und Herr Christoph Damm, denen ebenso wie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts mein Dank für die unkomplizierte Zusammenarbeit und die stets wohlwollende Unterstützung gilt.

Jena, im Mai 2005

# 1. Einführung

Optische Systeme erschließen sich durch stetige Miniaturisierung, steigende Komplexität und die Integration auch nichtoptischer Bauelemente und Funktionen immer neue Anwendungsgebiete. Dabei kommen zur Erzeugung von Licht mit Hilfe optoelektronischer Bauelemente, der Manipulation von Licht über Modulation, Abbildung oder Ablenkung sowie der Detektion von Licht durch Sensorik neben optischen Bauelementen zunehmend auch solche der Elektronik, der Aktorik und der Silizium-Mikromechanik zum Einsatz. Optische Baugruppen nehmen daher zunehmend den Charakter komplexer Systeme an, die in ihrer Gesamtheit entwickelt und optimiert werden müssen. Gleichzeitig werden, von wenigen Ausnahmen aus dem Bereich der Automobil- und Unterhaltungselektronik abgesehen, aufgrund von Marktgegebenheiten nur kleine bis mittlere Stückzahlen solcher Systeme benötigt [WEI-01]. In der Vergangenheit führte das meist zu einem teuren und dem Anwendungsfall angepassten Systemaufbau, der sich an der „klassischen“ optischen Bank orientiert und Optik, Elektronik und Mechanik als weitgehend autonome Einheiten eines Gesamtsystems behandelt. Dies wird in vielen Fällen den gestiegenen Anforderungen an Funktionalität, Packungsdichte und Lebensdauer bei möglichst geringen Systemkosten nicht mehr gerecht. Ein neuer Ansatz, etablierte Technologien bei der Integration elektronischer Baugruppen auf keramischen Substraten zu nutzen, um auch optische Bauelemente darauf zu montieren und damit dem Bedürfnis nach der Integration von Optik, Elektronik und zukünftig auch der Mikromechanik zu entsprechen, ist deshalb Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

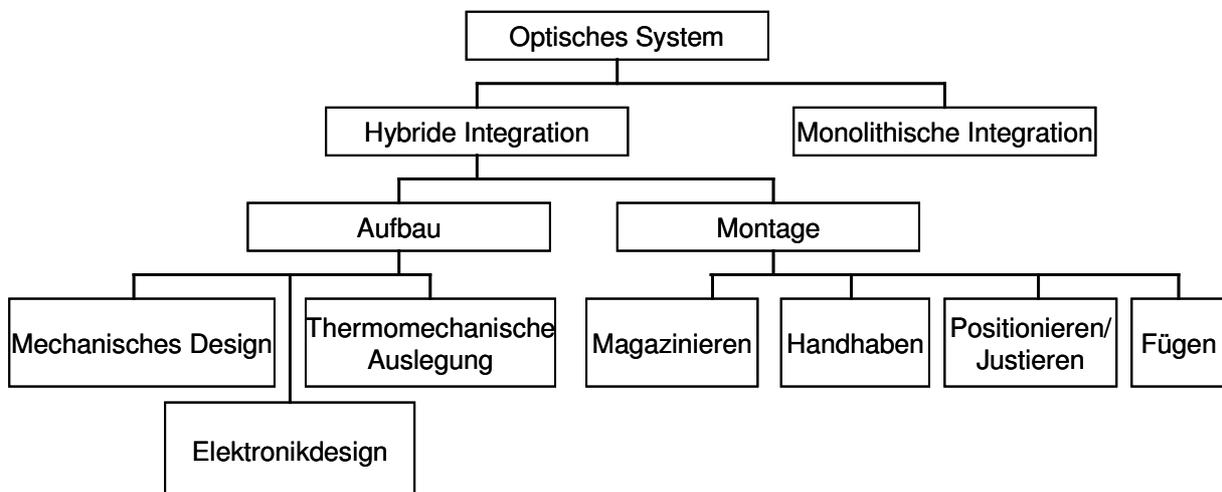
## 1.1 Grundlegende Begriffe

Vor der Darstellung der Ziele dieser Arbeit im Vergleich zum Stand der Technik und den Vor- und Nachteilen des gegenwärtigen Aufbaus optischer Systeme sollen zunächst einige grundlegende Begriffe eingeführt werden.

*Hybride* Systeme gemäß der Thematik dieser Arbeit setzen sich aus diskreten Bauelementen zusammen und bedürfen demzufolge immer der Montage als letztem Schritt der Integration [HES-02]. Die hybride Integration ist zum einen oft zwingend notwendig aufgrund unterschiedlicher Herstellungstechnologien für die zum Gesamtsystem gehörenden diskreten Bauelemente. Zum anderen wird der alternative An-

satz der monolithischen Integration von optischen Bauelementen, der auf der Prozessabfolge gleichartiger Technologien beruht (bekannt zum Beispiel aus der Halbleiterfertigung), aufgrund hoher Technologiekosten erst bei großen Stückzahlen interessant. Für kleine und mittlere Stückzahlen (bis zu 10000 Stück pro Jahr) wird die hybride Integration hingegen als kostengünstiger angesehen. Eine Mischform aus hybrider und monolithischer Integration ist das Montieren im Nutzen („Wafer-Scale-Packaging“ [KAR-00]), bei der Technologien zur Integration von Bauelementen aus verschiedenen Materialien mit Verfahren der Massenfertigung kombiniert werden.

*Hybrid-optische Systeme* erfüllen Funktionen, die von der Erzeugung über die Manipulation bis hin zur Detektion von Licht reichen. Dazu kommen abbildende und nichtabbildende optische Bauelemente wie Linsen, Prismen, Spiegel und Gitter zum Einsatz. Darüber hinaus finden aber auch elektronische Schaltkreise zur Ansteuerung und Aktoren zur Bewegung von Bauelementen Verwendung. Als Gesamtsystem ergibt sich eine komplexe Baugruppe mit primär optischer Funktion und zahlreichen sekundären nichtoptischen Funktionen. In ihrer Gesamtheit werden die Technologien für Aufbau und Montage hybrider Systeme (Bild 1) in der Fachsprache auch als „Packaging“ bezeichnet [MIC-97].



**Bild 1:** Einordnung der hybriden Integration optischer Systeme

Der *Aufbau* eines hybrid-optischen Systems beschreibt die verschiedenen Möglichkeiten der konstruktiven Gestaltung optomechanischer Bauelemente, die aus der optischen Baugruppe ein den Einsatzbedingungen entsprechendes Gesamtsystem entstehen lassen. Schwerpunkte sind hier die mechanische und thermomechanische Auslegung dieser Bauelemente verbunden mit der Auswahl geeigneter Materialien und Fertigungstechnologien, um die gewünschten optischen Eigenschaften der

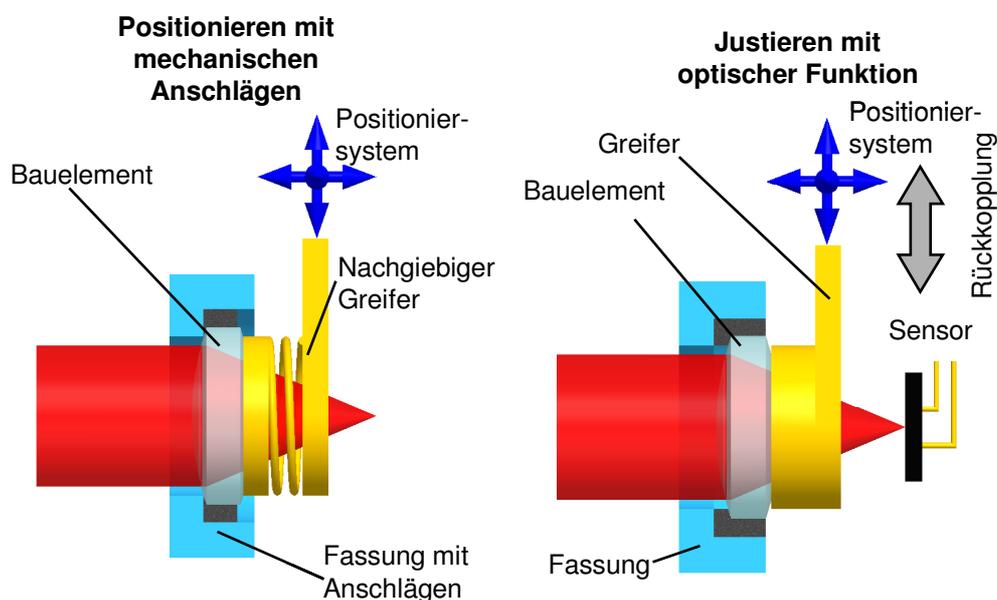
Baugruppe im montierten Zustand und unter allen Betriebs- und Lagerbedingungen zu gewährleisten. Wesentliche optomechanische Bauelemente sind die Systemplattform und Fassungen für die optischen Bauelemente.

Die *Systemplattform* stellt das Bezugskordinatensystem und die mechanische Basis zum Aufbau des hybrid-optischen Systems zur Verfügung. Für zweidimensionale freiraumoptische Systeme bieten sich ebene Plattformen an, prinzipiell sind aber beliebige und dem Anwendungsfall angepasste Bauformen möglich. Allgemeine Anforderungen an die Systemplattform sind eine ausreichende mechanische Stabilität, teilweise eine wenigstens partiell gute Wärmeleitfähigkeit, die Verfügbarkeit geeigneter Bearbeitungs- und Strukturierungstechnologien für das Material der Plattform und die Kompatibilität mit Fügeverfahren wie Klemmen, Kleben oder Löten [ZAP-04].

*Fassungen* dienen der Aufnahme optischer Bauelemente auf bzw. in der Plattform, um diese stabil in der vorgesehenen Lage zu halten [KRA-04]. Darüber hinaus soll eine Fassung den Streulichtanteil begrenzen, nicht vignettierend auf den Strahlengang wirken und bei Prismen die Totalreflexion nicht stören [NAU-92]. Als Schnittstelle zwischen oft sehr unterschiedlichen Materialien wie zum Beispiel Gläsern und Metallen kommt der konstruktiven Auslegung von Fassungen besondere Bedeutung zu. Ziel ist es, unzulässige mechanische Spannungen, die aus Fügekräften oder thermomechanischer Beanspruchung resultieren, zu minimieren, da diese zur Beeinträchtigung der Funktion oder zur Zerstörung der optischen Bauelemente führen können. Klassische Formen der Fassung sind beispielsweise Ringschneiden und Vorschraubringe für rundoptische Bauelemente (z.B. Linsen) und justierbare Aufnahmen, z.B. Prismenstühle, für planoptische Bauelemente [YOD-98]. Ist die mechanische Struktur der Fassung direkt in die Systemplattform der optischen Baugruppe integriert, bezeichnet man die Fassung als unmittelbar. Im Gegensatz dazu werden mittelbare Fassungen als separate mechanische Bauelemente ausgeführt, die die Verbindung zwischen Bauelement und Systemplattform herstellen.

Die *Montage* eines hybrid-optischen Systems umfasst die Gesamtheit der Technologien und Prozesse, mit deren Hilfe eine Baugruppe aus diskreten Bauelementen zusammengesetzt wird mit dem Ziel, jedes einzelne Bauelement an der jeweiligen Soll-Position im Gesamtsystem zu positionieren und zu fixieren [VDI2860]. Die Montage umfasst mehrere Teilprozesse. Beim Magazinieren und Zuführen erfolgt das definierten Bereitstellen der Bauelemente für den Montageprozess. Die Handhabung

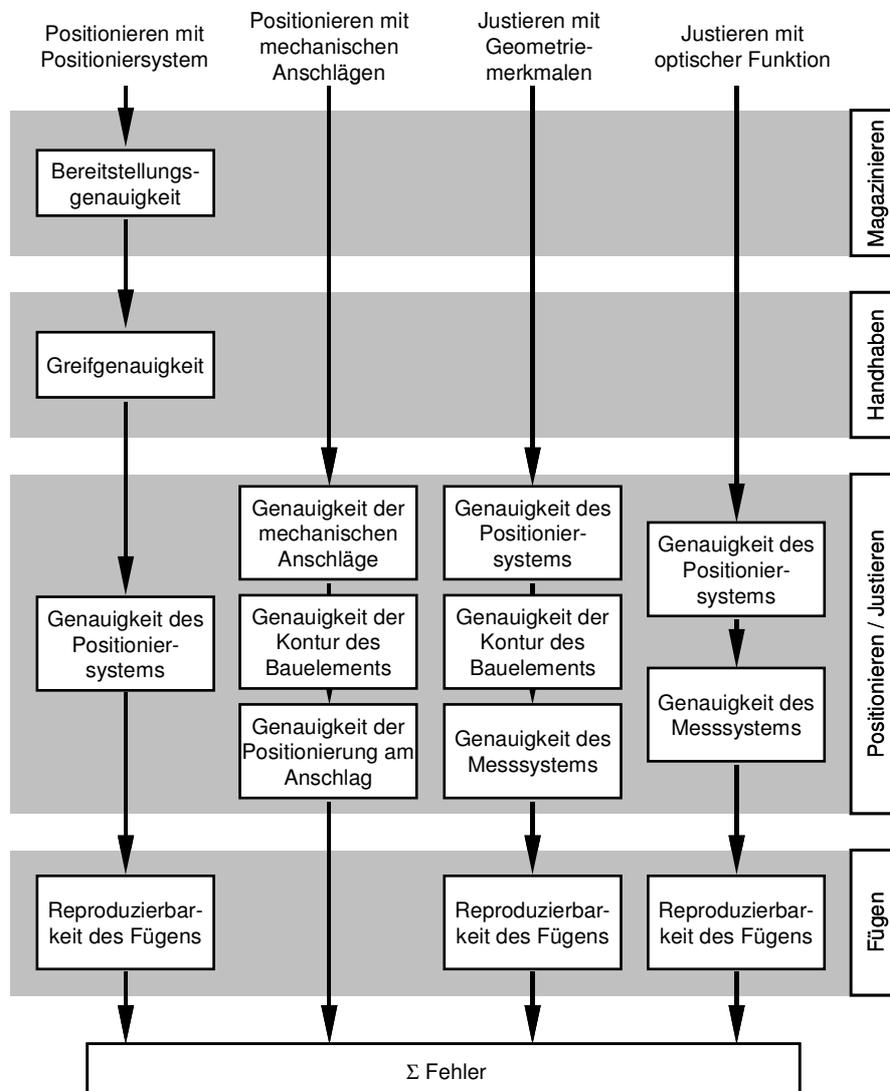
mit Hilfe geeigneter Werkzeuge (Greifer) dient der Entnahme des Bauelements aus dem Magazin und dem Transport zum Montageort. Dort wird durch einen Positionier- bzw. Justierprozess das Bauelement in seine Soll-Position gebracht. Die hierbei erforderlichen Genauigkeiten bewegen sich in einem weiten Bereich von Submikrometern bzw. wenigen Mikrometern oder Mikrorad für Monomode-Faserkopplungen und Interferometerspiegel bis hin zu einigen zehn Mikrometern bzw. Millirad für Bauelemente im kollimierten Strahl. Beim Positionieren als unregelmäßigem Prozess bezüglich der Bauelement-Position werden die Genauigkeiten des Positioniersystems bzw. mechanischer Anschläge zur Positionsbestimmung ausgenutzt. Beim Justieren als geregelter Prozess [KRA-00] steht hingegen ein geeignetes Messsignal der Ist-Position des Bauelements zur gezielten Regelung der Bauelement-Position zur Verfügung. In der Optikmontage werden meist mittels Bildverarbeitung detektierte Marken bzw. geometrische Konturen oder alternativ die optische Funktion des zu montierenden Bauelements selbst als Messsignal herangezogen (Bild 2). Durch das Fügen schließlich wird die Ist-Position des Bauelements am Bestimmungsort durch Form-, Kraft- oder Stoffschluss fixiert.



**Bild 2: Positionieren (mechanischer Anschlag) und Justieren (nach der Funktion) optischer Bauelemente**

Untersuchungen [CHO-09, BIN-97] zufolge entstehen bei der Montage hybrider Baugruppen der MST bis zu 80 % der Gesamtkosten. Besonders hoch ist dabei der Aufwand zum Erreichen und Fixieren der Soll-Position der Bauelemente, der direkt abhängig ist von den laut Systemdesign notwendigen Genauigkeiten und den wäh-

rend der Montage auftretenden Fehlern (Bild 3). Die Summe der Fehler, die im Rahmen der Montage zu einer Fehlpositionierung des Bauelements führen, setzt sich je nach Art der Positionierung bzw. Justierung aus verschiedenen Einzelfehlern zusammen, die sich aus der Genauigkeit der einzelnen Montageprozesse ergeben.



**Bild 3:** Vereinfachtes Modell der Fehlerquellen für die erreichte Position eines Bauelements während der Montage hybrider Systeme

Zur Minimierung des Montageaufwands sind folgende Strategien denkbar [HOE-01]:

- *Toleranzunempfindliches optisches Design:* Die für die optische Funktion der Gesamtbaugruppe notwendigen Montagegenauigkeiten der einzelnen Bauelemente sollten so groß wie möglich gewählt werden, auch durch Anwendung von Prinzipien wie Invarianz und Innozenz.
- *Referenzierung der Bauelemente im Magazin oder im Greifer:* Die ausreichend genaue Bauelement-Bereitstellung und -Handhabung beeinflusst direkt oder indi-

rekt die nachfolgende Positionierung bzw. Justierung. Soll ein Bauelement nur unter Zuhilfenahme der Genauigkeit des Positioniersystems montiert werden, wirken sich die Fehllage des Bauelements im Magazin oder im Greifer direkt auf die erreichte Position aus. Für das Positionieren gegen mechanische Anschläge ist eine ausreichend genaue Vorausrichtung des Bauelements notwendig, während beim Justieren das Verlassen des Justierbereich ausgeschlossen werden muss.

- *Verwendung mechanischer Anschläge zum Positionieren:* Die meist notwendige mechanische Bearbeitung der Systemplattform sowie der Fassungen lässt sich kostengünstig mit der Strukturierung mechanischer Anschläge verbinden. Die Positionierung von Bauelementen gegen solche Anschläge wird bei erreichbaren Genauigkeiten von bis zu  $\pm 10 \mu\text{m}$  [SCH-01] als kostengünstig beschrieben, da nur geringer technologischer Aufwand bei der Bereitstellung der entsprechenden Handhabungswerkzeuge („nachgiebige“ Greifer) erforderlich ist und der Einfluss des Fügeprozesses aufgrund des oft gegen Null gehenden Fügespalts meist vernachlässigt werden kann. Die Genauigkeit der Geometrien der Fassung und des Bauelements gehen allerdings direkt in die erreichbare Positionsgenauigkeit ein.
- *Vermeiden von Justierprozessen:* Justierprozesse werden als aufwendig und kostenintensiv angesehen. Durch die Notwendigkeit, die Ist-Position des Bauelements zur Generierung eines Stellsignals für das Positioniersystem zu ermitteln, entsteht apparativer Aufwand in Form geeigneter Messmittel wie z.B. Kameras und Bildverarbeitungssoftware. Weiter entsteht regelungstechnischer Aufwand, da die Ist- mit der Soll-Position verglichen werden muss, um über geeignet parametrisierte Regler oder manuelle Bedienung die Stellgröße für das Positioniersystem zu erzeugen. Wird ein Bauelement genau genug referenziert, gehandhabt und vom Positioniersystem oder durch mechanische Anschläge in die Soll-Position gebracht, können Justierprozesse entfallen.
- *Reproduzierbare Fügetechnologien:* Da bis auf Ausnahmen wie die der Schlagwerkjustierung [SIE-00] das Fixieren der Ist-Position des Bauelements erst nach der Positionierung bzw. Justierung erfolgt, wirken sich die beim Fügen entstehenden Kräfte auf die Bauelement-Position aus. Solche Kräfte können Klemmkräfte von kraftschlüssigen Verbindungen sein oder bei stoffschlüssigen Verbindungen aus dem Schrumpfen des Klebstoffes während des Aushärtens oder des Lots während des Abkühlens resultieren. Versucht wird, diese Kräfte reproduzierbar zu erzeugen.

gen, zu minimieren oder so einzuleiten, dass das Bauelement gegen mechanische Anschläge gezogen wird, die eine mögliche Bewegung einschränken.

## 1.2 Zielstellung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Eignung ebener, strukturierter, keramischer Substrate als Systemplattform für Aufbau und Montage hybrid-optischer Systeme nachzuweisen. Die zugrunde liegenden Überlegungen zielen auf die Verwendung ein- und mehrlagiger ebener keramischer Substrate, die in Verbindung mit dünn- und dickschichttechnologisch hergestellten Leiterzügen als Schaltungsträger aus der Fertigung hybrider Elektronikbaugruppen bereits bekannt sind. Anspruch der Arbeit ist es, mit Hilfe geeigneter und etablierter Verfahren zur mechanischen Bearbeitung unmittelbare Fassungen für optische Bauelemente in diesen Substraten zu strukturieren, die erreichbaren Strukturgenauigkeiten theoretisch und anhand von Versuchsmustern zu ermitteln und diese Genauigkeiten in ihrem Einfluss auf die Montage optischer Bauelemente entsprechend Bild 3 zu bewerten. Mit der in der Form bisher nicht realisierten Integration von Optik und Elektronik auf einer gemeinsamen Systemplattform sollen miniaturisierte Systeme mit hoher Packungsdichte aufgebaut werden, da der mögliche Verzicht auf mittelbare Fassungselemente die Anordnung von Bauelementen auf engstem Raum erlaubt. Folgende Schwerpunkte für die theoretischen und experimentellen Untersuchungen werden in der Arbeit untersetzt:

- *Charakterisierung verfügbarer Materialsysteme und Substrate:* Beispielhaft werden die in der Elektronikfertigung verbreiteten Keramiken  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und LTCC bezüglich ihrer Eignung für die Zielstellung bewertet, insbesondere hinsichtlich verfügbarer Substratgeometrien, Toleranzen (Ebenheit, Rauheit) und thermomechanischer Eigenschaften. Die Analyse der bei den Substratherstellern vorhandenen Technologien zur Fertigung und Strukturierung keramischer Substrate liefert Rückschlüsse auf die Eignung der einzelnen Verfahren und die zu erwartenden mechanischen Strukturgenauigkeiten. Schlussfolgernd daraus ergeben sich Anhaltspunkte dafür, welche Bauformen hybrider Systeme (Größe, Komplexität) für Systemplattformen auf Basis keramischer Substrate geeignet sind.
- *Untersuchung von Fassungsstrukturen:* Mit Hilfe von mechanischen Bearbeitungsverfahren werden in den Substraten Strukturen erzeugt, die zur Fassung optischer Bauelemente dienen. Die zur Verfügung stehenden Verfahren ergeben

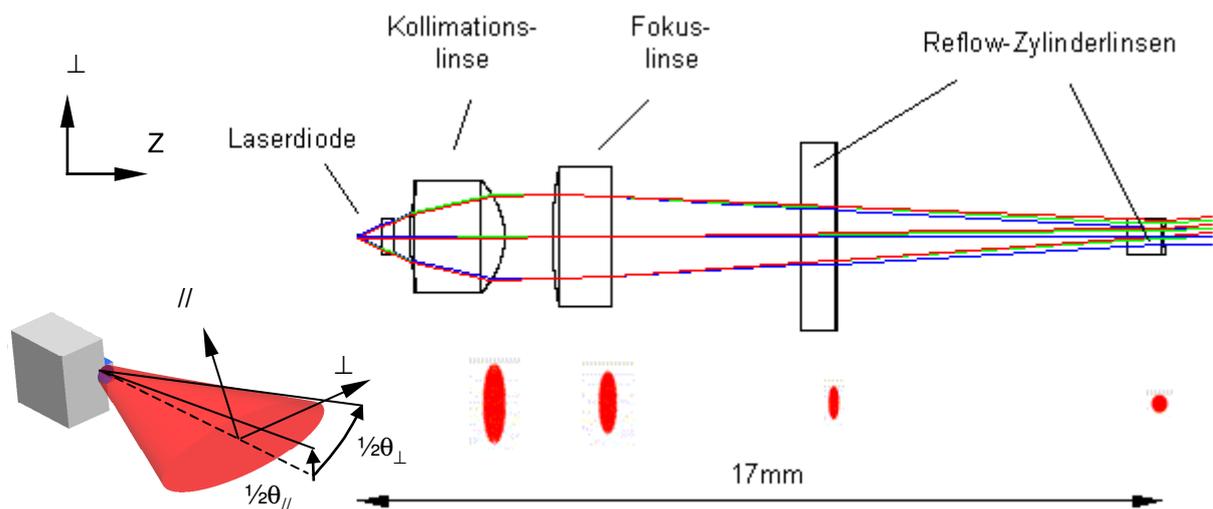
eine relativ große Formenvielfalt der Fassungsstrukturen mit in Grenzen skalierbaren Abmessungen. Für einige wesentliche Fassungsstrukturen, die in ihrer Gesamtheit die Bestimmung der Position rund- und planoptischer Bauteile in allen sechs Raumberechtigungsgraden ermöglichen, erfolgt die theoretische Analyse, inwieweit die Geometrie der Fassungen und die erreichbare Strukturgenauigkeit für das Positionieren optischer Bauelemente ausreichen. Insbesondere die Strukturierungsverfahren und die dabei auftretenden Fehler fließen in diese Analyse mit ein. Daraus leiten sich Regeln und Konstruktionsrichtlinien für die optimale Konstruktion der vorgestellten Fassungsstrukturen ab.

- *Entwurf und Evaluierung von Substraten:* Für ein Applikationsbeispiel, in dem elektronische, optoelektronische und optische Bauelemente enthalten sind, werden Systemplattformen als mechanisch strukturierte keramische Substrate entworfen. Die Herstellung der Substrate übernehmen externe Fertiger unter Einsatz vorhandener und für die gewählten Materialkombinationen geeigneter Strukturierungsverfahren. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, mit Hilfe der sich anschließenden Charakterisierung der gefertigten Substrate einerseits die theoretische Analyse der erreichbaren Genauigkeit von Fassungsstrukturen zu evaluieren und andererseits noch nicht hinreichend bekannte Einflussfaktoren zu erkennen. Eine Gegenüberstellung der erwarteten mit den tatsächlich erreichten Genauigkeiten erlaubt die Abschätzung des Potentials der gegenwärtig verfügbaren Strukturierungstechnologien und des Bedarfs für die Entwicklung neuer Verfahren.
- *Untersuchung und Optimierung der Montage:* Die dem „Pick&Place“ der Elektronikmontage ähnlichen Verfahren zum Montieren optischer Bauelemente auf strukturierten Keramiks substraten werden anhand des Aufbaus von Prototypen des Applikationsbeispiels charakterisiert. Dazu erfolgt die Untersuchung und Evaluierung der Teilprozesse der Montage, die in Verbindung mit den Fassungsstrukturen zur definierten Position des zu montierenden Bauelements in der Baugruppe führen.

Als Ergebnis der Arbeit steht die Charakterisierung des Lösungsansatzes anhand der theoretischen Überlegungen und praktischen Untersuchungen. Vor- und Nachteile werden, unter Beachtung von Randbedingungen wie Genauigkeiten und Funktionalität, gegenübergestellt und potentielle Einsatzgebiete benannt. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf zukünftige Technologieentwicklungen, die das Anwendungsspektrum des Lösungsansatzes erweitern können.

### 1.3 Applikationsbeispiel „Strahlkollimationsoptik“

Der in dieser Arbeit dargestellte neue Lösungsansatz und die dazu erfolgten theoretischen und experimentellen Untersuchungen werden anhand einer optoelektronischen Baugruppe erläutert, die zur Strahlformung für eine Laserdiode dient. Als typisches Beispiel für einen hybriden Aufbau, bestehend aus Katalogkomponenten und Sonderbauteilen, dient diese Baugruppe der Kollimation und Zirkularisierung des divergenten Strahls einer Laserdiode, die bei einer Wellenlänge von 635 nm (rot) mit einer maximalen optischen Leistung von 3 mW emittiert. Verwendung finden solche Baugruppen unter anderem als Strahlquelle in Geräten zur digitalen Belichtung, zur Laser-Faserkopplung [SCH-03a] oder in der Laserscanmikroskopie [ZEI-03].



**Bild 4:** Optischeschema zur Kollimation und Zirkularisierung des Strahls einer Laserdiode

Bild 4 zeigt das Optischeschema der Baugruppe, bezogen auf die stark divergierende Richtung  $\perp$  senkrecht zur Ebene des p-n-Übergang der Laserdiode, sowie ausgewählte Strahlquerschnitte. Die Divergenzwinkel der Laserdiode betragen  $\theta_{\perp} = 30 \pm 9^\circ$  und  $\theta_{\parallel} = 8 \pm 2^\circ$ . Eine asphärische Linse (mittlere Krümmungsradien 2.9 mm und -1.5 mm) kollimiert das divergente Bündel der Diode, welches anschließend mit einer Plankonvexlinse (Krümmungsradius 7.8 mm) fokussiert wird. Zwei nachgeschaltete Plankonkav-Zylinderlinsen, jeweils für  $\perp$  (Krümmungsradius 1.5 mm) und  $\parallel$  (Krümmungsradius 4.9 mm), führen zu einer Kollimation und Zirkularisierung des fokussierten Strahls. Zielparameter am Ausgang der ca. 17 mm langen optischen Baugruppe sind 0.8 mm Strahldurchmesser (gemessen in einem Abstand von 100 mm zur letzten Zylinderlinse),  $< 2$  mrad Restdivergenz und  $< 1:1.05$  Elliptizität. Dazu ist

es, resultierend aus der Optikrechnung, erforderlich, die optischen Funktionsflächen der einzelnen Bauelemente mit den in Tabelle 1 zusammengefassten Toleranzen bezüglich der Soll-Position axial und lateral zur optischen Achse und in Bezug auf die Kollimationslinse anzuordnen.

**Tabelle 1: Zulässige Positionstoleranzen der optischen Funktionsflächen, Bezugskoordi-  
natensystem (BKS) Kollimationslinse**

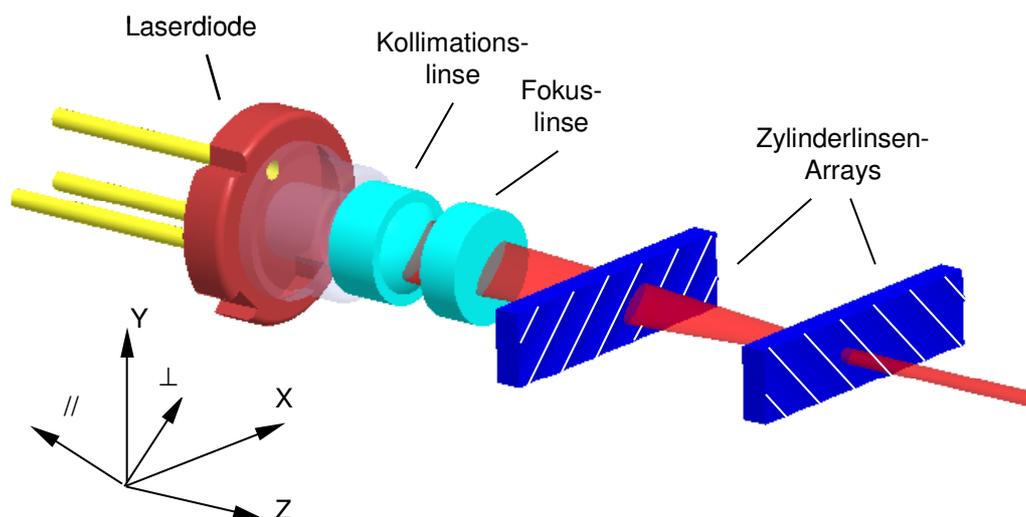
	zulässige Positionstoleranz		
	Axial	lateral	Verkipfung um X, Y (Bild 5)
Laserdiode	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 17 \text{ mrad}$
Kollimationslinse	BKS	BKS	BKS
Fokuslinse	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 17 \text{ mrad}$
Zylinderlinsen	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 17 \text{ mrad}$

**Tabelle 2: Einsatzbedingungen für die Strahlkollimationsoptik in Anlehnung an [DIN58390]**

	minimal	typisch	maximal
Betriebstemperatur	10 °C	20 °C	40 °C
Betriebsfeuchtigkeit, nicht betauend			< 90 %
Lagertemperatur	-40 °C	20 °C	70 °C
Lagerfeuchtigkeit, nicht betauend			< 99 %
Strahlage – Paralleldrift			< $\pm 50 \mu\text{m}$
Strahlage – Winkelabweichung			< $\pm 8 \text{ mrad}$
Schwingungen			< 1000 Hz, < $10 \text{ m/s}^2$
Stoßbelastung			< $200 \text{ m/s}^2$

Bild 5 zeigt, wie das Optikschemata mit konkreten Bauelementen umgesetzt wird. Die Halbleiter-Laserdiode [HIT-03] ist in ein standardisiertes TO-18 Gehäuse montiert, welches gleichzeitig eine Monitordiode zur Messung der emittierten Lichtleistung enthält und als Wärmesenke für die Verlustleistung der Laserdiode von bis zu 100 mW dient. Die Lagetoleranz des Halbleiters bezüglich der Außenabmessungen des zylindrischen Gehäuses sind nicht spezifiziert, können aber bis zu  $\pm 150 \mu\text{m}$  in lateraler und axialer Richtung betragen [CHI-03], weshalb das Bezugskoordinatensystem nicht durch die Laserdiode, sondern die Kollimationslinse bereitgestellt wird.  $\perp$ - und // -Richtung der Laserdiode sind in der X-Y-Ebene um  $45^\circ$  gedreht.

Die Ansteuerung der Laserdiode erfolgt durch eine diskrete Schaltung, in der ein integrierter Schaltkreis die Regelung des Laserdiodenstroms in Abhängigkeit vom Signal der Monitordiode übernimmt und mit einem Potentiometer die Vorgabe der Stellgröße erfolgt. Die gesamte Schaltung benötigt als elektrische Schnittstelle zur Umgebung lediglich eine Versorgungsspannung. Auf eine Regelung der Laserdiodentemperatur wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.



**Bild 5: Strahlkollimationsoptik**

Als gepresste Asphäre aus Corning-Glas CO550 [LIG-04] hat die Kollimationslinse eine Scheiteldicke von 2 mm und ist im Radius von 1.5 mm mit  $\pm 8 \mu\text{m}$  sehr genau toleriert. Die Fokuslinse aus BK7 [SCH-02] hat eine Scheiteldicke von 1.26 mm, der Außendurchmesser von 3 mm ist mit  $+0 \mu\text{m}$  und  $-50 \mu\text{m}$  toleriert. Die Zylinderlinsen werden im Reflow-Verfahren [HOU-03] aus dem hybriden Polymer ORMOCER<sup>®</sup> auf planaren und 0.8 mm dicken BK7-Substraten mehrfach nebeneinander mit unterschiedlichen, sich um den nominellen Radius mit einer festen Schrittweite bewegendem Radien, abgeformt (Bild 5). Durch einen Sägeprozess werden anschließend Linsenarrays aus dem Glassubstrat vereinzelt, die erreichbaren Genauigkeiten bezüglich der Rechtwinkligkeit von optischer Funktionsfläche zu Sägekante betragen  $\pm 1 \text{ mrad}$  [DIS-04]. Pro Bauelement stehen durch die Anordnung im Array Zylinderlinsen mit verschiedenen Krümmungsradien zur Verfügung, mit denen die Divergenztoleranzen der Laserdiode durch die Auswahl einer geeigneten Linsenkombination für stark und schwach divergierende Richtung ausgeglichen werden können. Korrespondierend zur Laserdiode sind die einzelnen Zylinderlinsen  $45^\circ$  um die Z-Achse geneigt, womit ein Durchrastern der verschiedenen Krümmungsradien allein

durch eine horizontale Verschiebung der Zylinderlinsen-Arrays in X-Richtung ermöglicht wird.

**Tabelle 3: Eigenschaften der Bauelemente**

	Abmessungen	Geometrische Toleranzen
Laserdiode	TO18-Norm, Haupt-Ø 5.6 mm	Emittierender Punkt: $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ $\pm 100 \mu\text{m}$ . Elliptizität 1 : 2.2 bis 1 : 7.7
Kollimationslinse	Ø 3.0 mm, Dicke 2.0 mm	Radiustoleranz $\delta_R \pm 8 \mu\text{m}$
Fokuslinse	Ø 3.0 mm, Dicke 1.26 mm	Radiustoleranz $\delta_R +0 \mu\text{m}, - 50 \mu\text{m}$
Zylinderlinsen-Array $\theta_{//}$	Gesamt: 11,6 x 2 x 0,8 mm <sup>3</sup>	Rechtwinkligkeit Sägekante: $\pm 1 \text{ mrad}$
Zylinderlinsen-Array $\theta_{\perp}$	Gesamt: 13,6 x 2 x 0,8 mm <sup>3</sup>	Rechtwinkligkeit Sägekante: $\pm 1 \text{ mrad}$

Um möglichst viele der einzelnen Bauelemente ohne aufwendige Justierung zu montieren, wird das Bezugskordinatensystem in die Kollimationslinse gelegt und die folgende Montagereihenfolge vorgegeben:

1. Die Kollimationslinse stellt aufgrund der exakten geometrischen Abmessungen die Referenz für das Gesamtsystem dar und wird zu Beginn montiert.
2. Anschließend wird die Laserdiode bestromt und bezüglich der Kollimationslinse justiert. Messgröße ist der Querschnitt des kollimierten Strahls, Ziel ist aberrationsfreie Abbildung im Fernfeld bei gaussförmiger Intensitätsverteilung im minimalen Strahlquerschnitt.
3. Die Fokuslinse wird aufgrund der unkritischen Positionstoleranz bezüglich der Kollimationslinse gegen mechanische Anschläge positioniert.
4. Abschließend erfolgt die Justierung der Zylinderlinsen-Arrays. Dazu wird die Laserdiode bestromt und zuerst die geeignete Kombination der Zylinderlinsen für // und  $\perp$  mittels Durchrastern der Zylinderlinsen-Arrays ermittelt und vorpositioniert. Danach werden die ausgewählten Zylinderlinsen bezüglich der Kollimationslinse durch Verschieben der Zylinderlinsen-Arrays in X- und Z-Richtung justiert. Messgröße ist jeweils der Querschnitt des kollimierten Strahls, Ziel ist eine aberrationsfreie Abbildung im Fernfeld und eine gaussförmige Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt bei minimaler Elliptizität.

Mit dieser Reihenfolge können zwei der fünf Bauelemente des optischen Systems einfach gegen mechanische Anschläge von Fassungen positioniert werden unter der Voraussetzung, dass diese ausreichend genau strukturiert sind.

## 1.4 Stand der Technik

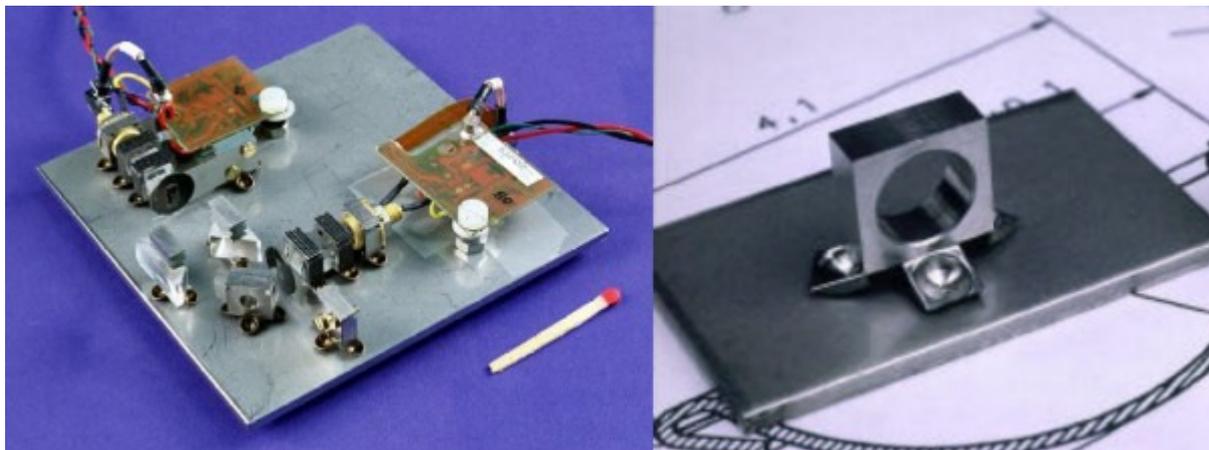
Die klassische Variante des Aufbaus hybrid-optischer Systeme ist die optische Bank, bei der die Bauelemente in mittelbaren Fassungen mechanisch fixiert und gegebenenfalls justierbar, zusammen mit mechanischen und elektrischen Bauelementen auf einer entsprechend angepassten ebenen, meist metallischen Plattform aufgebaut werden (Bild 6). Die optische Achse verläuft dabei in einem festgelegten Abstand oberhalb der Plattform. Als Plattform werden Optik-Tische z.B. aus zwei Stahlplatten mit einer verbindenden und versteifenden Aluminium-Wabenstruktur oder massivem Granitstein verwandt. Verschiedene Hersteller bieten Baukastensysteme mit einem jeweils definierten Abstand der optischen Achse von der Basis an [THO-04]. Die Fassungen selbst sind hochpräzise feinmechanische Komponenten, deren Konstruktion und Fertigung seit Jahrzehnten beherrscht und optimiert wird. Zur Anwendung kommen spanende Bearbeitungsverfahren mit geometrisch bestimmter oder unbestimmter Schneide, die Strukturgenauigkeiten bis  $20\ \mu\text{m}$  (konventionelle Bearbeitung) bzw.  $5\ \mu\text{m}$  (Präzisionsbearbeitung) bei vertretbarem Aufwand erreichen [HES-02]. Während bei den mittelbaren Fassungselementen aus Gründen der Bearbeitbarkeit und einfacher Möglichkeiten zum Schwärzen der Oberfläche (Streulichtminimierung) vorwiegend Aluminium-Knetlegierungen verwendet werden, kommen bei der Systemplattform häufig hochlegierte Stähle mit niedrigem Temperaturexpansionskoeffizienten und ausreichender Wärmeleitfähigkeit wie z.B. X22CrNi17 ( $\alpha = 10\text{e}^{-6}\ \text{K}^{-1}$ ,  $\lambda = 15\ \text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) zum Einsatz.



**Bild 6:** RGB-Lasermodul als miniaturisierte, klassische optische Bank (links), Fassungselemente (rechts, [THO-04])

Die Montage derartig aufgebauter Systeme erfolgt im Labormaßstab und bei kleinen bis mittleren Stückzahlen manuell, indem die optischen Bauelemente nacheinander

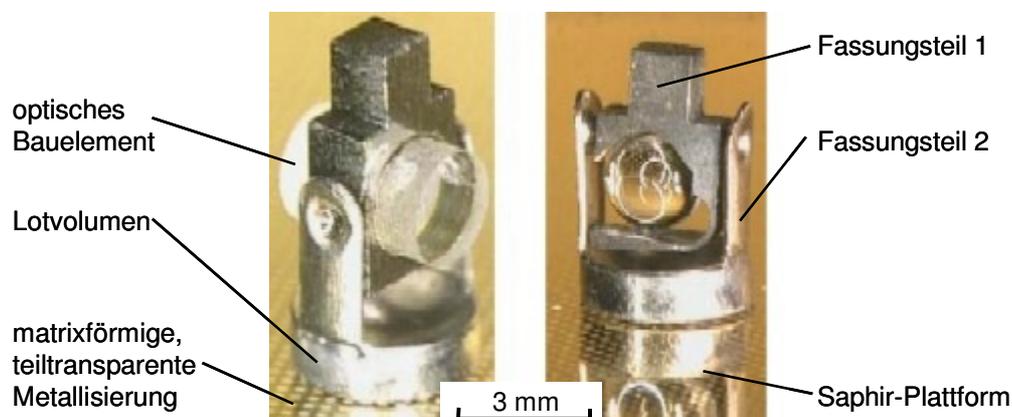
in den Strahlengang gebracht und bezüglich der optischen Funktion justiert werden. Die Relativbewegung erfolgt entweder zwischen Bauelement und Fassung oder, wenn letztere justierbar gestaltet ist, zwischen Fassung und Plattform. Die erreichte Position wird mittels Klemmen oder Kleben fixiert. Einen Sonderfall stellt die Stoßjustierung dar [SIE-00], bei der das Fügen des Bauelements vor der Justierung erfolgt. Die fixierende Klemmkraft wird durch die Einleitung von Impulsen (Schlaghammer-Prinzip) kurzzeitig überwunden und eine Relativbewegung erzeugt. Dadurch soll der Einfluss der beim Fügen auftretenden Kräfte auf die erreichte Bauelementposition minimiert werden, da diese erst nach dem Fügen endgültig eingestellt wird. Dem Vorteil der Verfügbarkeit standardisierter und präziser Fassungselemente als Katalogware und des demzufolge geringen Aufwands für den Aufbau solcher Systeme steht deren eingeschränkte Miniaturisierbarkeit gegenüber, da sich die mechanische Konstruktion der Fassungen nicht beliebig verkleinern lässt. Als weiterer Nachteil sind die zeitaufwendigen, oft iterativen Justierungen der optischen Bauelemente zu nennen, da die zusätzlichen Toleranzen der mittelbaren Fassung ein einfaches Positionieren des gefassten Bauelements in der Regel verhindern. Die auf spanende und kostengünstige Fertigungsverfahren abgestimmten metallischen Materialien der Fassungen und deren Größe resultieren in einer geringen thermischen Stabilität und eingeschränkten Langzeitstabilität solcher Systeme.



**Bild 7:** Niedrigausdehnende Metallplattform (links) und Universalhalter [SCU-00] mit Dreipunktauflage für optische Bauelemente (rechts)

Alternative Plattformmaterialien sollen den letztgenannten Nachteilen begegnen. Soll die Systemplattform spanend bearbeitet werden und gleichzeitig als globale Wärmesenke dienen, kommen Metalle mit niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie INVAR<sup>®</sup> ( $\alpha = 2e^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\lambda = 15 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) zum Einsatz. Ein Beispiel dafür ist das

in Bild 7 gezeigte Konzept, bei dem gleichzeitig versucht wird, die Vielzahl der möglichen Fassungselemente durch eine universelle Fassung zu ersetzen [SCU-00]. Diese wird mittels Laserschweißen an drei halbkugelförmig ausgeführten und an Festkörpergelenken aufgehängten Auflagepunkten auf der Metallplattform fixiert, nachdem das Bauelement in allen sechs Freiheitsgraden justiert wurde. Die Dreibeinstruktur der Universalfassung ist einerseits flexibel, erfordert andererseits aber immer eine Justierung des Bauelements, die in der dargestellten Anwendung (Fabry-Pérot-Interferometer) durch ein spezielles Positioniersystem in sechs Freiheitsgraden mit  $\pm 1 \mu\text{m}$  Genauigkeit erfolgt. Die Reproduzierbarkeit des Fügeprozesses wird mit  $\pm 0.7 \mu\text{m}$  angegeben. Noch höhere Ansprüche an die thermische Stabilität erfüllt die Weiterentwicklung des Universalhalterkonzepts, wie in Bild 8 gezeigt [GRA-03].

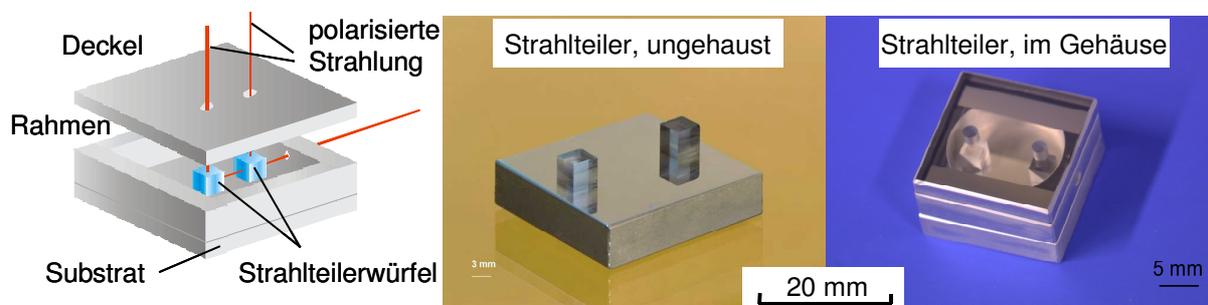


**Bild 8:** Gelötete Universalfassung für optische Bauelemente [GRA-03, SCU-00] auf Saphir

Als Materialien der Systemplattform finden hier die transparente Glaskeramik Zerodur<sup>TM</sup> ( $\alpha = 1e^{-7} \text{K}^{-1}$ ,  $\lambda = 1.6 \text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) oder alternative ausdehnungsminimierte und transparente Keramiken und Gläser wie Saphir, Quarz oder Pyrex<sup>TM</sup> Verwendung. Die Oberseite der Substrate ist matrixförmig metallisiert, so dass mit einem Laserstrahl durch das Substrat hindurch ein am Universalhalter befindlich Lotvolumen aufgeschmolzen und zur Benetzung mit der Substratoberfläche gebracht werden kann. Die Reproduzierbarkeit dieser Verbindung wird mit  $\pm 0.3 \mu\text{m}$  angegeben, wozu die durch das Abkühlen des Lotvolumens entstehende Bewegung des Halters ( $5 \mu\text{m}$ ) vorgehalten werden muss. In Verbindung mit der aus zwei, sich gegenseitig in der Temperaturexpansion kompensierenden Teilen bestehenden Universalfassung können so thermisch hochstabile Baugruppen aufgebaut werden. Die Lotverbindung ist im Vergleich zu anderen stoff- und kraftschlüssigen Fügeverfahren wie Kleben oder Klemmen außerdem langzeitstabiler und beständiger

gegenüber Umwelteinflüssen. Allerdings führen die bisher verwendeten flussmittelhaltigen Lote zu einer Kontamination der optischen Funktionsoberflächen während der Montage. Die relativ grob tolerierten Halter (0.1 mm) müssen immer mit Hilfe der optischen Funktion des zu montierenden Bauelements justiert werden, was entsprechenden Aufwand nach sich zieht. Weiterhin sind die Metallisierung und insbesondere die für die Teiltransparenz notwendige matrixförmige Maskierung der Schicht kostenintensiv.

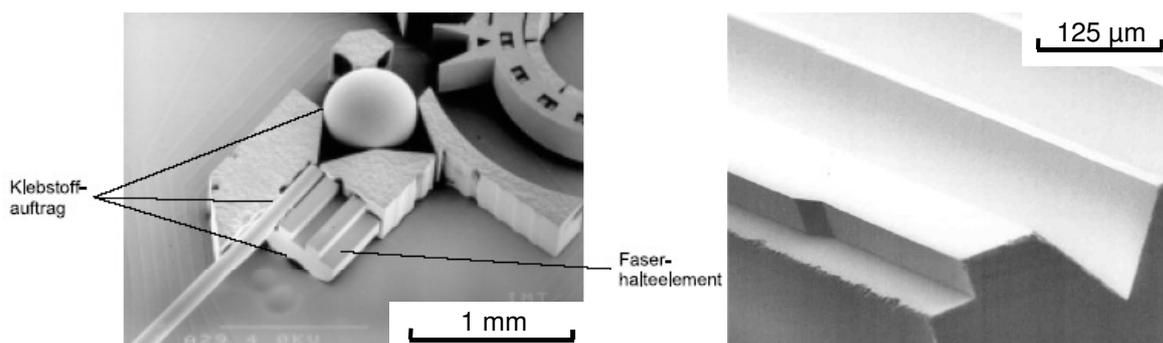
Die oft in optischer Qualität und Präzision vorliegende Plattformoberfläche von transparenten Gläsern und Glaskeramiken kann aber auch als mechanischer Anschlag zur Positionierung optischer Bauelemente genutzt werden. Der in [EBE-03] vorgestellte Ansatz nutzt ein sehr präzises, durch Sputtern [MER-01] aufgebracht Metallisierungssystem (Schichtdicke ca.  $3.2 \mu\text{m} \pm 10\%$ ), um die Genauigkeit der Plattformoberfläche auf das plan aufliegende Bauelement zu übertragen (Bild 9). Die Verbindungsbildung erfolgt auch hier über das Umschmelzen des Lotes mittels Laserstrahl. Vorteilhaft an dieser Lösung ist neben den bereits genannten Vorzügen des stoffschlüssigen Fügens mittels Lötens die Möglichkeit, flussmittelfrei prozessierbare Lote wie die Legierung 80Au20Sn im Rahmen des Sputterprozesses hochpräzise und an die Genauigkeit der Plattformoberfläche angepasst aufzubringen.



**Bild 9:** Strahlteilerbaugruppe auf Zerodur-Plattform, laserstrahlgelötet

Die Metallisierung wird geschlossen aufgebracht, der Wärmefluss zum Umschmelzen des Lotes kommt durch den mechanischen Kontakt der Fügepartner zustande. Mittelbare Fassungselemente sind überflüssig, was hohe Anforderungen an die Außengeometrie der Bauelemente stellt. Nachteilig ist, dass nicht die optisch wirksamen Flächen zur Referenzierung herangezogen werden, die Genauigkeit der Positionierung ist somit eingeschränkt. Weiterhin eignen sich diese Plattformmaterialien aufgrund ihrer Sprödigkeit und der geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten nur bedingt für die Integration mechanischer und elektronischer Bauelemente.

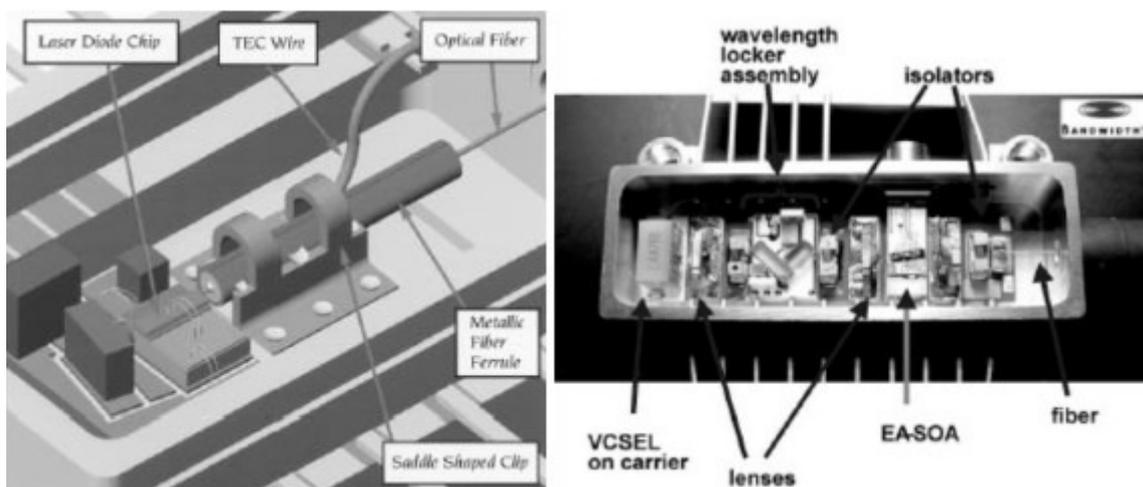
Sollen hochpräzise Fassungsstrukturen in ebene Plattformen integriert werden und somit die Palette der montierbaren Bauelemente erweitert bzw. auch genaue mechanische Anschläge zur Positionierung bereitgestellt werden, kommen derzeit durch das LIGA-Verfahren [MOH-96] strukturierte Kompositplattformen aus keramischen Grundkörpern (z.B. Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\lambda = 33 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) und Kunststoff- (PMMA) bzw. Metallschichten (z.B. Nickel) und mit Verfahren der Volumenmikromechanik (Lithografie, Ätzen [GER-97]) strukturierte Substrate aus Silizium ( $\alpha = 3.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\lambda = 150 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) zum Einsatz [GAT-96, GON-98]. Beim LIGA-Verfahren (Bild 10 links) wird ein Resist wie z. B. PMMA mit Synchrotronstrahlung lithographisch strukturiert und, wenn gewünscht, anschließend galvanisch abgeformt. Die so entstehende Negativform der eigentlichen Kontur kann als Werkzeug zum massenhaften Replizieren, zum Beispiel mittels Mikrospritzguß oder Heißprägen genutzt werden. Das LIGA-Verfahren zeichnet sich durch ein außergewöhnlich hohes erreichbares Aspektverhältnis aus. Bei Strukturauflösungen im Mikrometerbereich wurden Strukturtiefen bis ca. 1 mm nachgewiesen [RUZ-00]. Im Gegensatz dazu erreicht die Volumenmikromechanik in Silizium (Bild 10 rechts) bei Strukturauflösungen im Submikrometerbereich nur Strukturtiefen bis zu ca. 100  $\mu\text{m}$  [AMB-03] mit vertretbarem Aufwand. Beide Verfahren werden aufgrund der hohen Technologiegrundkosten nur bei wenigen optischen Anwendungen, die durch hohe Stückzahlen gekennzeichnet sind, zum Einsatz gebracht.



**Bild 10:** Links: Faser und Kugellinse, gefügt in einer LIGA-strukturierten PMMA-Fassung auf Keramik [RUZ-00], rechts: V-Nut als Fassung für eine Glasfaser, in Silizium geätzt [AMB-03]

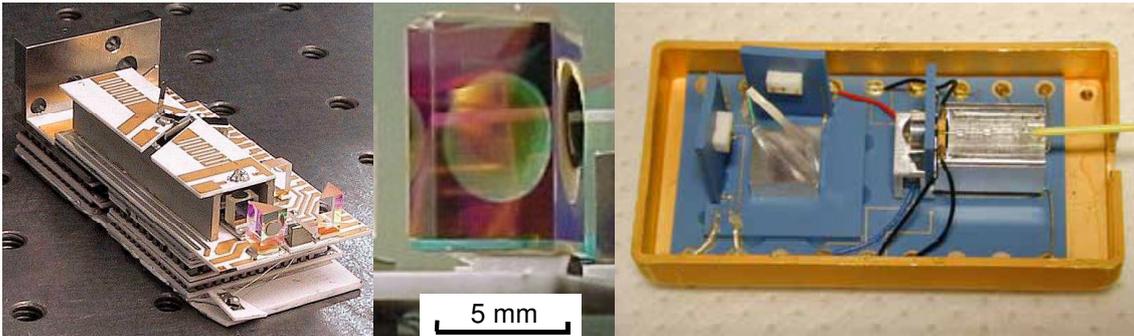
Den bei hybrid-optischen Systemen oft anzutreffenden Forderungen nach kostengünstigem Aufbau bei geringen bis mittleren Stückzahlen werden Ansätze gerecht, die auf Keramiken wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\alpha = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\lambda = 33 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) für die Schaltungsträgerfertigung der Elektronik als Plattformmaterial beruhen. Anwendungen sind der-

zeit vorwiegend Module für die Telekommunikation [MUE-02], in denen eine in einer justierbaren Fassung montierte Glasfaser zu einem Halbleiterlaser ausgerichtet wird, der direkt auf der Plattform gefügt ist (Bild 11, links). Die Justierung erfolgt durch eine thermomechanische Verformung der Fassung mittels Laserstrahl. Sind Höhenunterschiede auszugleichen, werden Keramikplatten oder andere, z.B. durch das LIGA-Verfahren hergestellte mittelbare Fassungelemente [SCH-04b] aufgelötet oder aufgeklebt, um die einzelnen Bauelemente in Höhe der optischen Achse anzuordnen. Den Anforderungen der Telekommunikationsindustrie entsprechend sind die Keramikplattformen derartige Module in sogenannte „Butterfly“-Metallgehäusen vormontiert und werden mit hochgenauen Automaten bestückt [PAL-04], bevor abschließend die hermetisch dichte Versiegelung des Metallgehäuses erfolgt.



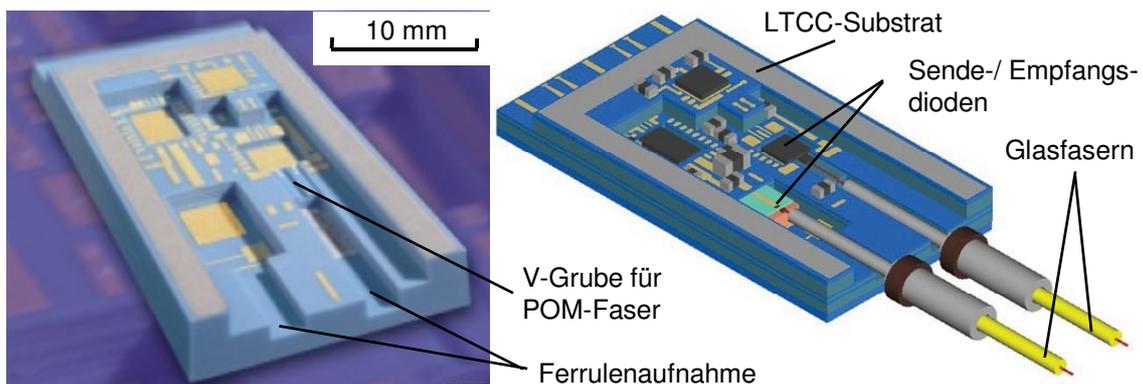
**Bild 11:** Faser-Chip-Kopplung (links, nach [MUE-02]), komplexe optoelektronische Baugruppe [SCH-04a] auf Keramiksubstraten

Ansätze, Keramiksubstrate als Plattform für größere Baugruppen zu verwenden, werden in der Forschung [HEI-04] und industriell von einem Hersteller von Lasermodulen verfolgt (Bild 12). Als Systembasis finden dickschichtstrukturierte  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - oder LTCC-Substrate Verwendung, auf denen in Stapelbauweise aufgesetzte Keramikplatten als mittelbare Fassungen [COH-99] in zur Höhenabstimmung unterschiedlicher Anzahl die einzelnen Optikkomponenten montiert sind. Die Bauelemente werden im Strahlengang in sechs Freiheitsgraden justiert und anschließend durch Kleben gefügt. Teilweise erfolgt das Fügen durch Lotschichten und integrierte Heißeleiter [DAT-04] zwischen den Keramikplatten, dann wird nach der Vorpositionierung der optischen Bauelemente durch ein zeitweiliges Umschmelzen des Lotes sowohl die Verbindung gebildet als auch die Justierung ermöglicht.



**Bild 12:** Links: Diodenlasermodul (Coherent Inc.) auf einem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrat, Mitte: montiertes optisches Bauelement im Detail, Rechts: Diodenlasermodul auf LTCC [HEI-04]

Lösungen, die die Strukturierungsmöglichkeiten keramischer Substrate nutzen, um Plattformen mit unmittelbaren Fassungen für hybrid-optische Systeme bereitzustellen, sind bisher kaum bekannt [MAZ-03]. Zu erwähnen ist das dem dieser Arbeit zugrundeliegenden Ansatz ähnliche Konzept „ATOM“ (Advanced Technology for Optoelectronic Modules) eines Herstellers [CMA-02]. Dieses basiert auf strukturierten LTCC-Substrate (Bild 13), in denen Kavitäten zur Vorpositionierung von Faserferrulen und zur Aufnahme von Haltern für Halbleiter-Laserdioden dienen oder aufwendig mit strukturierten Siliziumstempeln geprägte V-Gruben [BOU-03] Multimode-Glasfasern unmittelbar fassen (erforderliche Genauigkeit  $> \pm 25 \mu\text{m}$ ). Erreichte Genauigkeiten und erforderliche Montageprozesse werden in der Literatur bisher nicht quantitativ beschrieben. Der Einsatz des Prägeverfahrens zur Strukturierung lässt auf Anwendungen in der Telekommunikation mit hohen Stückzahlen schließen.

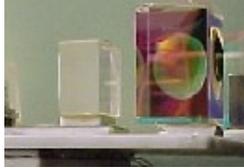
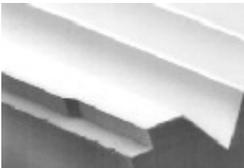


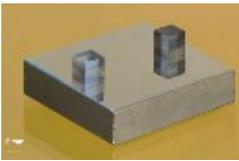
**Bild 13:** LTCC-Substrat mit Kavitäten für optoelektronische Module [CMA-02]

Vor- und Nachteile der vorgestellten prinzipiellen Ansätze zum Aufbau hybrid-optischer Systeme werden in Tabelle 4 abschließend einander gegenübergestellt.

**Tabelle 4: Vergleich von Aufbaukonzepten für hybrid-optische Systeme**

		Vorteile	Nachteile
Ebene Plattformen mit mittelbaren Fassungen			
Klassische Aufbautechnik, typisches Material der Plattform: hochlegierter Stahl			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemplattform aus Metall, spanend und dreidimensional strukturiert, Genauigkeit 20 µm (konventionell) bis 5 µm</li> <li>• fast ausschließlich mittelbare Fassungen, oft justierbar</li> <li>• fast ausschließlich Justierung der optischen Bauelemente in Funktion</li> <li>• mechanische Anschläge werden zur Vorpositionierung genutzt</li> <li>• Klemmen oder Kleben als übliche Fügeverfahren für Bauelemente und Fassungen</li> <li>• Mechanik/ Aktorikintegration in Form separater feinwerktechnischer Baugruppen</li> <li>• Elektronik als externe Baugruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauelemente einzeln justierbar</li> <li>• klassische, für Klein- und Mittelserien kostengünstige Bearbeitungsverfahren</li> <li>• einfache Nachjustierung und Demontage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kritische Langzeit- und Temperaturstabilität</li> <li>• aufwendige manuelle Justierung der einzelnen Bauelemente</li> <li>• mittelbare Fassungen nur begrenzt miniaturisierbar</li> <li>• durch Fertigungstechnik begrenzte Strukturgenauigkeit</li> </ul>
Universalfassung auf Glaskeramik- bzw. Glas-Substraten, typische Materialien der Plattform: Zerodur™, Saphir, Pyrex™			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemplattform als Glaskeramik- oder Glas-Substrat, mit optischen Verfahren und Schichtaufbringung zweidimensional strukturiert, Ebenheit besser 0.3 µm möglich</li> <li>• Universalhalter als mittelbare Fassung, Bauelemente gefügt durch Klemmen oder Kleben</li> <li>• Justierung der optischen Bauelemente in Funktion</li> <li>• im justierten Zustand Fügen des Universalhalters auf Systemplattform mittels Lötten, Reproduzierbarkeit &lt; 1 µm</li> <li>• Mechanik/ Aktorik als separate feinwerktechnische Baugruppen</li> <li>• Elektronik als externe Baugruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Ebenheit der Substrate, diese eignen sich demzufolge als mechanische Referenz</li> <li>• geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient</li> <li>• optische Transparenz des Substrats</li> <li>• automatisierte Montage möglich durch einheitliche Prozesse und Bauelemente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eingeschränkte Strukturierbarkeit</li> <li>• Justierung ist immer erforderlich</li> <li>• kostenintensive Substratbearbeitung</li> <li>• manuelle Montage nicht möglich</li> <li>• aufwendige Nachjustierung und Demontage</li> </ul>

		Vorteile	Nachteile
Mittelbare Fassungen auf Keramiksubstraten, typische Materialien der Plattform: $Al_2O_3$ , AlN, LTCC			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemplattform als Keramiksubstrat, meist zweidimensional strukturiert durch Schichtaufbringung, Ebenheit besser 100 <math>\mu m</math></li> <li>• mittelbare Fassungen in verschiedensten Ausführungen (metallische Halter, gestapelte Keramikplatten)</li> <li>• Bauelemente werden nach ihrer Funktion justiert</li> <li>• Fügen der Bauelemente mittels Lötten oder Kleben</li> <li>• Mechanik/ Aktorikintegration in Form separater feinwerktechnischer Baugruppen</li> <li>• Elektronik als hybride Schaltung integriert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keramik als steife und an Glas / Silizium temperaturoausdehnungsangepasste Systembasis</li> <li>• hybride Integration Optik und Elektronik</li> <li>• Vormontage der Elektronik vereinfacht Justierung optischer Bauelemente</li> <li>• Justierung in bis zu sechs Freiheitsgraden möglich</li> <li>• durch Fügen mittels Lötten gute Langzeitstabilität</li> <li>• etablierte Technologien der Elektronikfertigung nutzbar</li> <li>• kostengünstig für kleine und mittlere Stückzahlen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keramiksubstrate nur mit beschränkter Grundgenauigkeit verfügbar</li> <li>• eingeschränkte Möglichkeiten beim Design der Systemplattform</li> <li>• aufwendige Justierung</li> <li>• bezüglich der optischen Achse asymmetrischer Aufbau</li> </ul>
3D-strukturierte ebene Plattformen mit unmittelbaren Fassungen			
Mikrooptische Bank in Silizium-Volumenmikromechanik oder LIGA-Technik, typische Materialien der Plattform: Silizium (Volumenmikromechanik), $Al_2O_3$ (LIGA)			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemplattform als Siliziumsubstrat oder Keramiksubstrat mit PMMA- oder Metallgalvanikstrukturen, lithografische zweieinhalbdimensionale Strukturierung, Genauigkeit &lt; 1 <math>\mu m</math>, bei der LIGA-Technik auch Replikation mittels Prägen oder Spritzguss</li> <li>• Fassungen unmittelbar in die Plattform integriert</li> <li>• Positionierung der Bauelemente immer gegen Anschläge</li> <li>• Fügen der Bauelemente durch Kleben/ Klemmen</li> <li>• Mechanik-/ Aktorik nur in Form vom MEMS</li> <li>• Elektronik als integrierter (Siliziumplattform) oder hybrider Schaltkreis direkt integriert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Silizium oder Keramik als steife und an die Temperaturoausdehnung von Glas angepasste Systembasis</li> <li>• sehr gute Grundgenauigkeit der Substrate</li> <li>• Positionierung in unmittelbaren Fassungen</li> <li>• thermische Stabilität</li> <li>• sehr gute Wärmeleitfähigkeit von Silizium, modifizierbare Wärmeleitfähigkeit bei Keramik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Substrate relativ kostenintensiv</li> <li>• auf zweieinhalbdimensionale Geometrien beschränkte Strukturierung</li> <li>• klassische feinwerktechnische Aktorik nicht integrierbar</li> <li>• technologischer Aufwand bedingt für kostengünstige Herstellung große Stückzahlen</li> </ul>

		Vorteile	Nachteile
Unmittelbare Montage auf Glaskeramik- bzw. Glas-Substrate, typische Materialien der Plattform: Zerodur™, Borosilicatglas			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemplattform als Glaskeramik- oder Glas-Substrat, mit optischen Verfahren und Lot-schichtaufbringung zwei-dimensional strukturiert, Ebenheit besser 0.3 µm</li> <li>• ebene Substratoberfläche als Referenz und unmittelbare Fassung</li> <li>• Positionierung der Bauelemente gegen Substratoberfläche, Justierung in den verbleibenden Freiheitsgraden</li> <li>• Fügen der Bauelemente mittels Lötten oder Kleben</li> <li>• Mechanik/ Aktorik als separate feinwerktechnische Baugruppen</li> <li>• Elektronik als externe Einheit oder hybrid integrierter Schaltkreis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gute Grundgenauigkeit der Substrate</li> <li>• Positionierung in drei Freiheitsgraden bezüglich Substratoberfläche</li> <li>• thermische Stabilität</li> <li>• Langzeitstabilität durch Fügen mittels Lötten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kostenintensive Substrate</li> <li>• eingeschränkte Strukturierbarkeit</li> <li>• aufwendiger Beschichtungsprozess</li> <li>• Positionierung bezüglich optisch nicht aktiver Flächen führt zu eingeschränkter Genauigkeit</li> <li>• mechanische Spannungen in Fügstellen durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten</li> <li>• bezüglich der optischen Achse asymmetrischer Aufbau</li> <li>• geringe Wärmeleitfähigkeit der Plattform</li> </ul>

Zusammenfassend wird deutlich, dass die klassischen Prinzipien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme möglichst universelle Justiermöglichkeiten für die einzelnen optischen Bauelemente bereitstellen. Die dafür notwendigen vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten für Systemplattform und Fassungen werden durch die spanende Metallbearbeitung ermöglicht. Bei höheren Anforderungen bezüglich der thermomechanischen Stabilität kommen ausdehnungsangepasste und –minimierte Plattformmaterialien zum Einsatz, die in Verbindung mit modernen Beschichtungstechnologien auch neue Verfahren zum Fügen der zu montierenden Bauelemente (z.B. Lötten) ermöglichen. Bei sehr hohen Anforderungen bezüglich der Genauigkeit und bei sehr kleinen Baugruppen kommen Verfahren der Silizium-Mikromechanik oder die LIGA-Technologie zur Anwendung. Dem Aspekt der Integration nichtoptischer Funktionalität besonders nahe kommen keramische Plattformen, deren Einsatz sich allerdings bisher fast ausschließlich auf Baugruppen für die Telekommunikation beschränkt. Die Möglichkeiten zur mechanischen Strukturierung von Keramiksubstraten der Elektronik wurden bisher kaum genutzt. Die Ursache hierfür ist in den bisher noch ungenügend evaluierten (und für hybride Baugruppen der Elektronik auch kaum relevanten) Genauigkeit dieser Strukturierungsmöglichkeiten zu suchen.

## 2. Ebene Keramiksubstrate als Plattform für hybrid-optische Systeme

Ebene Substrate, die mit Hilfe keramischer Herstellungstechnologien [HAN-94] vorwiegend aus den Materialsystemen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ , LTCC/ HTCC (Low/ High Temperature Cofired Ceramic) und  $\text{BeO}$  hergestellt werden, sind seit Jahren in Verbindung mit Dünn- und Dickschichttechnologien beim Aufbau hybrider Elektronikbaugruppen im Einsatz. Substrate aus den genannten Materialien sind aus den folgenden Gründen auch als Systemplattform für optische Baugruppen interessant:

- Niedrige thermische Ausdehnungskoeffizienten führen in Verbindung mit hohen Biegesteifigkeiten zu sehr form- und langzeitstabilen Substratgeometrien auch unter thermischer und mechanischer Belastung (siehe Tabelle 6).
- Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist dem von Silizium weitestgehend angepasst (siehe Kapitel 2.1.1) und erlaubt in der Hybridfertigung die Direktmontage von Nacktchips der Elektronik oder der Silizium-Mikromechanik.
- Eine in relativ weiten Bereichen wählbare thermische Leitfähigkeit erlaubt die Anwendung bei verlustleistungsbehafteten Applikationen. Die Temperaturbeständigkeit von Keramik liegt um ca. eine Größenordnung über der von Kunststoff.
- Etablierte Dünn- und Dickschichttechnologien in Verbindung mit hoch entwickelten Bestückungstechniken für elektronische Bauelemente erlauben die Bereitstellung von Systemplattformen mit vorkonfektionierter Elektronik. Während der Montage können optoelektronische Bauelemente kontaktiert und in Funktion geprüft bzw. zur Justierung elektrisch angesteuert werden.
- Die Flexibilität der Bearbeitungstechnologien (Schichtaufbringung und mechanische Strukturierung) einerseits und die Prozessierung der Keramiksubstrate im Nutzen (parallele Bearbeitung mehrerer Substrate im Verbund und anschließende Vereinzelung) andererseits führen zu einer Eignung besonders für kleine bis mittlere, aber auch hohe Stückzahlen.

Der Vorteil von Keramiken liegt also in der Vielzahl verfügbarer und etablierter Modifikationsmöglichkeiten der Substrate. Die dadurch ermöglichte Integration von elektronischer, optischer, mechanischer und thermischer Funktionalität in Verbindung mit den oben genannten Eigenschaften unterscheidet keramische Substrate deutlich von anderen zur Verfügung stehenden Materialien wie z.B. Kunststoffen oder Metallen.

## 2.1 Unmittelbare Fassungsstrukturen in ebenen Substraten

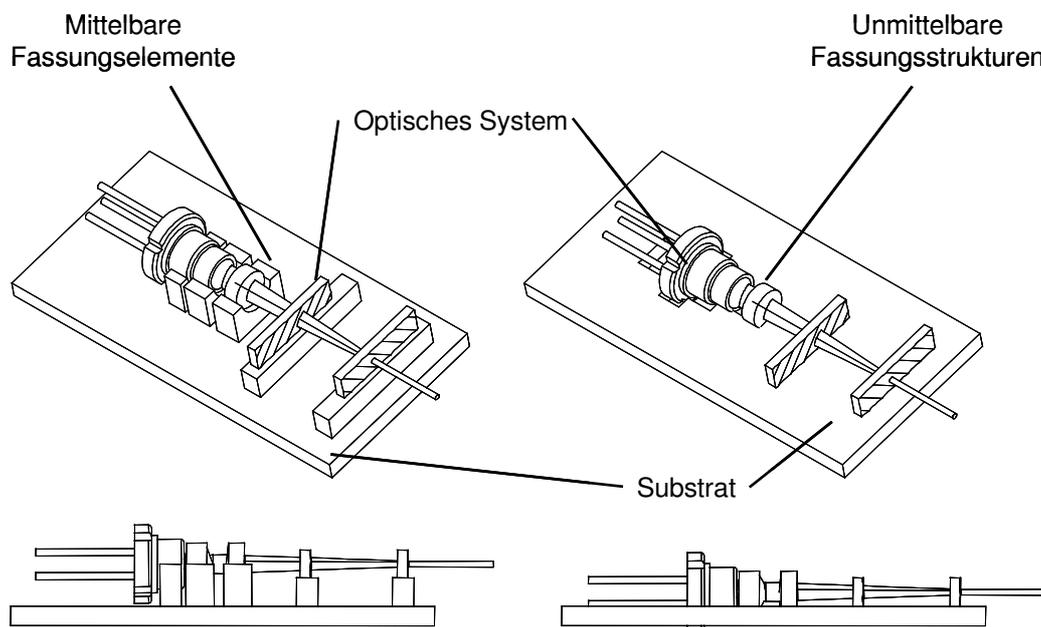
Bei der Integration von optischen Bauelementen in ein Gesamtsystem kommen an der Schnittstelle zwischen Bauelement und Umgebung mechanische Strukturen als Fassungen zum Einsatz. Aufgaben und Eigenschaften von Fassungen können wie folgt zusammengefasst werden [KRA-04, NAU-92, YOD-02]:

- Fassungen fixieren optische Bauelemente stabil an der gewünschten Position in der Gesamtbaugruppe.
- Fassungen tragen an der mechanischen Schnittstelle zwischen Bauelement und Umgebung den besonderen Eigenschaften von Optikmaterialien (Sprödigkeit, Empfindlichkeit bezüglich Verkratzen und Verschmutzen, niedrige thermische Ausdehnungskoeffizienten) Rechnung.
- Die Bestimmung der Position des Bauelements in der Fassung kann durch Positionier- oder Justiervorgänge erfolgen (Bild 2). Beim Positionieren wird das Bauelement entweder durch die Genauigkeit mechanischer Anschläge oder von dem Positioniersystem ohne mechanischen Kontakt zwischen Bauelement und Fassung (freies Positionieren) in der geforderten Lage gehalten. Beim Justieren wird die Lage der optischen Funktionsflächen mit geeigneten Messverfahren bestimmt und die Position des Bauelements entsprechend korrigiert. Dabei kommt es in der Regel nicht zum direkten mechanischen Kontakt zwischen Bauelement und Fassung. Die Fixierung der Bauelemente erfolgt durch Kraft-, Stoff- oder Formschluss.
- Werden Fassungen als separate, mittelbare Bauelemente ausgeführt, können diese selbst, nachdem das Bauelement in der Fassung fixiert ist, im Gesamtsystem positioniert bzw. justiert und fixiert werden. Die nun wesentlich unkritischere Schnittstelle zwischen Fassung und Gesamtsystem ermöglicht die Anwendung zusätzlicher Positionier- und Justierverfahren wie das Zentrieren durch Justierdrehen der Fassung (Herstellung der mechanischen Bezugsflächen an der Fassung nach Montage und Ausmessen des optischen Bauelements) oder das zielgerichtete Verformen bzw. Verschieben der Fassungsstruktur durch die ortsaufgelöste Einleitung mechanischer oder thermischer Energie [SIE-00, OLO-02].  
Nachteilig ist, dass die Fassung als zusätzliches Bauelement gefertigt und mon-

tiert werden muss und die Miniaturisierung der Gesamtbaugruppe begrenzt.

Wie in Kapitel 1.3 gezeigt, beschränken sich Aufbauten von optoelektronischen Systemen auf keramischen Substraten bisher zumeist auf die Nutzung separater, mittelbarer Fassungselemente, mit denen bereits vollständig prozessierte Substrate durch dreidimensionale Aufbauten auf dem Substrat an die Anforderungen der Optik angepasst werden. Dabei verläuft die optische Achse des Systems in einem bestimmten Abstand oberhalb des Substrats, die Bauelemente werden durch verschieden große Fassungen und Zwischenelemente auf das Niveau der optischen Achse angehoben.

Der im Rahmen dieser Arbeit behandelte Ansatz sieht hingegen vor, die Fassungen unmittelbar in das keramische Substrat zu integrieren. Die optische Achse verläuft auch dann oberhalb des keramischen Substrats, aber in einem wesentlich geringeren Abstand. Die Fassungen selbst sind Bestandteil des Substrats, werden während des Herstellungsprozesses des Substrats erzeugt und müssen demzufolge nicht separat montiert werden (Bild 14). Die sich aus diesem Ansatz ergebenden prinzipiellen Vor- und Nachteile beider Lösungsvarianten sind in Tabelle 5 aufgeführt.



**Bild 14: Mittelbare und unmittelbare Fassungen auf bzw. in ebenen Substraten**

**Tabelle 5: Vergleich von mittelbar und unmittelbar integrierter Fassungen**

	Mittelbar integrierte Fassungen	Unmittelbar integrierte Fassungen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• justierbare Ausführung möglich</li> <li>• Geometrien unabhängig von Substratherstellung und -strukturierung</li> <li>• Genauigkeiten unabhängig von Substratherstellung und -strukturierung</li> <li>• angepasster, stufenweiser Materialübergang zwischen Bauelement und Substrat möglich (thermische Kompensation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erfolgt im Rahmen der Substratherstellung, keine separate Herstellung von Fassungen notwendig</li> <li>• miniaturisierbar, Größe nur abhängig von Auflösung bei der Substratstrukturierung</li> <li>• unmittelbare Montage des Bauelements auf dem Substrat</li> <li>• geringer Abstand optische Achse – Substrat</li> <li>• direkter Materialübergang Bauelement – Substrat (Wärmeableitung)</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zusätzlicher Herstellungsprozess für die Fassungselemente</li> <li>• eingeschränkt miniaturisierbar</li> <li>• zusätzlicher Montageprozess</li> <li>• großer Abstand optische Achse – Plattform</li> <li>• unsymmetrische Schnittstelle Fassung - Plattform</li> <li>• zusätzlicher thermischer Widerstand im Wärmeübergang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in der Regel nicht justierbar</li> <li>• mögliche Geometrien abhängig vom Herstellungsprozess des Substrats</li> <li>• Genauigkeiten abhängig vom Herstellungsprozess des Substrats</li> <li>• unsymmetrisches Fassungsgeometrie</li> </ul>

## 2.2 Strukturierung ebener Keramikssubstrate

Die dem Lösungsansatz zugrundeliegenden unmittelbar integrierten Fassungen sind in Formenvielfalt und Strukturgenauigkeit abhängig von den für die Substrate verwendeten Materialien und Strukturierungsverfahren. Im folgenden werden  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und LTCC als Materialbasis und die dafür verfügbaren Strukturierungsverfahren vorgestellt. Der Schwerpunkt bei den Strukturierungsverfahren liegt dabei auf industriell verfügbaren und etablierten Technologien, die zur Erzeugung der in Kapitel 2.3 aufgeführten Fassungsgeometrien verwendet werden können und mit denen in Kapitel 2.4 ein Substrat als Plattform für das Applikationsbeispiel der Strahlkollimationsoptik realisiert wird.

### 2.2.1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ und LTCC als Materialbasis

Aluminiumoxidkeramik und LTCC sind zwei der gebräuchlichsten Materialsysteme für Schaltungsträger der Hybridtechnik.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrate als Basis für einlagige Substrate mit Vorder- und Rückseitenstrukturierung werden gegenwärtig vor allem aus 96%iger  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik durch Trockenpressen hergestellt. Der Restanteil ist Glas ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ) und dient der verbesserten Haftfestigkeit der ebenfalls mit Glasanteilen

versehenen metallischen Dickschichten [HAN-94]. Standardabmessungen liegen im Bereich bis zu  $115 \times 115 \text{ mm}^2$  bei einer Dicke von 0.635 mm bis 10 mm [CER-04], wobei Substrathersteller für die Elektronikfertigung standardmäßig nur Dicken bis 2 mm verarbeiten. Die Oberflächenrauigkeit  $R_a$  von trockengepressten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substraten beträgt  $\leq 0.6 \text{ }\mu\text{m}$  bei einer normierten Ebenheit  $c \leq 40 \text{ }\mu\text{m/cm}$ . Für höhere Anforderungen kommt 99.6%ige  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik zum Einsatz, bei der durch eine Nachbehandlung mittels Schleifen, Läppen oder Polieren eine Rauigkeit von  $<0.1 \text{ }\mu\text{m}$  erreicht wird. Alternativ werden solche Substrate auch glasiert, um eine hohe Oberflächengüte zu erreichen.

LTCC-Substrate als Basis für die keramische Mehrlagentechnik bestehen aus einzelnen keramischen Grünfolien (z.B. dem Green Tape<sup>®</sup>-System [DUP-04]), die im Grünzustand strukturiert, dann aufeinander laminiert und anschließend gesintert werden. Die Grünfolien bestehen aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver mit einem Glasanteil bis zu 50 % und organischem Binder. Der hohe Glasanteil sorgt bei der im Gegensatz zu HTCC niedrigen Sinter Temperatur von ungefähr  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  für kurze Sinterzeiten und einen Dichtsinterungsgrad von  $\geq 96 \%$ . Partiiell kann die Grünfolie mit einem Metallanteil versehen sein, indem kreisförmige Durchbrüche („Via“) mit Dickschichtpasten aufgefüllt werden, wodurch eine bessere thermische Leitfähigkeit erreicht wird. Vor allem dienen Via aber für elektrische Durchführungen zwischen verschiedenen Ebenen eines Folienverbunds. Standardabmessungen für Substrate im gesinterten Zustand liegen typisch im Bereich  $152.4 \times 152.4 \text{ mm}^2$ , Sonderabmessungen betragen bis zu  $450 \times 450 \text{ mm}^2$  [DUP-04]. Verbünde von Folien mit einer Standarddicke von 0.2 mm im gesinterten Zustand sind typisch 1 mm bis 3 mm dick, experimentell wurden Dicken bis 20 mm nachgewiesen [GON-01]. Die Oberflächenrauigkeit  $R_a$  gesintertter LTCC-Substrate beträgt  $\leq 0.8 \text{ }\mu\text{m}$  bei einer normierten Welligkeit von  $\leq 40 \text{ }\mu\text{m/cm}$ . Im Rahmen dieser Arbeit wird das verbreitete Green Tape<sup>®</sup>-System DP 951 [DUP-04] angewendet.

Die wesentlichen Materialeigenschaften von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik und LTCC sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Vergleichende Angaben erfolgen zu BK7 als optischem Glas [SCH-02] und Silizium als Material der Mikromechanik [GOO-04].

**Tabelle 6: Materialeigenschaften**

Eigenschaft	Symbol	Einheit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LTCC	BK7	Silizium
Dichte	$\rho$	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	4.3	3.1	2.5	2.3
E-Modul	E	GPa	340	152	82	131
Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient	$\alpha$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$	6.8 bis 8	5.8	7.1	2.7 bis 3.1
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	24	3	1.1	150 bis 163
Spezifische Wärmekapazität	Q	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	800	825 bis 990	858	71

Um Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- und LTCC-Substrate als Schaltungsträger zu nutzen, werden auf die Keramik Leit-, Widerstands- und Isolationsschichten mittels Dünn- oder Dickschichttechnologien aufgebracht. Kennzeichnend für die Dünnschichttechnologie ist das Abscheiden von Schichten und Schichtsystemen mit Schichtdicken  $\leq 1 \mu\text{m}$  bis  $2 \mu\text{m}$  [HAN-94] über Bedampfungs- oder Zerstäubungsprozesse, was eine Beschränkung auf bereits gesinterte Keramiksubstrate zur Folge hat. Die Strukturierung dünn-schichttechnologisch erzeugter Schichten erfolgt mit fotolithographischen Verfahren, wodurch Strukturauflösungen  $\ll 50 \mu\text{m}$  erreicht werden, die für Elektronikbaugruppen hoher Packungsdichte notwendig sind.

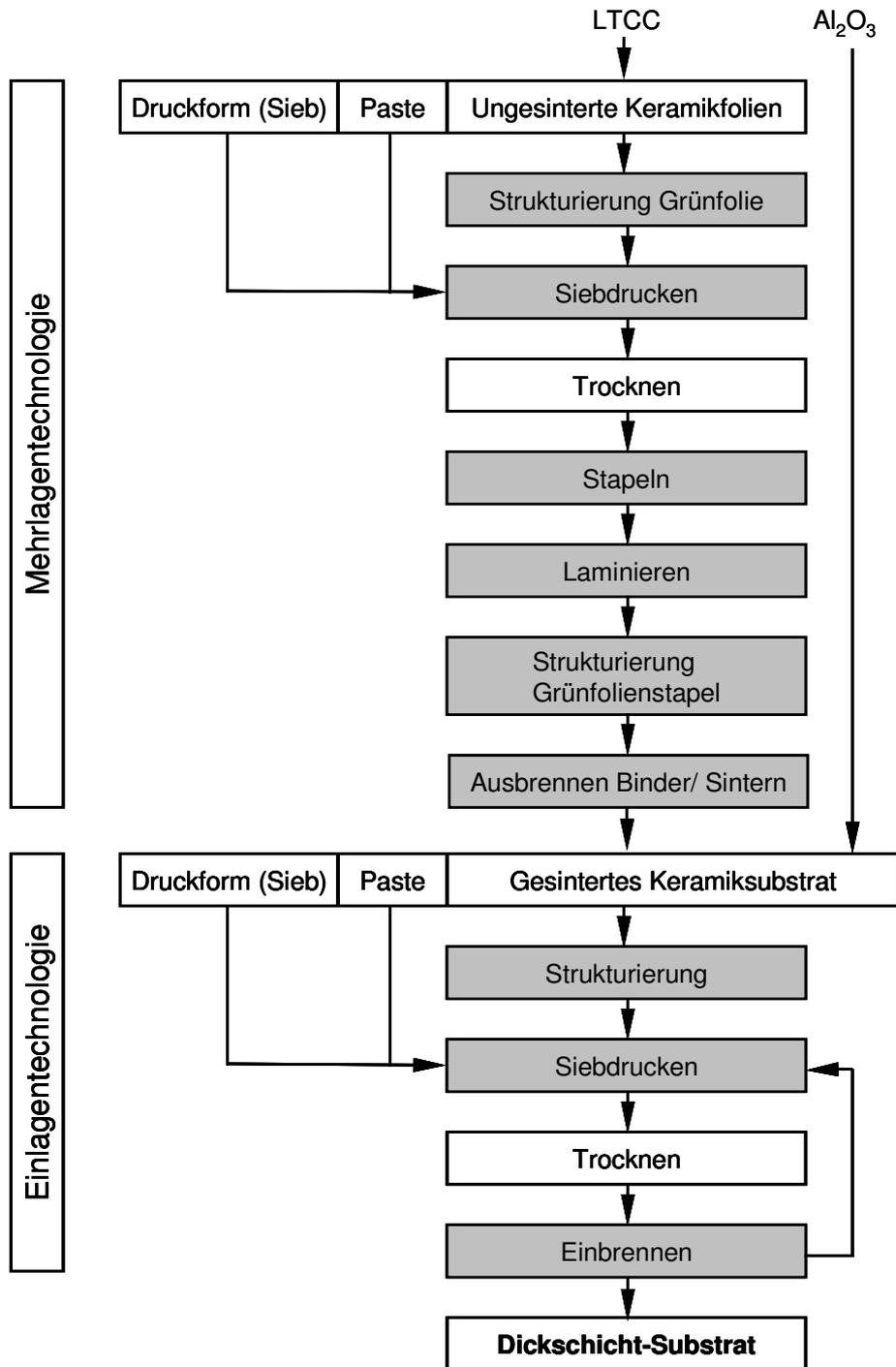
Im Gegensatz dazu erzeugen Dickschichttechnologien durch das gegebenenfalls mehrfache Siebdrucken, Trocknen und Einbrennen pastöser Materialien Schichtdicken  $\gg 2 \mu\text{m}$  und können sowohl für ungesinterte als auch gesinterte Substrate angewandt werden. Aufgrund des Siebdruckprozesses sind Strukturgrößen  $> 100 \mu\text{m}$  üblich [VIA-02], erreichbar sind derzeit  $30 \mu\text{m}$  [LPK-04]. Im Rahmen dieser Arbeit kommen durch Dickschichttechnologien strukturierte Metallisierungen zum Einsatz, die sowohl als Benetzungsflächen für Fügeprozesse als auch als Marken-geometrien zur Orientierung auf dem Substrat dienen. Als Metallisierung kommt ein Leitpastensystem auf AgPd-Basis zum Einsatz. Dieses besteht zu  $\geq 90 \%$  aus einer im Bereich von  $0.5 \mu\text{m}$  bis  $1 \mu\text{m}$  gekörnten AgPd-Metalllegierung und zusätzlich aus einer Glasphase zur Verbesserung der Haftfestigkeit auf dem Keramiksubstrat sowie

organischem Binder, der für die Siebdruckeigenschaften verantwortlich ist und während des Einbrennens der Leitpaste sublimiert. Aufgrund der guten Lötbarkeit, des relativ kleinen Flächenwiderstands von 25 m $\Omega$  bis 35 m $\Omega$ , der Bondbarkeit mit Au- oder Al-Drähten und der geringen Kosten zählt dieses Leitpastensystem zu den am meisten verwendeten Dickschichtsystemen. Die üblichen Schichtdicken liegen im Bereich zwischen 7  $\mu\text{m}$  und 15  $\mu\text{m}$  bei einer Haftfestigkeit auf dem Keramiksubstrat von 5 N/mm<sup>2</sup> bis 10 N/mm<sup>2</sup>. Die Einbrenntemperatur liegt bei 850 °C und ist damit kompatibel zur Sintertemperatur der LTCC- Grünfolien, so dass auch Grünfolien bedruckt werden können. Der Vorgang des Einbrennens selbst erfolgt an Normalatmosphäre. Die Metallisierung ist sowohl mit bleihaltigen Loten (z.B. SnPb, auch mit bis zu 4 % Ag-Anteil) als auch mit bleifreien Loten (z.B. 80Au20Sn) lötbar.

### **2.2.2 Herstellung ebener Keramiksubstrate**

Bei der Herstellung ebener Keramiksubstrate mit Dickschichttechnologien wird zwischen der Ein- und der Mehrlagentechnologie unterschieden. Bei der *Einlagentechnologie* kommen bereits gesinterte Substrate, im Rahmen dieser Arbeit aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bestehend, zum Einsatz. Die Herstellung der Substrate erfolgt mittels Trockenpressen [KRA-81]. Im Rahmen des Trockenpressprozesses wird nicht nur die Ebenheit des Substrats sichergestellt, abhängig von der Form des Presswerkzeugs können auch Brechkerben, Durchbrüche, Sacklöcher und unregelmäßige Außenkonturen erzeugt werden [CER-04]. Aufgrund der Herstellungskosten für das Werkzeug sind aber nur rechteckige, ebene und unstrukturierte Substrate üblich. Die Oberflächenqualität und Ebenheit der Substrate kann nach dem Sinterbrand durch Schleifen, Läppen oder Polieren noch verbessert werden. Auf das gesinterte Substrat werden eine oder mehrere Pastenschichten mittels Siebdruck aufgebracht und eingebrannt. Zusätzlich erfolgt vor oder nach der Schichterzeugung eine mechanische Strukturierung der gesinterten Substrate mit den in Kapitel 2.2.3 näher erläuterten Methoden. Bei der *Mehrlagentechnologie* erfolgt die mechanische Strukturierung und der Siebdruck von Pastenschichten auf einzelnen ungesinterten keramischen Substraten (Grünfolien, im Rahmen dieser Arbeit aus LTCC). Die Herstellung der Grünfolien erfolgt durch Foliengießen [KRA-81]. Die Grünfolien werden nach der Strukturierung gestapelt und in einem Warmpress- und Temperaturprozess zu einem einheitlichen, monolithischen Substrat laminiert und gesintert. Ein durch die Mehrlagentechnologie erzeugtes Substrat kann als Ausgangssubstrat

für die Mehrschichttechnologie eingesetzt werden. Bild 15 fasst den Ablauf von Mehrlagen- und Mehrschichttechnologie zusammen.



**Bild 15: Mehrlagen- und Einlagentechnologie für LTCC- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substrate**

Grau gekennzeichnet sind die Teilprozesse, bei denen es zu einer mechanischen Strukturierung kommt bzw. bei denen bereits erzeugte mechanische Strukturen in

ihrer geometrischen Form beeinflusst werden. Diese Verfahrensschritte werden im folgenden charakterisiert, um deren Eignung für die Erzeugung von im Keramiksubstrat integrierten Fassungsstrukturen für optische Bauelemente zu prüfen.

### 2.2.3 Verfahren zur Strukturierung

Bei den Strukturierungsverfahren ist zwischen Verfahren für ungesinterte und gesinterte Keramikfolien bzw. –substrate zu unterscheiden. Das Ergebnis der Strukturierungsverfahren für ungesinterte Keramikfolien unterliegt darüber hinaus dem Einfluss der sich anschließenden Laminier- und Sinterprozesse.

#### a) Strukturierungsverfahren für ungesinterte Keramikfolien

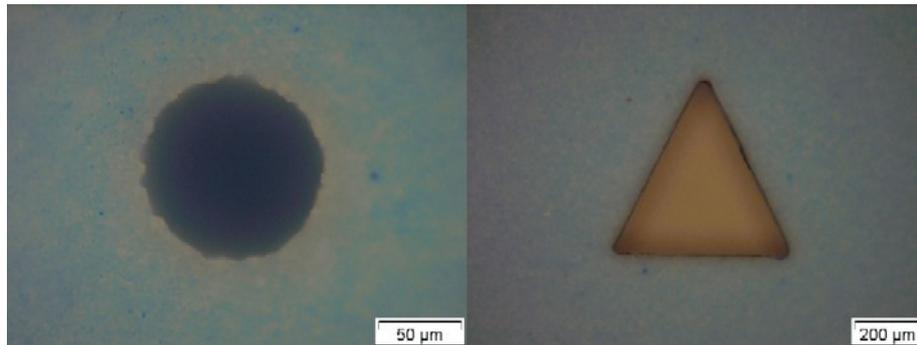
Einzelne Grünfolien und bereits laminierte Grünfolienstapel werden durch Stanzen, Bohren, Laserschneiden, Fräsen, Prägen, Siebdruck und in Ausnahmefällen auch fotolithographisch strukturiert. Fräsen und Prägen werden vorwiegend bei bereits laminierten Grünfolienstapeln angewandt, während die anderen Verfahren zur Strukturierung einzelner Grünfolien genutzt werden. Bis auf den Siebdruck (in Verbindung mit dem Einbrennen der gedruckten Paste) sind alle Verfahren subtraktiv (Materialabtrag) bzw. semisubtraktiv (Materialverdrängung beim Prägen). Bei der Auslegung der Geometrien ist die während des Sinterns eintretende Schwindung im Bereich von 15 % bis 20 %, je nach Orientierung der Grünfolien, zu berücksichtigen.

Zum Bohren und Fräsen kommen Hartmetallwerkzeuge zum Einsatz, die einem relativ hohen Verschleiß unterliegen [HAN-94]. Diese Verfahren werden nur in Sonderfällen und bei geringen Genauigkeitsanforderungen eingesetzt.

Standardverfahren für die Herstellung von Via und Durchbrüchen mit komplexerer Schnittgeometrie ist das Stanzen. Dazu nutzt der Substrathersteller in der Regel einen festen Werkzeugsatz auf CNC-gesteuerten Stanzen, die die Strukturen seriell einbringen. Dieses Verfahren ist wesentlich flexibler als das parallele Einbringen aller Durchbrüche mit einem Werkzeug. In den Stanzen werden Positioniersysteme eingesetzt, die die Grünfolie bis zu 1  $\mu\text{m}$  genau in Bezug auf das Stanzwerkzeug positionieren [KEM-03]. Praktisch werden Löcher mit einem Durchmesser  $> 100 \mu\text{m}$  gestanzt [VIA-02], Durchbrüche werden durch das Aneinanderreihen mehrerer Stanzungen erzeugt. Im Labor wurden beim Stanzen Strukturauflösungen bis zu 10  $\mu\text{m}$  und Stanzgenauigkeiten von  $\pm 10 \mu\text{m}$  erreicht [GON-01].

Als Alternativverfahren bietet sich das Laserstrahlschneiden mit Nd-YAG-Lasern bzw. das Laserstrahlbohren mit gepulsten  $\text{CO}_2$ -Lasern (8 W, 300  $\mu\text{s}$ , 300 Hz [REB-

03]) an. Mit diesem Verfahren können komplexe Schnittgeometrien und Bohrungen  $> 30 \mu\text{m}$  erzeugt werden [KIT-02, LPK-04], wie in Bild 16 gezeigt.



**Bild 16:** Lasergeschnittene Grünfolien [LPK-04]

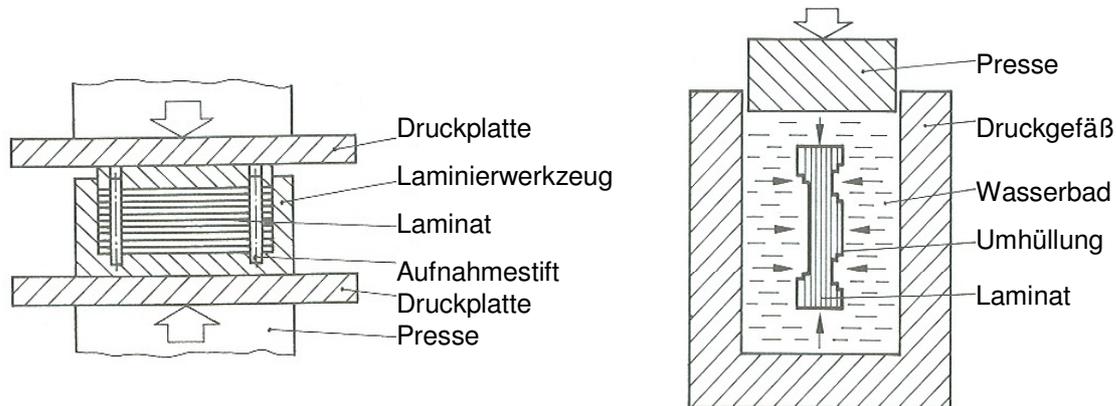
Geprägte Grünfolienstapel wurden bereits für mikrofluidische [REB-03] und mikrooptische [BUS-03] LTCC-Baugruppen hergestellt. Die minimalen Strukturgrößen betragen  $30 \mu\text{m}$  bei Oberflächenrauheiten im Bereich  $< 1 \mu\text{m}$ .

Beim Siebdruckprozess als additivem Strukturierungsprozess werden Dickschichtpasten durch ein fotolithographisch strukturiertes Sieb hindurch auf Substrat aufgetragen und anschließend eingebrannt. Die Strukturauflösung des Siebdruckprozesses wird durch das komplexe Wechselspiel zwischen dem rheologischen Verhalten der Dickschichtpaste, dem Benetzen der Dickschichtpaste auf dem Substrat und den Strukturöffnungen im Sieb bestimmt. Anhaltspunkte für praktisch erreichbare Strukturauflösungen geben die Auslegungsrichtlinien der Substrathersteller, die zum Beispiel Strukturabstände bei Leiterbahnen von  $> 100 \mu\text{m}$  vorschreiben [VIA-02]. Die Genauigkeit der Siebdruckstrukturen wird z.B. mit  $\pm 12.5 \mu\text{m}$  angegeben [EKR-04].

#### b) Stapeln, Laminieren und Sintern ungesinterter Keramikfolien

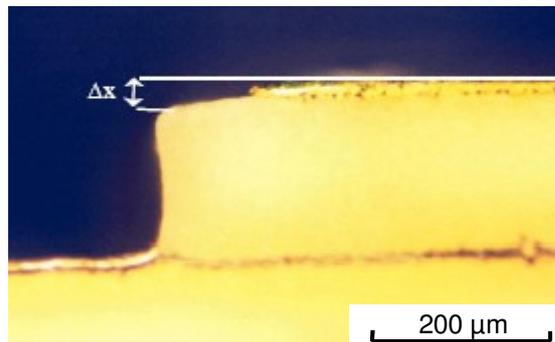
Um das Stapeln einzelner Grünfolien zu erleichtern, werden an den Rändern der einzelnen Grünfolien Bohrungen („Registration Holes“) gestanzt, an denen die Folien auf Stiften aufgenommen werden. Bei höheren Anforderungen an die Stapelgenauigkeit werden mittel Siebdruck strukturierte Marken über eine sequentielle Kamerabeobachtung zueinander ausgerichtet. Die Substrathersteller geben Ausrichtgenauigkeiten benachbarter Lagen Grünfolien von  $30 \mu\text{m}$  bis  $70 \mu\text{m}$  an [VIA-02].

Beim Laminieren der Grünfolien erfolgt unter Druck- ( $20 \text{ MPa}$ ) und Temperaturbeaufschlagung ( $70 \text{ °C}$ ) [DUP-04] die Verbundbildung des Stapels durch thermoplastisches Erweichen und Fließen des organischen Binders. Die Druckbeaufschlagung erfolgt uniaxial in einer beheizbaren Presse oder isostatisch im Wasserbad (Bild 17).



**Bild 17: Uniaxiales (links) und isostatisches (rechts) Laminieren von Grünfolienstapeln**

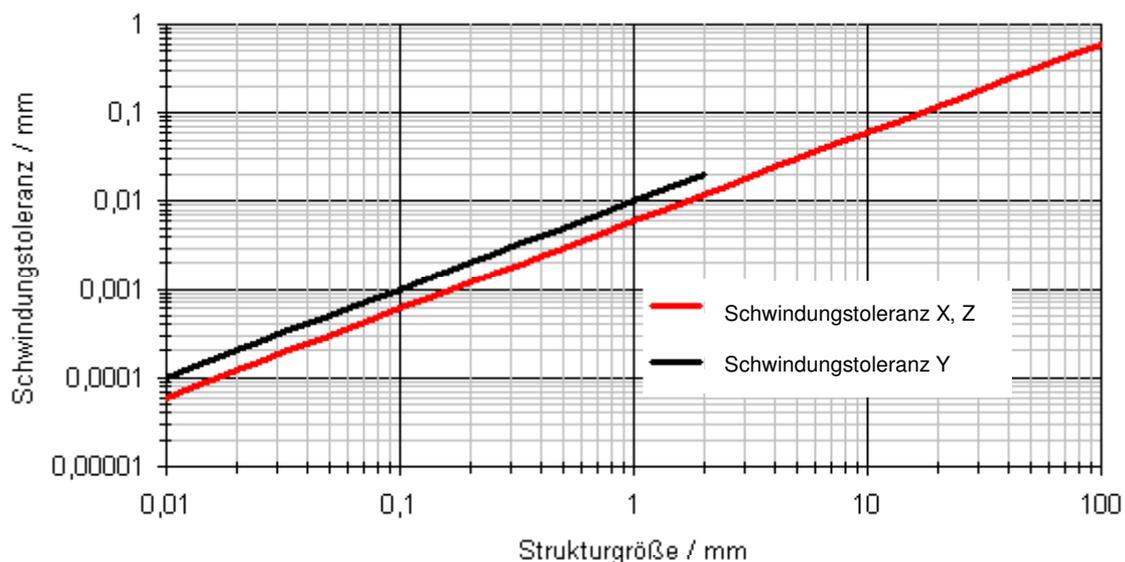
Bei beiden Laminierverfahren kommt es aufgrund des applizierten Drucks und daraus resultierender Kriechvorgängen zur Deformation mechanischer Strukturen (Kantenverrundung, Fließen in Hohlräume – Bild 18) in den Grünfolien, die nach dem Laminieren wieder teilweise relaxieren. Darüber hinaus schließt der Laminierdruck die Verwendung überhängender Geometrien und Hinterschnitte weitestgehend aus, da solche Strukturen während des Laminierens kollabieren würden.



**Bild 18: Kantenverrundung und –deformation an einer Kavität in LTCC [SIM-00]**

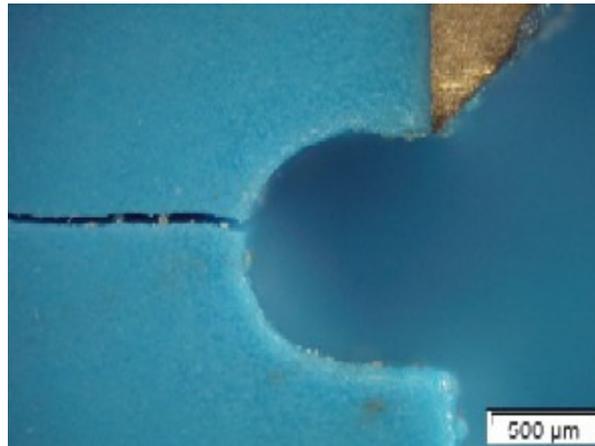
Der Geometriedeformation durch den Laminierdruck kann durch geeignete Negativformen für die Strukturen und die Variation der Laminierparameter in Grenzen entgegengewirkt werden, der Laminierprozess kann sich aber durch niedrigere Laminiertemperaturen, daraus resultierende schlechtere Verbundbildung und eventuelle Probleme bei der Entformbarkeit der Strukturnegative erheblich verkomplizieren. Es ist festzuhalten, dass der Laminiervorgang bezüglich entstehender geometrischer Deformationen nicht allgemein charakterisiert werden kann, dessen Einfluss muss daher empirisch anhand von Versuchsmustern bestimmt und optimiert werden.

Der laminierte Grünfolienstapel wird im letzten Prozessschritt gesintert. Zwischen 200 °C und 500 °C wird über ca. eine Stunde zunächst der organische Binder ausgebrannt, während anschließend über ca. 15 min bei einer Temperatur von ca. 850 °C das eigentliche Sintern zum monolithischen Keramiksubstrat und das Einbrennen der Dickschichtpasten erfolgt. Die Schwindung während des Sinterns wird vom Hersteller des Grünfolien-Systems DP 951 zu 12.7 %  $\pm$  0.3 % in der Substratebene (X- und Z-Richtung) und 15 %  $\pm$  0.5 % senkrecht zur Substratebene (Y-Richtung) angegeben (Werte gelten für einen Grünfolienstapel aus acht nicht metallisierten Lagen). Während die Schwindung selbst durch das geometrische Layout mechanischer Strukturen vorgehalten werden kann, schränkt die Toleranz der Schwindung die Strukturgenauigkeit ein. Bild 19 zeigt die Größenordnung für die Toleranz der Schwindung während des Sinterns in der X- und Z- bzw. Y-Richtung, die für das LTCC-Material DuPont DP 951 angegeben werden.



**Bild 19: Schwindungstoleranz beim Sintern keramischer Grünfolien**

Die Schwindung während des Sinterns kann über die eingeschränkte Genauigkeit mechanischer Strukturen hinaus auch zur Rissbildung an konkaven Ecken und kanten (Bild 20) und in Verbindung mit ungleichmäßig verteilten Metallisierungen zu einer Geometrieverzerrung (lokale und globale Verformung des Substrats) führen.



**Bild 20: Rissbildung an einer konkaven Struktur während des Sinterns**

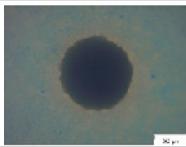
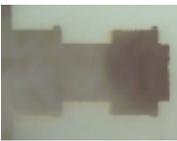
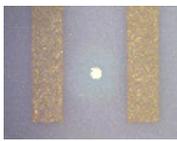
### c) Strukturierungsverfahren für gesinterte Keramiksubstrate

Werden hohe Genauigkeitsanforderungen an das keramische Substrat gestellt, erfolgt eine abschließende Bearbeitung im gesinterten Zustand. Dabei kommt für genaue Konturen das Laserstrahlschneiden zum Einsatz. Wie auch bei ungesinterten Grünfolien erfolgt die Bearbeitung mit Nd-YAG-Lasern bzw. gepulsten CO<sub>2</sub>-Lasern. Die Genauigkeit der erzeugten Strukturen ist im wesentlichen abhängig von der Genauigkeit der Substratpositionierung in Bezug auf den Fokus des Bearbeitungslasers sowie der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Laserleistung im Bearbeitungspunkt. Übliche in der Fertigung realisierte Strukturgrößen sind  $> 30 \mu\text{m}$  bei einer Genauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{m}$  bis  $\pm 20 \mu\text{m}$  [LPK-04].

Zum Vereinzeln der Substrate aus dem Nutzen wird ebenfalls der Laser zum Ritzen der Keramik genutzt, die dann entlang der Kerbspur mechanisch gebrochen wird. Bei Substratdicken größer 0.8 mm muss alternativ eine Diamantsäge zum Vereinzeln eingesetzt werden. Die in geringem Umfang und vorwiegend bei sehr kleinen Stückzahlen genutzten Bearbeitungsverfahren des ultraschallunterstützten Lämpens und Bohrens, die Elektronenstrahlbearbeitung oder das Ätzen haben in der industriellen Fertigung von Dickschicht-Keramiksubstraten nur geringe Bedeutung.

Als additiver Strukturierungsprozess für bereits gesinterte Substrate kommt wiederum der Siebdruck von Dickschichtpasten in Frage. Hier gelten die gleichen Angaben wie beim Siebdruck auf ungesinterten Folien.

**Tabelle 7: Strukturierungsverfahren**

Teilprozess		Stanzen	Laserschneiden	Siebdruck
Strukturierung von Grünfolien	Typische Struktur			
	Strukturauflösung	10 µm (Labor) 50 µm (Industrie)	30 µm	100 µm
	Strukturgenauigkeit X,Z	±10 µm	±20 µm	±12.5 µm
	Strukturgenauigkeit Y	±5 µm (Dickentoleranz)	±5 µm (Dickentoleranz)	±5 µm (Schichtdicke)
Stapeln	Typische Struktur			
	Strukturgenauigkeit X,Z	±25 µm (Stapelgenauigkeit)		
Laminieren	Strukturgenauigkeit X,Z	k.A., abhängig von Laminierdruck und -verfahren		
	Strukturgenauigkeit Y	k.A., abhängig von Laminierdruck und -verfahren		
Sintern	Strukturgenauigkeit X,Z	±15 µm (Strukturgrößen < 5 mm)		
	Strukturgenauigkeit Y	±10 µm (2 mm Substratdicke, ohne Sinterverzug durch Dickschichtprozesse)		
		Σ Genauigkeiten Mehrlagentechnologie: ±50 µm bis ±60 µm (X,Z), ±15 µm (Y)		
Strukturierung gesinterter Substrate	Typische Struktur			
	Strukturauflösung		10 µm (Labor) 30 µm (Industrie)	100 µm
	Strukturgenauigkeit X,Z		±20 µm (= Σ Genauigkeiten Einlagentechnologie)	±12.5 µm
	Strukturgenauigkeit Y		-	±5 µm (Schichtdicke)

Die drei Hauptverfahren der mechanischen Strukturierung ebener Keramiksubstrate – Stanzen von Grünfolien, Laserschneiden gesinterter Substrate und Siebdruck von Dickschichten – können gemäß Tabelle 7 zusammenfassend charakterisiert werden. Daraus leiten sich Schlussfolgerungen ab, die im nachfolgenden Kapitel bei der Auslegung mechanischer Strukturen als Fassungen für optische Bauelemente herangezogen werden:

- Komplexe dreidimensionale Strukturen lassen sich nur über die Mehrlagentechnik erzeugen. Zweidimensionale Strukturen können sowohl in der Mehrlagentechnologie als auch in einzelnen gesinterten Substraten erzeugt werden.
- Die Prozesskette der Mehrlagentechnologie führt bei zweidimensionalen Strukturen, die sich auf einer gemeinsamen Einzellage befinden, zu theoretischen Strukturgenauigkeiten von  $\pm 25 \mu\text{m}$  bei Strukturgrößen  $< 5 \text{ mm}$ . Wesentliche Einflussfaktoren sind die Genauigkeit des Strukturierungsverfahrens und die Schwindungstoleranz beim Sintern.
- Die Prozesskette bei der Mehrlagentechnologie führt bei dreidimensionalen Strukturen, die sich senkrecht zur Substratebene über mehrere Einzellagen ausdehnen, zu theoretischen Strukturgenauigkeiten von  $\pm 50 \mu\text{m}$  bei Strukturgrößen  $< 5 \text{ mm}$ . Zusätzliche Einflussfaktoren sind hier die Stapelgenauigkeit und die Genauigkeit des Laminierprozesses.
- Bei der Mehrlagentechnologie führt die Einzelbearbeitung der keramischen Grünfolien zu gestuften Geometrien, wobei die Einzelfoliendicke die minimale Strukturgröße senkrecht zur Substratoberfläche festlegt.
- Bei der Mehrlagentechnologie führt der Teilprozess des Laminierens zu Restriktionen bezüglich der strukturierbaren Geometrien. Technologisch nicht oder nur schwierig realisierbar sind solche Geometrien, die unter Einfluss des Laminierdrucks zum Kollabieren neigen (Überhänge, freitragende Strukturen wie Membranen etc.).
- Höchste Genauigkeiten lassen sich bei der zweidimensionalen Strukturierung im gesinterten Zustand erzeugen. Die Strukturgenauigkeit ist dann nur vom Bearbeitungsverfahren abhängig. Mit Laserstrahlschneiden und -bohren können  $\pm 10 \mu\text{m}$  bis  $\pm 20 \mu\text{m}$  Strukturgenauigkeit erreicht werden.

### 2.2.4 Thermomechanische Auslegung

Das dem Lösungsansatz zugrundeliegende Konzept zum Aufbau hybrid-optischer Systeme erlaubt neben der Integration von Optik und Elektronik auch die Anwendung thermomechanischer Designprinzipien und Bauelemente, wie sie aus dem Aufbau leistungselektronischer Baugruppen bekannt sind [SER-98]. Der thermomechanischen Auslegung der Systemplattform kommt über den Rahmen der bei Leistungselektronik zu beachtenden Aspekte [STR-98] hinaus besondere Bedeutung zu, da Einsatztemperatur, auftretende Verlustleistung sowie statische und dynamische Temperaturgradienten in der Baugruppe folgenden Auswirkungen haben können:

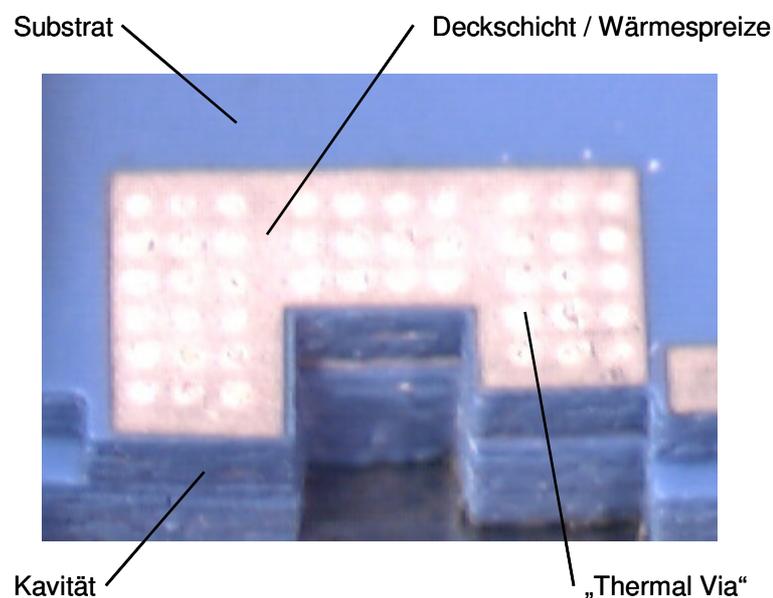
- *Beeinflussung der optischen Funktion:* Resultierend aus Änderungen der Position einzelner Bauelemente innerhalb des optischen Systems infolge thermischer Ausdehnung ändern sich die optischen Parameter der Baugruppe.
- *Beeinträchtigung der Bauelementefunktion:* Die Ausgangsparameter optoelektronischer Bauelemente sind vielfach stark temperaturabhängig. Je nach Anwendungsfall kann dies eine Temperierung von Bauelementen oder der ganzen Baugruppe notwendig machen, während Materialversagen durch Überhitzung prinzipiell zu vermeiden ist.
- *Verringerte Lebensdauer:* Optoelektronische Bauelemente unterliegen einem temperaturabhängigem Materialverschleiß, der zu einer Abnahme der Lebensdauer bei zunehmender Einsatztemperatur führt.
- *Mechanische Spannungen in Fügstellen:* Die in hybriden System nahezu immer vorhandenen Kombinationen von Materialien mit unterschiedlichem Temperaturausdehnungskoeffizienten führen durch die temperaturbedingte Ausdehnung zu mechanischen Spannungen in den Fügstellen.

Keramische Systemplattformen aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder LTCC stellen eine Vielzahl von Möglichkeiten zur thermischen Beeinflussung optoelektronischer Baugruppen und zum Aufbau von Temperaturregelkreisen zur Verfügung. Dazu zählen:

- *Temperaturregler* sind mit einfachen und als Katalogware erhältlichen integrierten Schaltkreisen zu realisieren, die durch externe passive Komponenten parametrisiert und vorab bestückt werden können.
- *Passive Wärmesenken* können als Kühlkörper in SMD-Bauweise integriert werden. Ein anderer Ansatz [MAZ-98] sieht vor, Grünfolien auf einen metallischen

Träger als Wärmesenke zu laminieren.

- Als *aktive Wärmesenken* für kleine bis mittlere Verlustleistungen kommen Peltier-elemente zum Einsatz, die abhängig von Größe und Bauform in miniaturisierter einstufiger Bauweise z.B. Verlustleistungen bis 20 W abführen [KRY-04].
- Für mittlere und hohe Verlustleistungen ( $> 10$  W) werden *Wasserkühlungen* eingesetzt. Durch integrierte Kanäle im Substrat wird dabei das Kühlmedium an der Wärmequelle vorbeigeführt [SHA-98]. Ein anderer Ansatz basiert darauf, auch den Pumpmechanismus als Keramikmembran mit einem dickschichttechnologisch erzeugten piezoelektrischen Aktor einschließlich der elektronischen Ansteuerung in das Substrat zu integrieren, um so einen geschlossenen Kühlkreislauf zu erzeugen [THE-02, THU-03].
- Die Modifizierung der thermomechanische Eigenschaften von *Temperaturregelstrecken* in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder LTCC erfolgt über die Einbringung von Bohrungen („Thermal-Via“, Bild 21) und deren Verfüllen mit thermisch gut leitenden Dickschichtpasten wie z.B. Silber. Die thermische Leitfähigkeit wird so von ursprünglich  $3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (LTCC) bzw.  $24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) auf  $30 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (LTCC [KIN-03]) bzw.  $> 50 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , [PAN-90]) erhöht.



**Bild 21:** „Thermal Vias“ in einem LTCC-Substrat

- Als *Messglied* im Temperaturregelkreis kommen Heiß- und Kaltleiter in Betracht, die hybrid in unmittelbarer Nähe der Wärmequelle auf dem Keramiksubstrat montiert werden können.

## 2.3 Varianten von unmittelbaren Fassungen und Referenzstrukturen

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben können Fassungen, wenn deren Genauigkeit ausreicht, zum Positionieren von optischen Bauelementen unter Zuhilfenahme mechanischer Anschläge genutzt werden. Der damit verbundene Montageaufwand ist gering, weshalb diese Art der Bauelemente-Positionierung anzustreben ist. Die dabei zum Einsatz kommenden Fassungen müssen, neben den in Kapitel 2.1 genannten allgemeinen Anforderungen, den folgenden Kriterien genügen:

- Der in Einbaulage wirksame Formschluss zwischen Bauelement und Fassung soll das Bauelement unabhängig von Positioniersystem und Handhabungswerkzeug stabil in der gewünschten Position fixieren. Im einfachsten Fall wirkt dazu die Gewichtskraft des Bauelements, die von den mechanischen Anschlägen aufgenommen wird.
- Die Fassungsgeometrie darf die Justierung toleranzbehafteter Bauelemente nicht behindern. Aufgrund hoher Genauigkeitsanforderungen bzw. notwendiger Justiervorgänge wird in einigen Fällen ein Positionieren des zu fassenden Bauelements gegen mechanische Anschläge nicht erwünscht und auch nicht sinnvoll sein. Das freie Positionieren bzw. Justieren des Bauelements wird durch die Fassungsstruktur dann unterstützt, indem ausreichend Bewegungsbereich in den geforderten Freiheitsgraden vorgesehen wird.

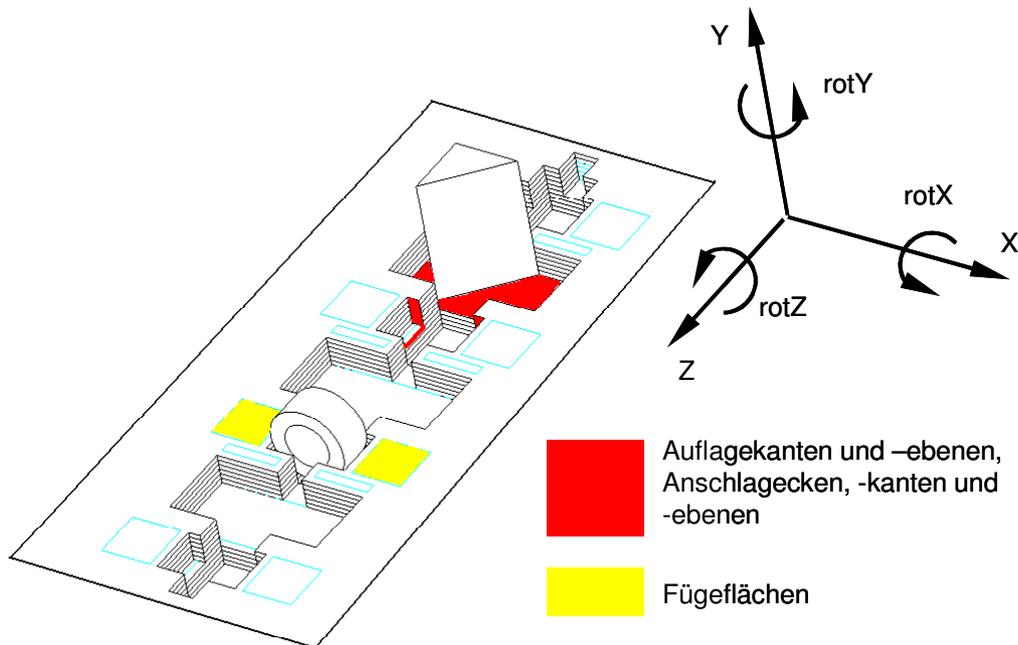
### 2.3.1 Fassungsstrukturen mit mechanischen Anschlägen

Fassungen mit mechanischen Anschlägen zum Positionieren optischer Bauelemente können mit den folgenden Merkmalen charakterisiert werden:

- Freiheitsgrade des Bauelements, die durch den mechanischen Kontakt gesperrt werden, wodurch die Position des Bauelements senkrecht zur optischen Achse und dabei parallel (X) bzw. senkrecht (Y) zur Substratebene oder in Richtung der optischen Achse (Z) sowohl translatorisch als auch rotatorisch bestimmt bzw. auch überbestimmt wird (siehe Bild 22),
- mechanischer Kontakt und Positionsbestimmung des Bauelements an der für die optische Funktion relevanten Fläche oder an einer untergeordneten Geometrie,
- erreichbare Genauigkeit der Positionsbestimmung des Bauelements,
- punkt-, linien- oder flächenförmige Paarung zwischen Bauelement und Fassung,

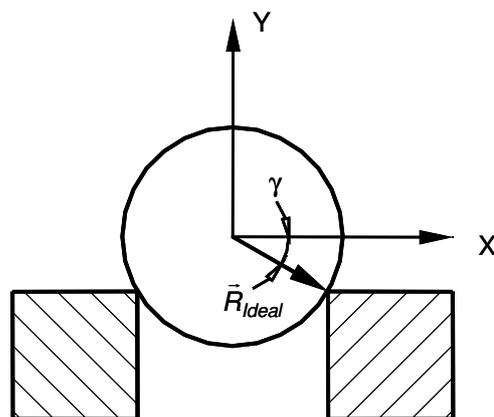
- anwendbar in der Ein- oder Mehrlagentechnologie.

Für rund- bzw. planoptische Bauelemente können die in Bild 22 schematisch dargestellten und im folgenden beschriebenen Anschlaggeometrien angeführt werden.



**Bild 22:** Fassungsstrukturen in ein- und mehrlagigen Substraten

a) Auflagekanten für rundoptische Bauelemente



**Bild 23:** Auflagekanten für rundoptische Bauelemente

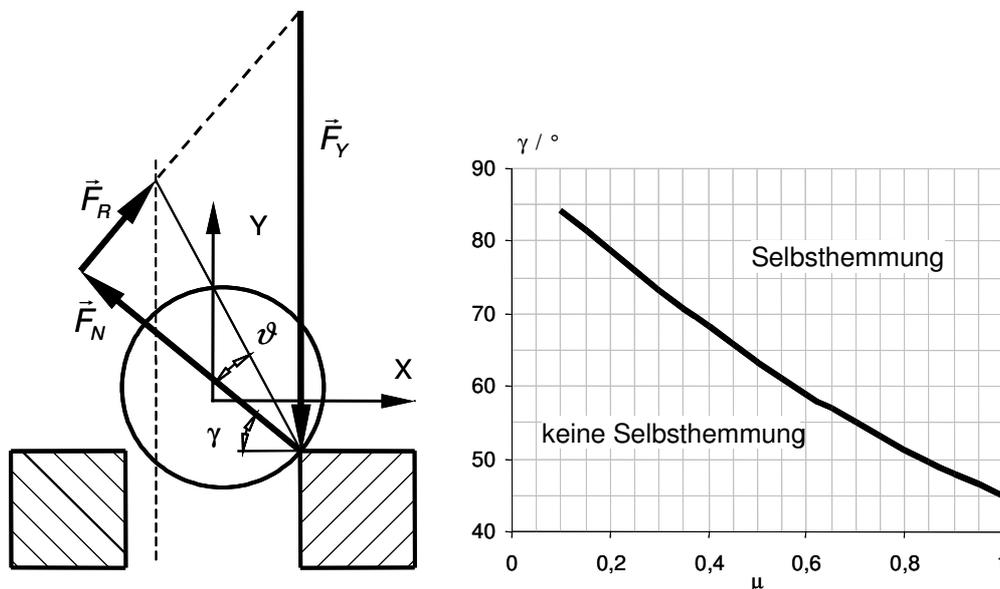
Auflagekanten gemäß Bild 23 bestimmen die Position des Bauelements in X und Y sowie rotX und rotY und greifen am optisch nicht wirksamen Außendurchmesser an. Die Paarung ist überbestimmt, im Idealfall bilden sich zwei linienförmige Kontaktstellen aus. Auflagekanten sind in der Ein- und Mehrlagentechnologie strukturierbar. Bei der Auslegung des Aufwinkels  $\gamma$  ist zu berücksichtigen, dass beim

Positionieren des rundoptischen Bauelements gegen die Auflagekanten als mechanische Anschläge Selbsthemmung vermieden wird. Dazu kann die Paarung Bauelement – Anschlag vereinfachend als Gehemme [KRA-04] angesehen werden (Bild 24). Wird das Bauelement beim Einsetzen von oben nicht exakt in der Solllage positioniert, entsteht an einer der Auflagekanten die Normalkraft  $F_N$  als Projektion der Positionierkraft  $F_Y$ . Die aus der Reibung zwischen Bauelement und Auflagekante resultierende Reibkraft  $F_R$  wirkt dem Positionieren in Y entgegen. Wird die Summe aus Aufwinkeln  $\gamma$  und Reibwinkel  $\vartheta$  größer als  $90^\circ$ , tritt Selbsthemmung ein. Ein Greifer mit in X-Richtung nachgiebiger Aufhängung ist dann nicht mehr in der Lage, die Reibung zu überwinden und das Bauelement in die Solllage zu positionieren. Bild 24 rechts zeigt den maximal zulässigen Aufwinkeln  $\gamma$  als Funktion des Reibwerts  $\mu$ . Die in der Literatur [HAB-93] angegebenen Reibwerte  $\mu$  für Paarungen von Keramik mit Metall bzw. Glas sind in der Regel größer als 0,5, womit Aufwinkeln  $< 60^\circ$  in Frage kommen.

$$F_R = \mu * F_N \quad (1)$$

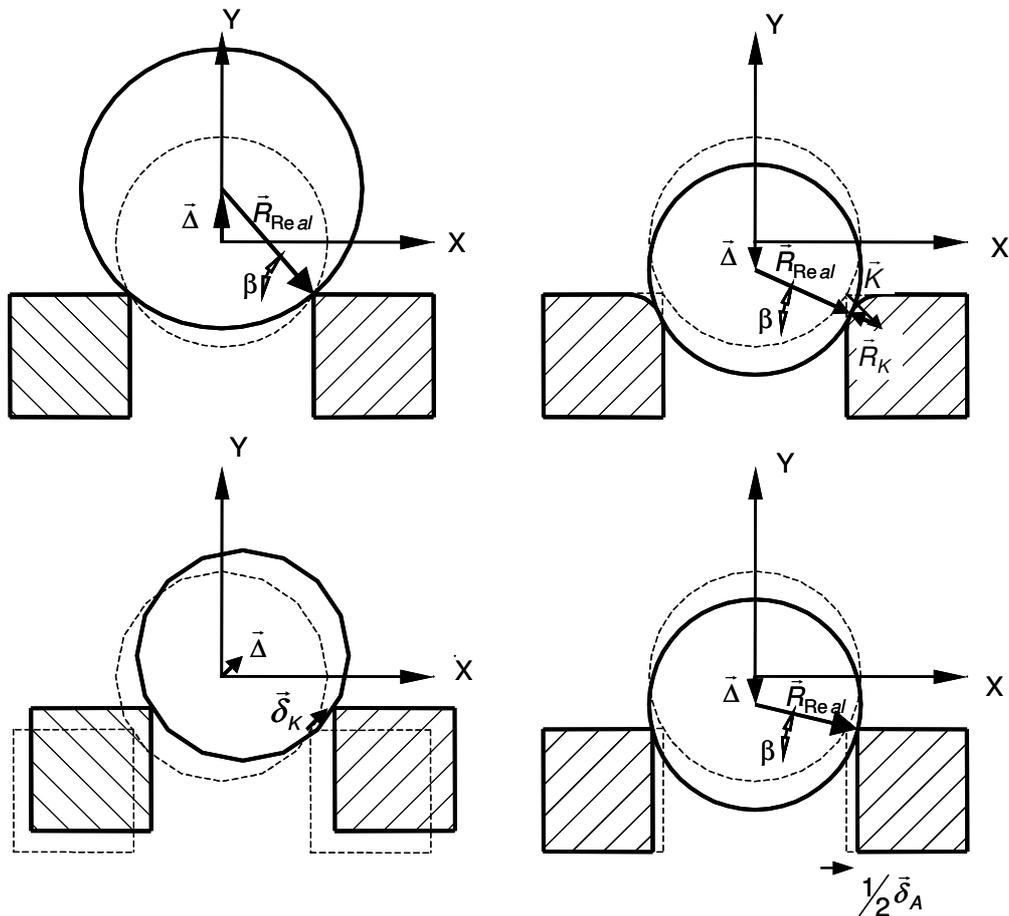
$$\vartheta = \arctan(\mu) \quad (2)$$

$$\text{keine Selbsthemmung: } \vartheta + \gamma < 90^\circ \quad (3)$$



**Bild 24:** Kräfteverhältnisse beim Positionieren rundoptischer Bauelemente an Auflagekanten und Grenzwinkel  $\gamma$  für Selbsthemmung

Die für die Genauigkeit der lateralen Positionierung des Bauelements maßgeblich einfließenden Toleranzen sind in Bild 25 zusammengefasst. Nicht betrachtet in diesem Zusammenhang werden Toleranzen, die sich durch eine Fehllage der optischen Achse im Bauelement selbst ergeben (Dezentrierung, Windschiefheit).



**Bild 25:** Geometriefehler an Auflagekanten für rundoptische Bauelemente (von links oben im Uhrzeigersinn): Durchmesser­toleranz, Kantenverrundung, Kantenabstand und Kantenfehllage (gestrichelt ist jeweils die Sollgeometrie dargestellt)

Die Positionsabweichung  $\vec{\Delta}$  kann in Vektorschreibweise wie folgt formuliert werden, wobei der Fehlervektor  $\vec{F}$  die Verschiebung des Auflagepunkts und der Vektor  $\vec{R}_{Real}$  den sich einstellenden tatsächlichen Auflagevektor beschreiben:

$$\vec{\Delta} = \vec{R}_{ideal} + \vec{F} - \vec{R}_{Real} \quad (4)$$

Entsprechend Bild 25 führt dies bei Geometriefehlern der Fassung bzw. des Bauelements zu folgenden Gleichungen in Vektor- und Komponentenschreibweise:

Durchmessertoleranz: 
$$\vec{\Delta} = \vec{R}_{ideal} - \vec{R}_{Real} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta_Y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cos(\gamma) \\ -R \sin(\gamma) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -(R + \delta_R) \cos(\beta) \\ (R + \delta_R) \sin(\beta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Die Tolerierung des Außendurchmessers bzw. des Bauelementeradius  $\delta_R$  (bei einer angenommen ideal zentrisch angeordneten optischen Achse) beträgt bei den Rundoptiken der Strahlkollimationsbaugruppe bis zu 50  $\mu\text{m}$ .

Kantenverrundung: 
$$\bar{\Delta} = \bar{R}_{Ideal} + \bar{K} + \bar{R}_K - \bar{R}_{Real} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta_Y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cos(\gamma) \\ -R \sin(\gamma) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sqrt{2} R_K \\ -\sqrt{2} R_K \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -(R + R_K) \cos(\beta) \\ (R + R_K) \sin(\beta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Kantenverrundungen treten bei Mehrlagentechnologie während des Laminierens auf.

Kantenfehlage: 
$$\bar{\Delta} = \bar{\delta}_K \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta_X \\ \Delta_Y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_{K,X} \\ \delta_{K,Y} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

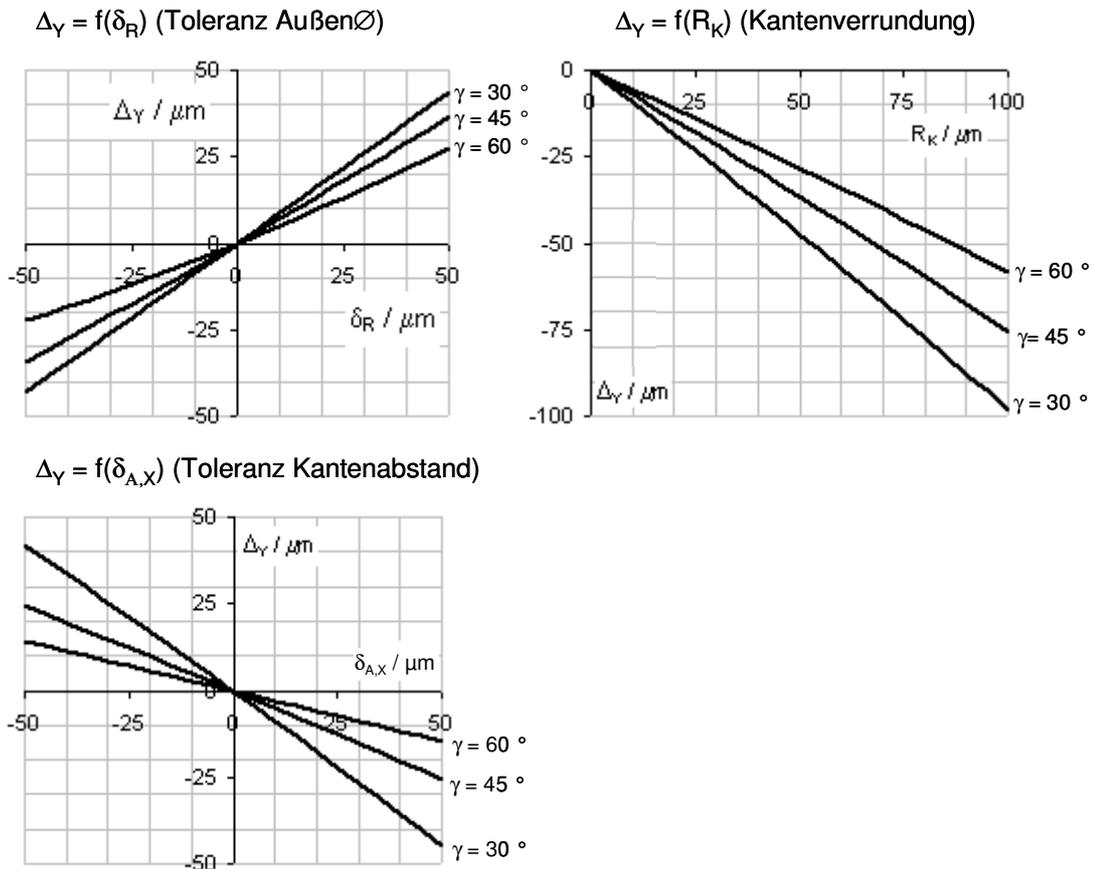
Eine Kantenfehlage wird durch die Ungenauigkeit des Strukturierungsverfahrens bestimmt, kann aber in der Mehrlagentechnologie auch durch die Anordnung der Kanten auf einer anderen als der Bezugseinzelfolie (Stapel- und Laminierungsungenauigkeit, Sinterschrumpf) entstehen.

Kantenabstand: 
$$\bar{\Delta} = \bar{R}_{Ideal} + \frac{1}{2} \bar{\delta}_A - \bar{R}_{Real} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta_Y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cos(\gamma) \\ -R \sin(\gamma) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \delta_{A,X} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -R \cos(\beta) \\ R \sin(\beta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

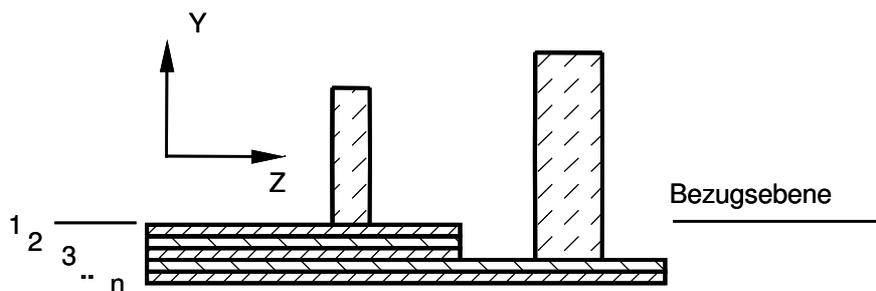
Ein fehlerhafter Abstand der Auflagekanten entsteht durch die Ungenauigkeit des Strukturierungsverfahrens, in der Mehrlagentechnologie aber auch durch die Laminierungsungenauigkeit und den Sinterschrumpf.

Für die rundoptischen Bauelemente der Strahlkollimationsoptik (Kollimations- und Fokuslinse) mit einem Radius von 1.5 mm ergeben sich beispielhaft Einzeltoleranzfelder gemäß Bild 26.



**Bild 26:** Positionsabweichung an Auflagekanten für ein rundoptisches Bauelement mit  $R = 1.5 \text{ mm}$  und verschiedene Aufwinkeln  $\gamma$

b) Auflageebenen für planoptische Bauelemente



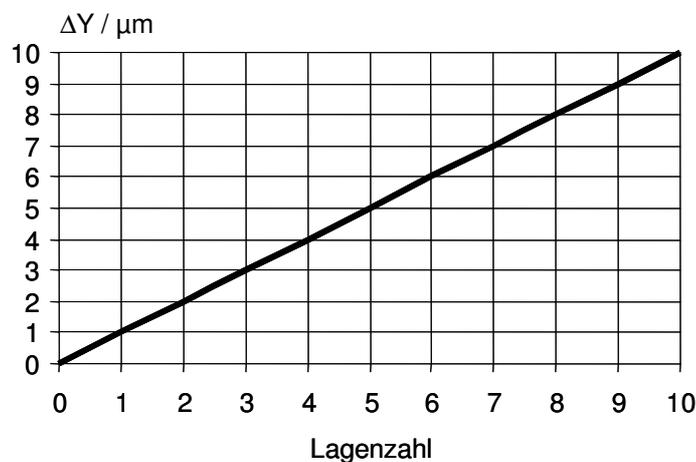
**Bild 27:** Auflageebenen für planoptische Bauelemente

Auflageebenen gemäß Bild 27 bestimmen die Position des Bauelements in Y sowie rotX und rotZ, greifen dabei aber an optisch nicht wirksamen Außengeometrien an. Die Paarung ist bei ideal flächenförmigem Kontakt nicht überbestimmt. Mehrere verschiedene Auflageebenen sind nur in der Mehrlagentechnologie strukturierbar, bei der Einlagentechnologie bildet die Substratoberfläche die einzig verfügbare Auflageebene und wird gleichzeitig als Referenzebene genutzt. In der Mehrlagentechnologie führen die Toleranz des Schwindens beim Sintern und gegebenenfalls der Einfluss

des Laminierdrucks zu einer Fehllage von Auflageebenen, die nicht in der gemeinsamen Bezugsebene liegen. Wird die Schwindung bei der konstruktiven Auslegung von Auflageebenen in verschiedenen Y-Koordinaten berücksichtigt, kann die Positionsabweichung in Y in erster Näherung als Funktion von Schwindungstoleranz  $\delta_S$ , Foliendicke D und Folienlage n beschrieben werden:

$$\Delta_Y = n * D * \delta_{S,Y} \tag{13}$$

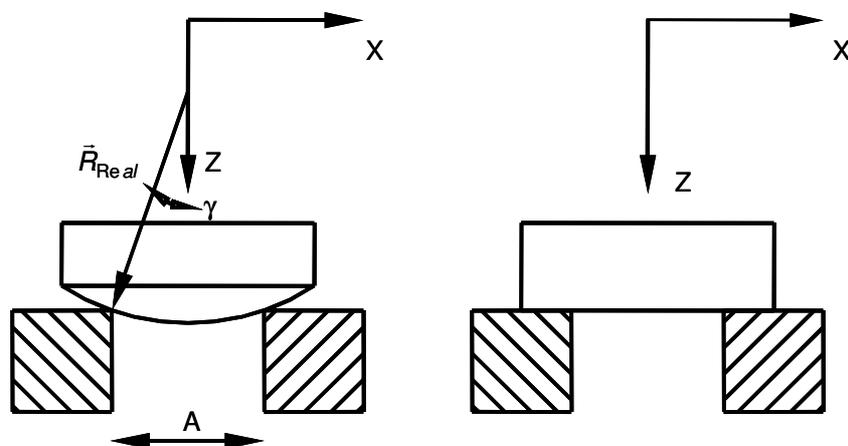
Für das im Rahmen der Arbeit verwendete LTCC-Material DP 951 ergeben sich (in Übereinstimmung mit Bild 27), die in Bild 28 gezeigten Abweichungen  $\Delta_Y$  bei einer Foliendicke von 200  $\mu\text{m}$  und einer Schwindungstoleranz von  $\pm 0.5\%$ .



**Bild 28: Positionsabweichung einer Auflageebene in Y, resultierend aus Sinterschrumpf**

Eine weitere Ursache für eine Positionsabweichung  $\Delta_Y$  ist die Welligkeit  $c_Y$  des Substratmaterials, bezogen auf die Gesamtlänge der optischen Baugruppe.

c) Anlageecken und -kanten für rund- und planoptische Bauelemente



**Bild 29: Anlagekanten und -ecken für rund- und planoptische Bauelemente, A: Aperturbreite**

Anlageecken und -kanten wie in Bild 29 dargestellt eignen sich für Bauelemente mit konvex sphärischen, asphärischen bzw. zylindrischen oder planen Funktionsflächen und bestimmen deren Position in Z sowie rotY und gegebenenfalls auch rotX, indem das Bauelement durch Positioniersystem und Greifer gegen den Anschlag geschoben wird. Die Paarung erfolgt direkt an der optischen Funktionsfläche. Konvex sphärische bzw. asphärische Funktionsflächen führen zu einer punktförmigen, nicht überbestimmten Paarung, konvex zylindrische oder plane Funktionsflächen hingegen zu einer linien- bzw. flächenförmigen, überbestimmten Paarung. Anlageecken und -kanten sind in der Ein- und Mehrlagentechnologie strukturierbar. Die für die Genauigkeit der axialen Positionsbestimmung des Bauelements maßgeblichen einfließenden Toleranzen sind in Bild 30 zusammengefasst. Nicht betrachtet in diesem Zusammenhang werden Toleranzen, die sich durch eine Fehllage der optischen Achse im Bauelement selbst ergeben (Dezentrierung, Windschiefheit).

Die Positionsabweichung  $\vec{\Delta}$  kann in Vektorschreibweise wie folgt formuliert werden, wobei der Fehlervektor  $\vec{F}$  wiederum die Verschiebung des Anlagepunkts und der Vektor  $\vec{R}_{Real}$  den sich einstellenden tatsächlichen Anlagevektor beschreiben:

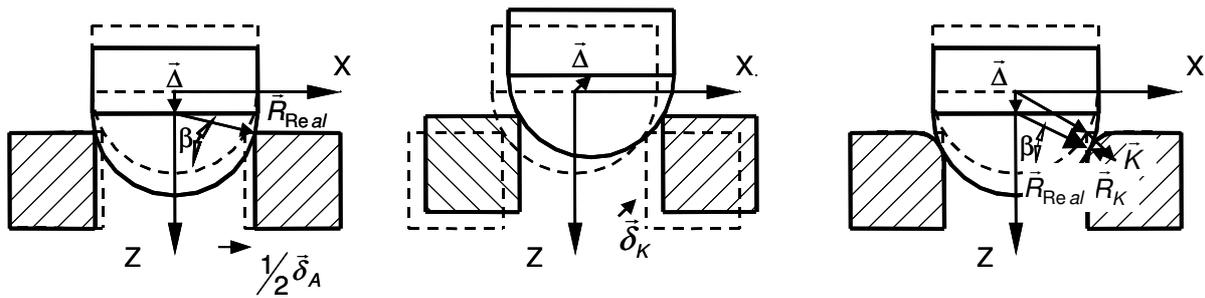
$$\vec{\Delta} = \vec{R}_{ideal} + \vec{F} - \vec{R}_{Real} \quad (14)$$

Im Gegensatz zum Aufgewinkel bei Auflagekanten wird zur Charakterisierung der Anlageecken bzw. -kanten die freie Apertur A eingeführt. Relevante Geometriefehler an dieser Fassungsstruktur sind entsprechend Bild 30 die Toleranz der Apertur, die Fehllage der Anlagestruktur in der X-Z-Ebene und die Kantenverrundung, die sich durch folgende Gleichungen in Vektor- und Komponentenschreibweise beschreiben lassen:

Aperturbreite: 
$$\vec{\Delta} = \vec{R}_{ideal} + \frac{1}{2} \vec{\delta}_A - \vec{R}_{Real} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} A \\ 0 \\ \sqrt{R^2 - \left(\frac{1}{2} A\right)^2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \delta_{A,X} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -R \cos(\beta) \\ 0 \\ -R \sin(\beta) \end{pmatrix} \quad (16)$$

Ein fehlerhafter Abstand der Auflagekanten entsteht durch die Ungenauigkeit des Strukturierungsverfahrens, in der Mehrlagentechnologie aber auch durch die Laminierungengenauigkeit und den Sinterschrumpf.



**Bild 30:** Geometriefehler an Anlageecken für Bauelemente mit konvexer optischer Funktionsfläche (von links): Aperturbreite, Eckenfehlage, Eckenverrundung. Für  $R \rightarrow \infty$  geht die Anlageecke zur Kante bzw. Fläche über.

Eckenverrundung: 
$$\bar{\Delta} = \bar{R}_{ideal} + \bar{K} + \bar{R}_K - \bar{R}_{Real} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 A \\ 0 \\ \sqrt{R^2 - (1/2 A)^2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sqrt{2} R_K \\ 0 \\ \sqrt{2} R_K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -(R + R_K) \cos(\beta) \\ 0 \\ -(R + R_K) \sin(\beta) \end{pmatrix} \quad (18)$$

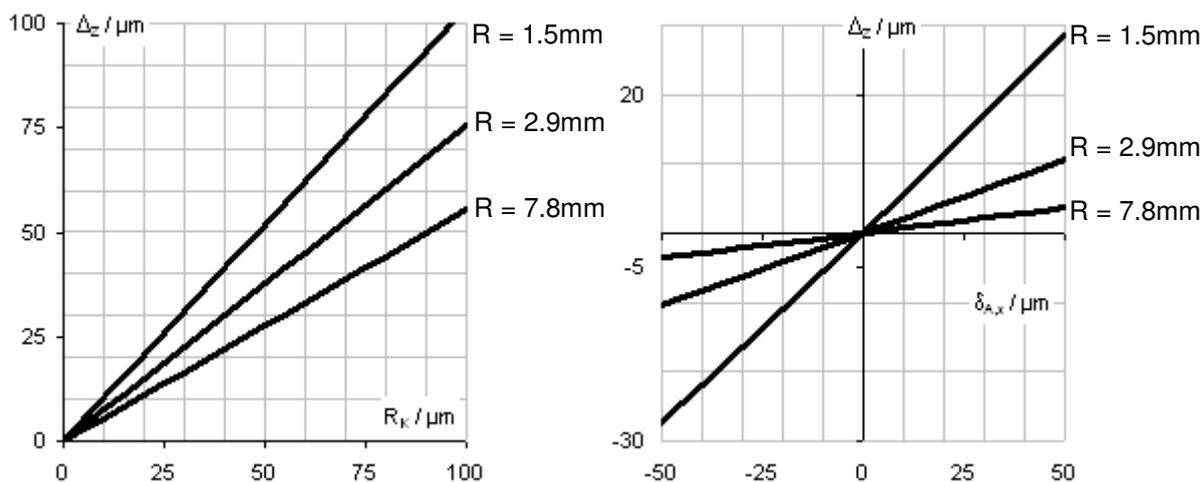
Eckenverrundungen treten in der Ein- und Mehrlagentechnologie beim Verfahren des Strukturierungswerkzeugs (Stanzstempel, Laserstrahl) bzw. des Substrats, in der Mehrlagentechnologie aber auch beim Laminieren, auf.

Ecken- bzw. Kantenfehlage: 
$$\bar{\Delta} = \bar{\delta}_K \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta_x \\ 0 \\ \Delta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_{K,x} \\ 0 \\ \delta_{K,z} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Eine Ecken- bzw. Kantenfehlage wird durch die Ungenauigkeit des Strukturierungsverfahrens bestimmt, kann aber in der Mehrlagentechnologie auch durch die Anordnung der Kanten auf einer anderen als der Bezugseinzelfolie (Stapel- und Laminierungengenauigkeit, Sinterschrumpf) entstehen.

Beispielhaft ergeben sich für die rundoptischen Bauelemente der Strahlkollimationsoptik (Kollimations- und Fokuslinse) mit Krümmungsradien von 1.5, 2.9 mm, 7.8 mm und  $\infty$  Positionsabweichungen gemäß Bild 31. Dabei wird eine Aperturbreite  $A$  von 75 % (2.236 mm) des Linsendurchmessers angenommen, was in diesem Fall ausreichend ist, um den Strahlengang nicht abzuschatten. Deutlich wird, dass bei den in miniaturisierten optischen Systemen häufig verwendeten kleinen Krümmungsradien optischer Funktionsfläche ein Positionieren in Strahlrichtung durch Anlegen an Kanten und Ecken selten sinnvoll ist.



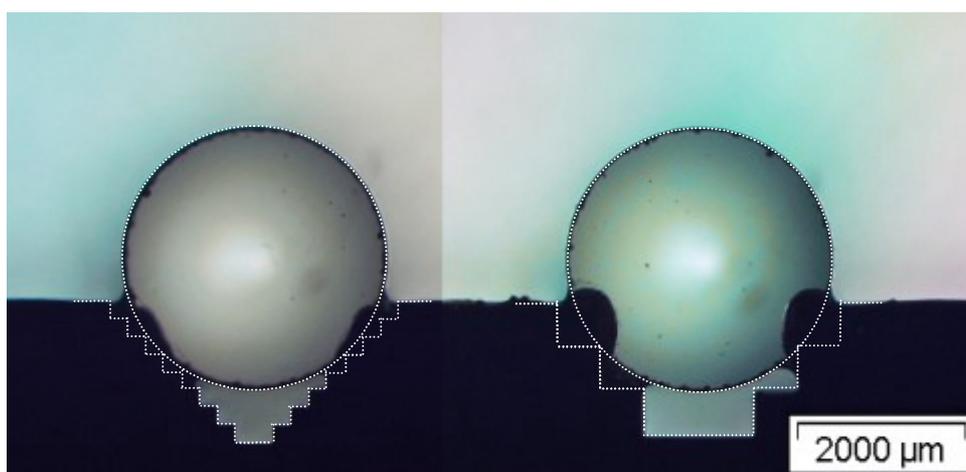
**Bild 31:** Eckenverrundung (links) und Aperturbreitentoleranz (rechts) an Anlagekanten mit einer Aperturbreite  $A$  von 2.236 mm. Für  $R \rightarrow \infty$  gehen die Lagefehler  $\Delta Z$  gegen 0.

### 2.3.2 Sonstige Fassungsgeometrien und Referenzstrukturen

Die Strukturierungsmöglichkeiten für keramische Substrate ermöglichen über die Erzeugung mechanischer Anschläge hinaus auch die Integration weiterer, die Montage optischer Bauelemente unterstützender geometrischer Strukturen.

#### a) Sonstige Fassungsgeometrien

- *Klebstofffallen:* In der Mehrlagentechnologie können an mechanischen Anschlägen Klebstofffallen strukturiert werden, um beim Fügen mittels Kleben durch Kapillareffekte eine definierte Benetzung zu erzielen. Die dadurch ebenfalls mögliche Begrenzung des direkt an der Fügestelle applizierten Klebstoffvolumen vermindert den Einfluss der Klebstoffschrumpfung während des Aushärtens.

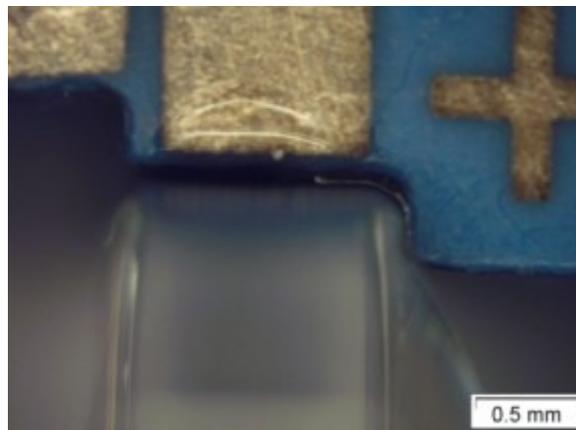


**Bild 32:** Unterschiedliche Ausführung von Klebstofffallen: links fein strukturiert und an die Bauelementkontur angepasst, rechts grob strukturiert

- *Kavitäten:* Bauelementgeometrien können in die Substratebene hineinragen,

ohne dass diese zur Positionierung relevant sind. Kavitäten im Substrat verhindern solche Geometrie-Kollisionen und schaffen gleichzeitig Freiraum für das Justieren von Bauelementen.

- *Benetzungsflächen für Lote:* Mit Dickschichttechnologien strukturierte Metallisierungen in unmittelbarer Nähe von Fassungsgeometrien können als Benetzungsflächen für Lotverbindungen dienen, mit denen Bauelemente gefügt oder elektrische Kontaktierungen z.B. für den ESD-Schutz realisiert werden. Zu beachten ist dabei, dass die Metallisierung nicht unmittelbar am Rand von Kavitäten platziert werden sollte (Abstand  $> 100 \mu\text{m}$ ), da sonst beim Siebdruckprozess die Dickschichtpaste undefiniert in die geometrische Struktur fließt.

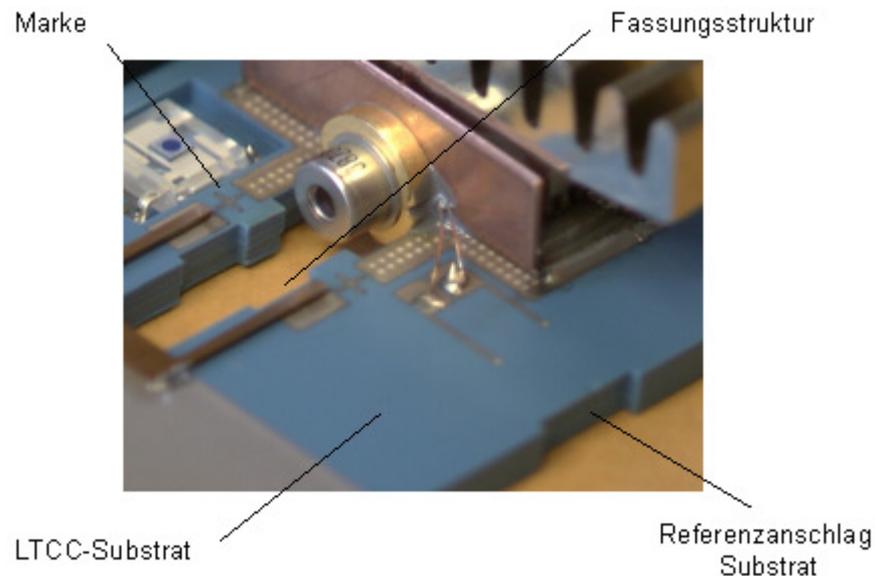


**Bild 33:** Benetzungsfläche an einer Fassungsstruktur für eine Linse

#### b) Referenzstrukturen

- *Mechanische Substratreferenzen:* Die Vereinzelung der Keramiksubstrate aus dem Gesamtverbund wird standardmäßig mit einer Genauigkeit  $> 100 \mu\text{m}$  durchgeführt. Für den Einbau der Systemplattform in eine übergeordneten Baugruppe können Ein- und Mehrlagensubstraten mit mechanischen Anschlägen am Substratrand versehen werden, die unabhängig von der Vereinzelung eine Referenzierung der Systemplattform mit der Genauigkeit des Strukturierungsverfahrens erlauben.
- *Marken:* Wird auf die Referenzierung der Systemplattform durch Anschläge verzichtet bzw. ist diese zu ungenau, kann die Ermittlung relevanter Positionen auf dem Substrat durch die Vermessung von mit Dickschichttechnologien erzeugten Marken erfolgen. Diese lassen sich häufig einfacher anmessen als geometrische Strukturen, da die Beleuchtung für die gesamte Substratoberfläche einheitlich gestaltet werden kann. Befinden sich die Marken in unmittelbarer Nähe von Fas-

sungsstrukturen und wird damit der Einfluss der Schwindung minimiert, kann unabhängig von den relativ groben Toleranzen der Substrataußenkanten sehr genau auf die Position der Fassung geschlossen werden.



**Bild 34:** Substratreferenzen und Marken zur Lagebestimmung von Fassungsstrukturen

### 2.3.3 Zusammenfassung der theoretischen Überlegungen

Die theoretischen Überlegungen haben gezeigt, dass aufgrund des Zusammenwirkens von Bauelementtoleranzen und der herstellungsbedingten Ungenauigkeiten der Fassungsstrukturen die Abweichungen von der Soll-Position eines Bauelements beim Positionieren gegen mechanische Anschläge in keramischen Substraten erheblich sein können und oft im zweistelligen Mikrometerbereich liegen. Der Einfluss der Strukturgenauigkeit der vorgestellten Fassungsgeometrien selbst kann allerdings minimiert werden durch:

- *Auswahl geeigneter Geometrieparameter:* Dazu zählen vor allem Aufschlagwinkel für rünoptische Bauelemente, die zwischen  $60^\circ$  (geringer Einfluss von Bauelementtoleranzen und ungenauen Fassungsstrukturen) und  $30^\circ$  (sicheres Positionieren des Bauelements in der Fassung bei Vermeidung von Selbsthemmung) liegen sollen.
- *Einsatz von Anschlägen nur bei geeigneten Bauelementen:* Insbesondere stark gekrümmte Anlageflächen an den Bauelementen (z.B. bei kleinen Außendurchmessern oder Radien der optischen Funktionsflächen im Bereich kleiner 5 mm) führen zu starken Positionsabweichungen schon bei geringen Strukturungenauigkeiten. Mechanische Anschläge eignen sich zur Positionierung von Bauelementen

mit planen oder wenig gekrümmten Anschlagflächen.

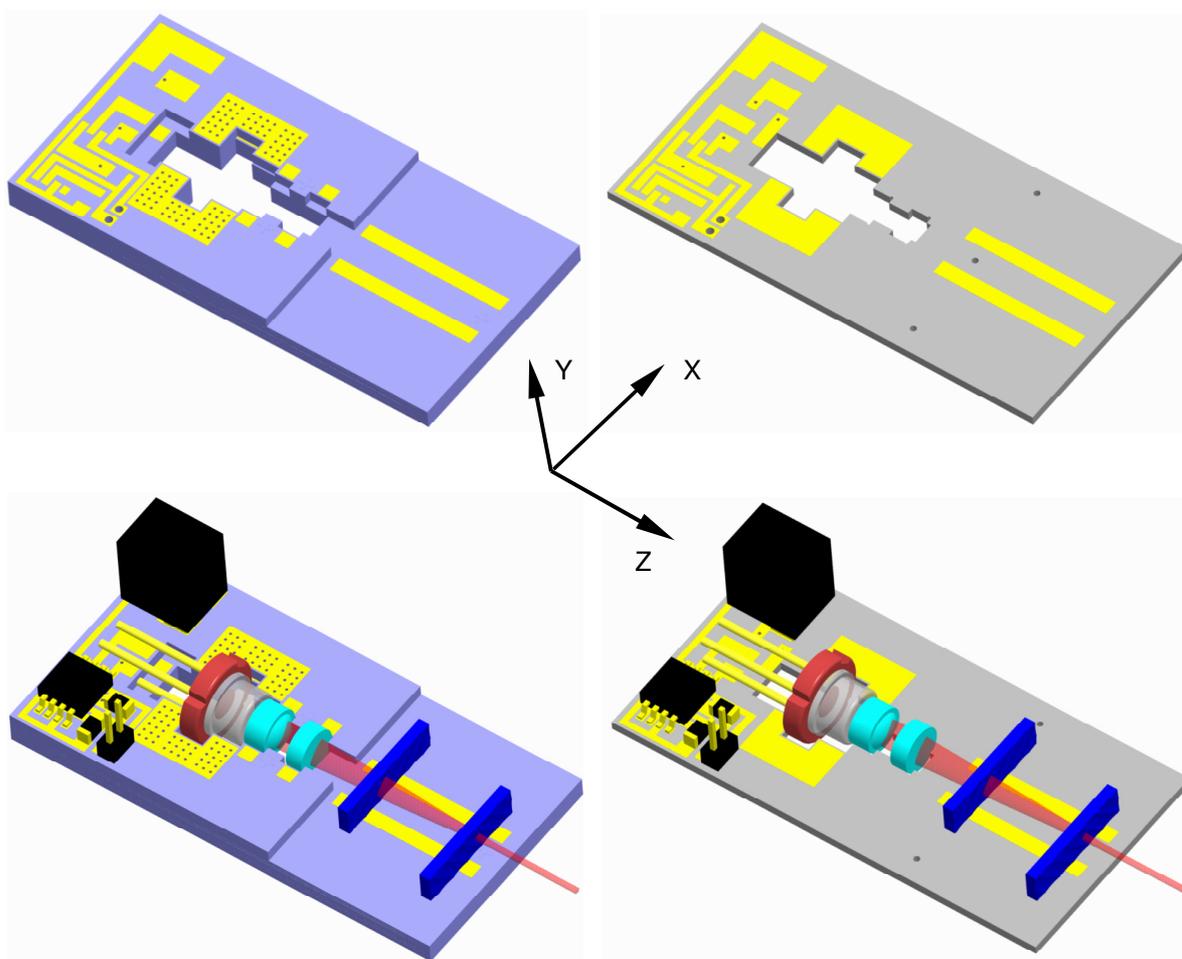
- *Anordnung von Anschlaggeometrien in gleichen Ebenen:* Dies gilt vor allem für die Mehrlagentechnologie, da hier bei in verschiedenen Ebenen angeordneten Strukturen zusätzliche Fehler durch die begrenzte Stapelgenauigkeit entstehen.

Darüber hinaus lässt sich die Strukturierung keramischer Substrate allerdings sehr vielfältig nutzen. Neben der Bereitstellung von Positionsmarken und Fügeflächen durch Dick- und Dünnschichttechnologien zählen hierzu besonders die Möglichkeiten der Erzeugung thermomechanischer Funktionselemente in Form von passiven Wärmeleitpfaden, die Strukturierung von Ausbrüchen und Kavitäten für mit dem Substratmaterial kollidierende Bauelement-Geometrien und die Erzeugung von Hilfsstrukturen wie Klebstofffallen. Letztere können besonders in der Mehrlagentechnologie an die Außenkontur der zu montierenden Bauelemente angepasst werden (z.B. durch Treppenstrukturen), was bei stoffschlüssigen Fügemedien wie Klebstoffen das notwendige zu applizierende Volumen verringert (siehe auch Kapitel 3).

## 2.4 Aufbaubeispiel Strahlkollimationsoptik

### 2.4.1 Konstruktive Auslegung der Systemplattform

Mit den Ergebnissen der theoretischen Analyse von möglichen Fassungsstrukturen in ebenen Keramiksubstraten kann die Auslegung der Systemplattform für die Strahlkollimationsoptik erfolgen. In Bild 35 sind die Entwürfe für ein LTCC-Substrat, bestehend aus 11 Einzelfolien mit einer Gesamtdicke von 2.2 mm (links) und ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrat mit einer Dicke von 0.635 mm (rechts) im jeweils unbestückten und bestückten Zustand dargestellt. Zur Fassung der optischen Bauelemente werden Referenzebenen, Auflagekanten und Anschlagkanten eingesetzt. Die optische Achse befindet sich 1 mm über der Substratebene. Im Bereich der Laserdiodenkontakte sind auf beiden Substraten AgPd-Leiterbahnen strukturiert, die in Verbindung mit bestückten SMD-Bauelementen die diskrete Schaltung zur Ansteuerung der Laserdiode aufnehmen. Weitere AgPd-Dickschichtmetallisierungen befinden sich im Bereich der Fügeflächen der Linsen (auf dem LTCC-Substrat) und der Zylinderlinsenarrays. Das LTCC-Substrat ist im Bereich der Laserdiode mit „Thermal-Vias“ versehen, um in späteren Varianten auch Laserdioden mit höherer Verlustleistung einsetzen zu können.



**Bild 35:** LTCC- (links) und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - (rechts) Substrat für die Strahlkollimationsbaugruppe im unbestückten (oben) und bestückten (unten) Zustand

Tabelle 8 und 9 fassen die Parameter der gewählten Fassungsstrukturen zusammen. Entsprechend der in Kapitel 1.3 vorgeschlagenen Montagestrategie für die Strahlkollimationsbaugruppe wird über mechanische Anschläge die Position von Kollimations- und Fokussierlinse bestimmt, wobei nach der Montage der Kollimationslinse zunächst die Laserdiode montiert und dabei unter Auswertung des Strahlprofils des kollimierten Bündels justiert wird, bevor die Fokussierlinse in der Fassung positioniert wird. Die Laserdiode erhält ausreichend großen Freiraum im Substrat (Kavität), um die Justierbewegung nicht einzuschränken. Die Zylinderlinsenarrays werden schließlich auf die Referenzebene der Substrate aufgesetzt und in X- und Z-Richtung justiert. Als Referenzebene X-Z wird die Oberseite der siebente Lage (bezüglich der Unterseite des Folienstapels als Bezugsebene beim Laminieren und Sintern) im insgesamt 11-lagigen Verbund des LTCC-Substrats vereinbart, beim  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrat hingegen die Substratoberfläche.

**Tabelle 8: Fassungsstrukturen für die Strahlkollimationsbaugruppe im LTCC-Substrat**

	Laserdiode	Kollimations-, Fokulinse	Zylinderlinsenarrays
Mech. Anschlag 1	-	Auflagekanten	Auflageebene
Ausführung			
Geometrische Parameter	Kavität	Auflagewinkel 41.81°, Kantenabstand 2.236 mm	15 µm AgPd, zwei Streifen
gespernte translatorische Freiheitsgrade	-	X, Y	Y
strukturiert in Folienlage Nr.	1 - 11	7 (Referenzebene)	7 (Referenzebene)
Strukturierung	Stanzen	Stanzen	Dickschicht
Positionsabweichung des Bauelements am mechanischen Anschlag (theoretisch)	-	Kollim.linse: $\Delta_Y = -76 \mu\text{m}$ ( $\delta_R = -50 \mu\text{m}$ ) Fokulinse: $\Delta_Y = \pm 22 \mu\text{m}$ ( $\delta_R = \pm 15 \mu\text{m}$ ) $\Delta_Y = -35 \mu\text{m}$ ( $R_K = 50 \mu\text{m}$ ) $\Delta_Y = \pm 11 \mu\text{m}$ ( $\delta_A = \pm 20 \mu\text{m}$ Stanzgenauigkeit und Sinterschrumpf)	$\Delta_Y = \pm 5 \mu\text{m}$
Mech. Anschlag 2		Anschlagebenen	
Ausführung, geometrische Parameter		Z-Abstand der Ebenen 2.65 mm	
gespernte translatorische Freiheitsgrade		Z	
strukturiert in Folienlage Nr.		8-11	
Strukturierung		Stanzen	
Lagetoleranz des Bauelements (theoretisch)		$\Delta_Z = \pm 10 \mu\text{m}$ (Stanzgenauigkeit) $\Delta_Z = \pm 8 \mu\text{m}$ (Sinterschrumpf)	

**Tabelle 9: Fassungsstrukturen für die Strahlkollimationsbaugruppe im Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substrat**

	Laserdiode	Kollimations-, Fokulinse	Zylinderlinsenarrays
Mech. Anschlag 1	-	Auflagekanten	Auflageebene
Ausführung			
Geometrische Parameter	Kavität	Auflagewinkel 41.81 °; Kantenabstand 2.236 mm	15 µm AgPd, zwei Streifen mit Dünnschicht Au (bondfähig)
gesperrte translatorische Freiheitsgrade	-	X, Y	Y
strukturiert in Folienlage Nr.	1	1 (Referenzebene)	1 (Referenzebene)
Strukturierung	Laserschneiden	Laserschneiden	Dickschicht
Lagetoleranz des Bauelements (theoretisch)	-	Kollim.linse: $\Delta_Y = -76 \mu\text{m}$ ( $\delta_R = -50 \mu\text{m}$ ) Fokulinse: $\Delta_Y = \pm 22 \mu\text{m}$ ( $\delta_R = \pm 15 \mu\text{m}$ ) $\Delta_Y = \pm 6 \mu\text{m}$ ( $\delta_A = \pm 10 \mu\text{m}$ Genauigkeit Laserschneiden)	$\Delta_Y = \pm 5 \mu\text{m}$
Mech. Anschlag 2		Anschlagebenen	
Ausführung, geometrische Parameter		Z-Abstand der Ebenen 2.65 mm	
gesperrte translatorische Freiheitsgrade		Z	
strukturiert in Folienlage Nr.		1	
Strukturierung		Laserschneiden	
Lagetoleranz des Bauelements (theoretisch)		$\Delta_Z = \pm 10 \mu\text{m}$ (Genauigkeit Laserschneiden)	

Für die Fertigung der LTCC-Substrate werden folgende Randbedingungen definiert:

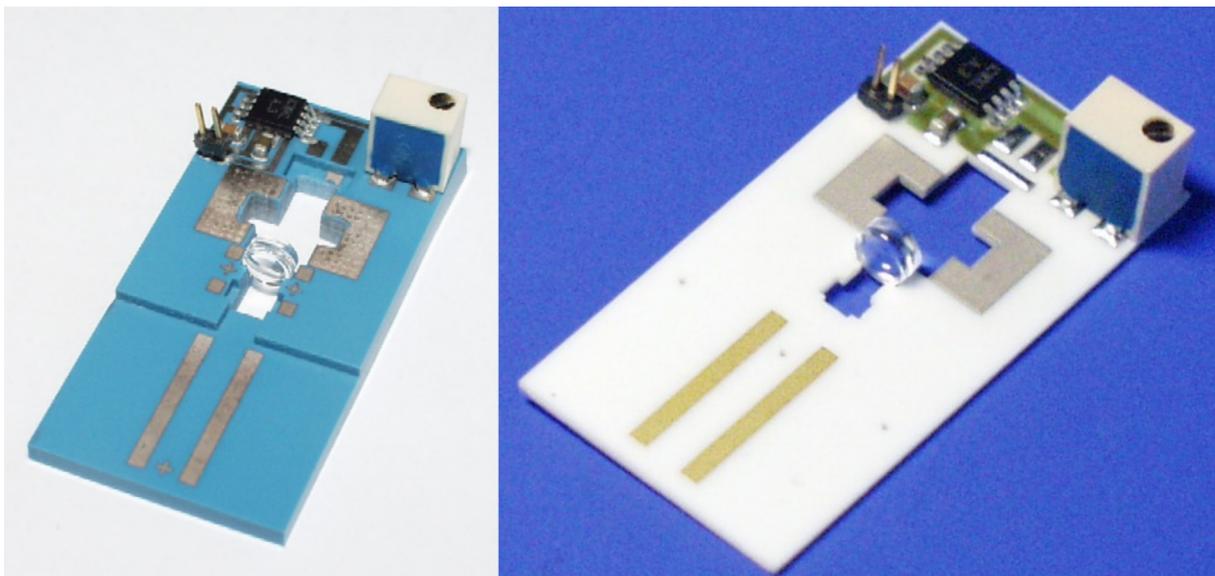
- Basismaterial ist das Grünfoliensystem DuPont DP 951, Nutzengröße 6x6“, Foliendicke 200  $\mu\text{m}$ .
- Die Vereinzelung des Nutzens erfolgt nach dem Sintern durch Sägen.
- Strukturierungsverfahren für die LTCC-Grünfolien sind Stanzen und Siebdruck.
- Das Stapeln der Grünfolien erfolgt mit mechanischen Aufnahmen ohne optische Kontrolle.
- Der Grünfolienstapel wird uniaxial laminiert.

Die Fertigung der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrate wird unter folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- Basismaterial ist 96 %iges  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in Plattenform, Nutzengröße 4x4“ mit einer Plattendicke von 0.635 mm.
- Die Vereinzelung des Nutzens erfolgt durch Anritzen mit dem Laser während der Strukturierung und anschließendes Brechen.
- Strukturierungsverfahren sind Laserschneiden und Siebdruck.

#### 2.4.2 Substratcharakterisierung und Bauelementevermessung

Entsprechend den Vorgaben aus Tabelle 8 und 9 in Lohnfertigung hergestellte und SMD-bestückte LTCC- und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrate sind in Bild 36 dargestellt.



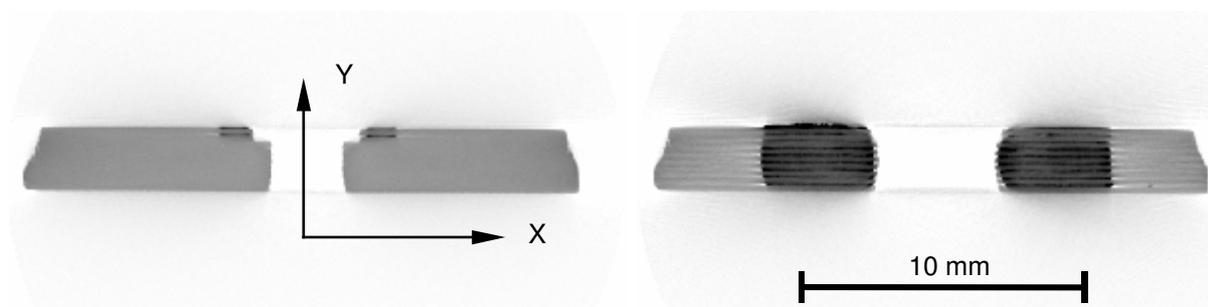
**Bild 36:** LTCC- (links) und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - (rechts) Substrat für die Strahlkollimationsbaugruppe

Die Substratcharakterisierung erfolgt durch eine visuelle Einschätzung des Substrat-

zustands einschließlich Prüfung der Schaltung zur Ansteuerung der Laserdiode, die Bestimmung der Substratebenheit und die Vermessung der Fassungsstrukturen. Die Mehrlagenstruktur im LTCC-Substrat wird darüber hinaus durch eine Röntgenfein-fokussmessung visualisiert.

#### a) Visuelle Beurteilung der Substratqualität

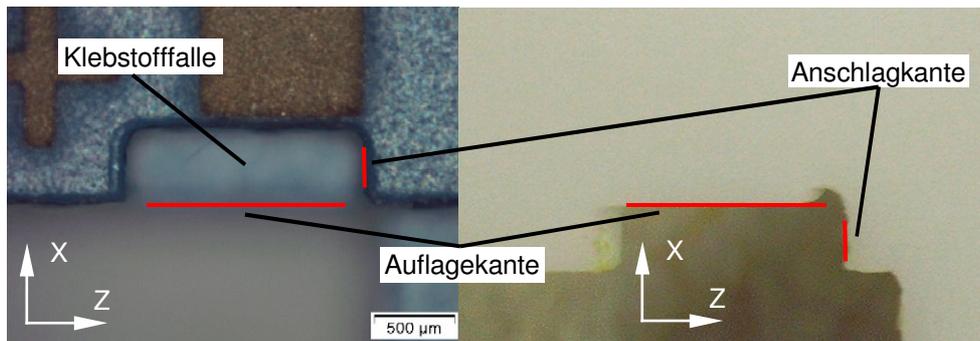
Die Qualität der insgesamt 10 gefertigten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrate entspricht den üblichen Anforderungen an Keramiksubstrate für Hybridbaugruppen der Elektronik. Bei den insgesamt sechs gefertigten LTCC-Substraten sind im Bereich der Kavität für die Laserdiode Deformationen zu beobachten, die den Justierbereich der Laserdiode einschränken. Als Ursache hierfür sind die in der Nähe der Kavität angeordneten „Thermal-Vias“ anzusehen, die mit den dazugehörigen Dickschicht-Metallisierungen als Wärmespreize dienen. Eine Analyse der Mehrlagenstruktur in diesem Bereich durch eine Mikrofokus-Röntgeninspektion [HAN-00], bei der die unterschiedliche Absorption von Röntgenstrahlung im Probenmaterial visualisiert wird, zeigt, dass die Verbindungsbildung der Mehrlagenstruktur beim Laminieren und Sintern durch den sehr hohen Metallanteil behindert wird. Durch den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von keramischen Grundmaterial und Dickschicht-Metallisierung führt das im Bereich der Wärmespreizen zu einer besonders ausgeprägten Deformation der Kavitätkontur, während die in den Dickschichtpasten enthaltenen Lösungsmittel die Stabilität der Grünfolien während des Laminierens und Sinterns beeinträchtigen. Die Verarbeitungshinweise der Grünfolienhersteller [DUP-02] empfehlen gleichmäßige und symmetrisch großflächige Metallisierungen. Die vorliegenden Ergebnisse legen zusätzlich den Schluss nahe, großflächige Metallisierungen in der Nähe von Fassungsstrukturen und Kavitäten zu vermeiden.



**Bild 37:** Röntgenfein-fokuss-Querschnitt durch ein LTCC-Substrat im Bereich der Auflagekanten für die Fokuslinse (links) und im Bereich der Laserdioden-Kavität (rechts)

Die Inspektion der Fassungsstrukturen mit dem Mikroskop zeigt typische Merkmale

wie in Bild 38 dargestellt. Bei den LTCC-Substraten ist die Verrundung konvexer Ecken, resultierend aus dem runden Stanzwerkzeug, deutlich sichtbar. Weniger deutlich tritt die Feinstruktur an geraden Kanten hervor, die sich aus dem Zusammensetzen der Kontur durch mehrere Stanzschritte ergibt. Nicht als Auflagekanten dienende Konvexstrukturen sind abgerundet, die Auflagekanten weisen einen Kantenradius von ca. 10  $\mu\text{m}$  bis 20  $\mu\text{m}$  auf.

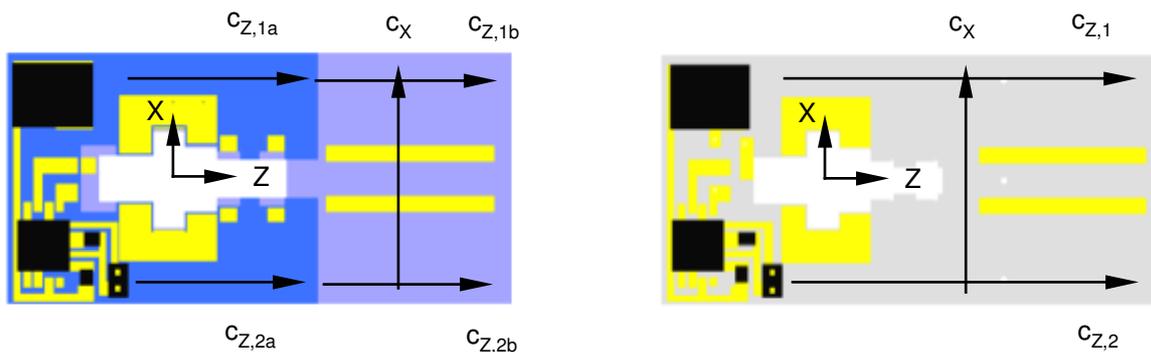


**Bild 38:** Fassungsstrukturen (rot) der Fokusslinse in LTCC (links) und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (rechts)

Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrate sind an den Auflagekanten und Anschlagflächen zum größten Teil sauber geschnitten, an nicht funktionsrelevanten Geometrien des Laserschnitts zeigt sich hingegen deutlich die Qualität nicht optimalen Schnittparameter.

b) Charakterisierung der Substratebenheit

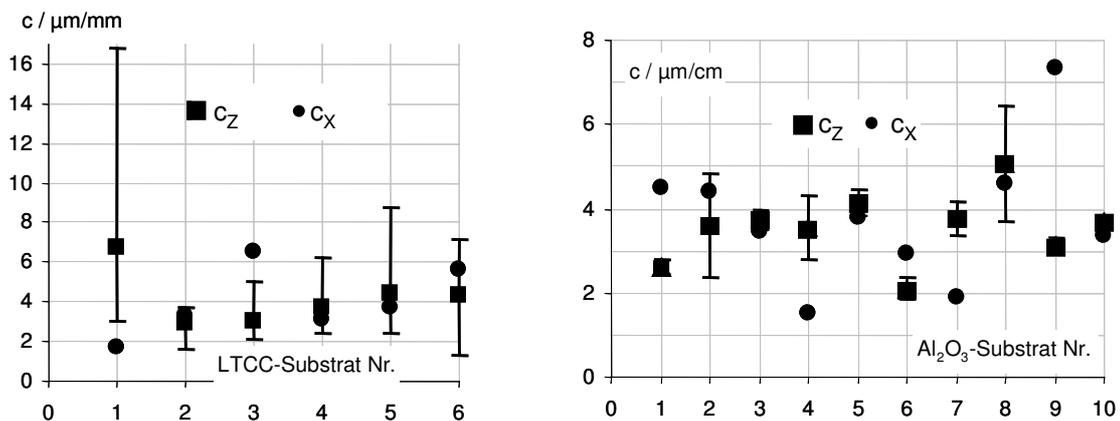
Zur Bestimmung der Ebenheit der Substrate kommt als taktiles Messgerät ein Tastschnittgerät „Talsurf 120L“ [TAY-98] zum Einsatz.



**Bild 39:** Lage der Verfahrstrecken zur taktilen Vermessung der Substratwelligkeit  $c$

Beim Tastschnitt wird die an einem Hebelarm aufgehängte Diamanttastspitze (Spitzenradius 2  $\mu\text{m}$ ) mit einer Andruckkraft von ca. 1 mN über die zu vermessende Fläche verfahren. Durch eine interferometrische Messung der Hebelauslenkung und sehr geringe Geradheitsabweichungen über der Verfahrstrecke erreicht dieses Gerät eine Auflösung von 12.8 nm und eine Reproduzierbarkeit von 0.05  $\mu\text{m}$  in Y-Richtung

bei einer Auflösung der Verfahrstrecke in X bzw. Z von 0.25  $\mu\text{m}$ . Als Kenngröße der Ebenheit bei einachsigen Messungen werden die normierte Welligkeit  $c$  sowie die Rauheit  $R_a$  ermittelt. Bild 39 zeigt die Anordnung der Messstrecken auf den Substraten, wobei zu beachten ist, dass die bereits bestückten SMD-Bauteile und die Fassungsstrukturen ein vollständiges Abtasten der Substratoberflächen einschränken. Die Messung der normierten Welligkeit  $c$  in Z-Richtung erfolgt deshalb auf vier (LTCC) bzw. zwei Teilstrecken (Bild 39), deren Ergebnis für jedes Substrat gemittelt wird. In der Zusammenfassung in Tabelle 10 sind darüber hinaus die Maxima und Minima, bezogen auf die vermessenen Teilstrecken, dargestellt. Bis auf eine Teilstrecke bei LTCC-Substrat 1 liegen die gemessenen Substratwelligkeiten ca. eine Größenordnung unter den von den Substratherstellern als maximal zulässig angegebenen Werten (Kapitel 2.2.1).



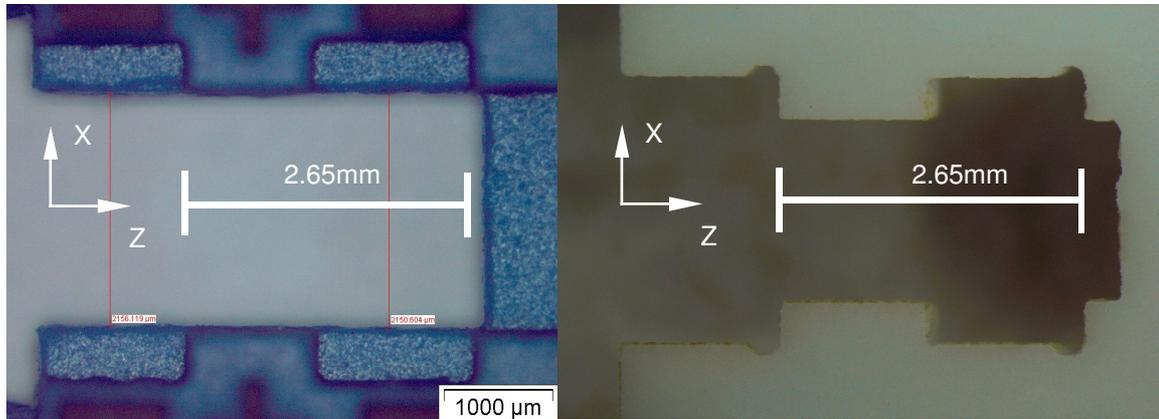
**Bild 40: Messung der Substratwelligkeit**

**Tabelle 10: Ergebnis Charakterisierung Substratwelligkeit**

	LTCC					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
	Messlänge	Probenzahl	Wert			Messlänge	Probenzahl	Wert		
			Min.	Mittelwert	Max.			Min.	Mittelwert	Max.
$c_z$	20.2 mm	6	1.3 $\mu\text{m/cm}$	<b>4.2</b> $\mu\text{m/cm}$	16.8 $\mu\text{m/cm}$	20.1 mm	10	1.8 $\mu\text{m/cm}$	<b>3.5</b> $\mu\text{m/cm}$	6.4 $\mu\text{m/cm}$
$c_x$	10.1 mm	6	1.7 $\mu\text{m/cm}$	<b>4.0</b> $\mu\text{m/cm}$	6.5 $\mu\text{m/cm}$	14.1 mm	10	1.5 $\mu\text{m/cm}$	<b>3.8</b> $\mu\text{m/cm}$	7.3 $\mu\text{m/cm}$
$R_a$	30.3 mm	6	0.3 $\mu\text{m}$	<b>0.33</b> $\mu\text{m}$	0.47 $\mu\text{m}$	34.1 mm	10	0.56 $\mu\text{m}$	<b>0.64</b> $\mu\text{m}$	0.7 $\mu\text{m}$

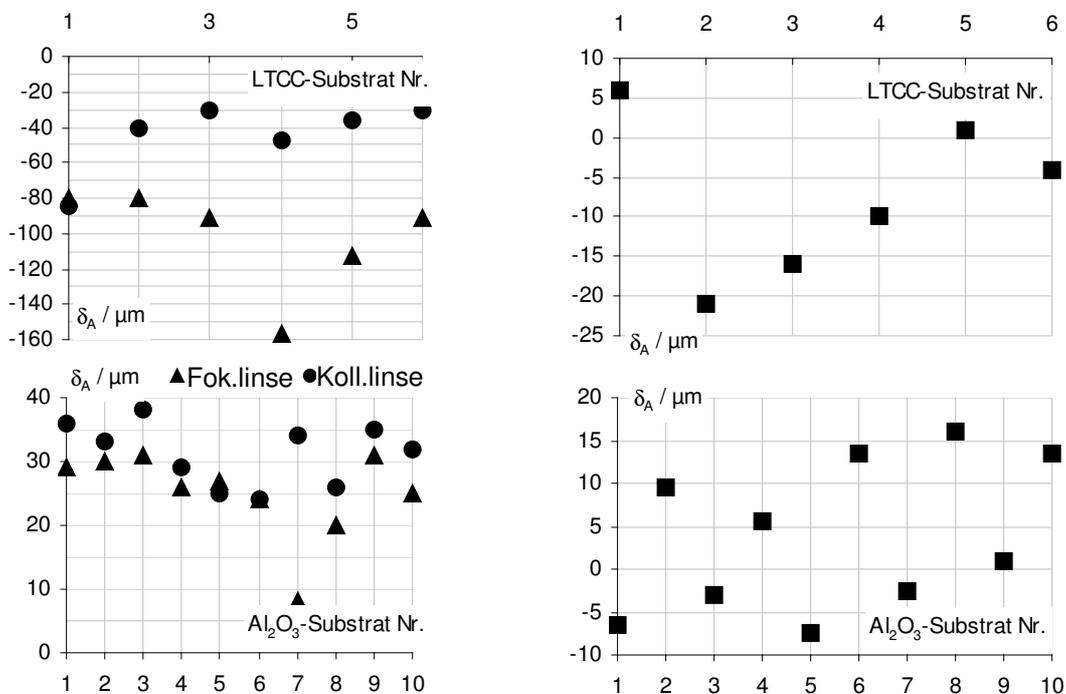
c) Charakterisierung der Fassungsstrukturen

Zur Charakterisierung der Fassungsstrukturen wurden die Abstände der Auflagekanten sowie der Anschlagenebenen für Kollimations- und Fokulinse mit einem Videomikroskop und angeschlossener Bildverarbeitung vermessen.



**Bild 41: Messbild LTCC (links) und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (rechts), 2.5fache Vergrößerung**

Aus der 2.5fachen Vergrößerung des Mikroskops resultiert eine rechnerische Pixelauflösung von 5.5 µm. Zur Abschätzung der Messgenauigkeit ist nach [NEU-96] im wesentlichen die Beurteilung der Antastunsicherheit und der Maßabweichung notwendig. Die Maßabweichung als Verkörperung systematischer Messfehler beschreibt dabei die Summe aus Fehlern des Maßstabsfaktors, der Verzeichnung des Objektivs und der Neigung zwischen Objekt- und Messebene.



**Bild 42: Abstandsmessung Auflagekanten (links), Anschlagenebenen (rechts)**

Bei der Kalibrierung des Mikroskops wurde die Messunsicherheit bezüglich der Maß-

abweichung in X- und Z-Richtung mit Hilfe von Glasmaßstäben zu  $\pm 0.5$  Pixel bestimmt. Im Gegensatz dazu beruht die Antastunsicherheit für das Messobjekt, die beim Positionieren des Fadenkreuzes im Messbild entsteht, vorwiegend auf Geradheitsabweichungen der anzutastenden Kanten und beträgt bis zu  $\pm 3$  Pixel (Bild 41).

**Tabelle 11: Charakterisierung der Fassungsstrukturen**

	LTCC					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
	Probenzahl	Wert				Probenzahl	Wert			
		Min.	Mittelwert	Max.	3 $\sigma$		Min.	Mittelwert	Max.	3 $\sigma$
$\delta_A$ Auflagekanten Kollimationslinse	6	-85 $\mu\text{m}$	<b>-45</b> $\mu\text{m}$	-30 $\mu\text{m}$	60 $\mu\text{m}$	10	24 $\mu\text{m}$	<b>31</b> $\mu\text{m}$	38 $\mu\text{m}$	21 $\mu\text{m}$
$\delta_A$ Auflagekanten Fokuslinse	6	-157 $\mu\text{m}$	<b>-102</b> $\mu\text{m}$	-80 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	10	8 $\mu\text{m}$	<b>23</b> $\mu\text{m}$	31 $\mu\text{m}$	18 $\mu\text{m}$
$\delta_A$ Anschlag-ebenen Linsen	6	-21 $\mu\text{m}$	<b>-7</b> $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	10	-8 $\mu\text{m}$	<b>4</b> $\mu\text{m}$	16 $\mu\text{m}$	27 $\mu\text{m}$

Das Ergebnis der Messungen mit dem Videomikroskop ist in Bild 42 dargestellt und in Tabelle 11 zusammengefasst. Die LTCC-Substrate zeigen neben der deutlichen Abweichung der Auflagekantenabstände vom Sollwert vor allem eine starke Schwankung der einzelnen Messwerte, die sich (unter Beachtung des Unsicherheitsfaktors der geringen Probenzahl) in der Standardabweichung ausdrückt und wesentlich schlechter ist als die Prognose der konstruktiven Auslegung (Tabelle 8). Die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substrate bestätigen die Genauigkeit des Strukturierungsverfahrens Laserschneiden, die Schwankungen um den Mittelwert der Abweichung vom Sollmaß bewegen sich im oberen Bereich der aus der Literatur bekannten Werte.

#### d) Bestimmung der Linsenabmessungen

Da die Linsen am Außendurchmesser gefasst werden, ist die Bestimmung der Radiustoleranz  $\delta_R$  notwendig (Tabelle 12), die jedoch keine Aussage über die Lage der optischen Achse in Bezug auf den Außendurchmesser liefert. Der Linsendurchmesser wird über eine taktile Antastung der Umfangsfläche mit einer hochauflösenden (1  $\mu\text{m}$ ) induktiven Bügelmessschraube ermittelt.

**Tabelle 12: Charakterisierung der Linsenradiustoleranz  $\delta_R$** 

	Kollimationslinse	Fokuslinse
Probenanzahl	11	20
Mittelwert $\delta_R$	2.6 $\mu\text{m}$	-3.2 $\mu\text{m}$
$3\sigma$	5.4 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$
Minimum	-0.7 $\mu\text{m}$	-7 $\mu\text{m}$
Maximum	5.2 $\mu\text{m}$	0.0 $\mu\text{m}$

Die bei der Substrat- und Bauelementecharakterisierung ermittelten Geometrietoleranzen sind in Tabelle 13 den theoretisch erwarteten Werten (Kapitel 1.3 und 2.3) zusammenfassend gegenübergestellt.

**Tabelle 13: Gegenüberstellung theoretischer und gemessener Fassungstoleranzen**

	LTCC		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	Theoretisch	Real	Theoretisch	Real
$\delta_A$ Auflagekanten Kollimationslinse	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 60 \mu\text{m}$ ( $3\sigma$ )	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 21 \mu\text{m}$ ( $3\sigma$ )
$\delta_A$ Auflagekanten Fokuslinse	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 90 \mu\text{m}$ ( $3\sigma$ )	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 18 \mu\text{m}$ ( $3\sigma$ )
$\delta_A$ Anschlagenebenen Linsen	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 30 \mu\text{m}$ ( $3\sigma$ )	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 27 \mu\text{m}$ ( $3\sigma$ )
$\delta_R$ Kollimationslinse	$\pm 15 \mu\text{m}$	$\pm 5.4 \mu\text{m}$ ( $3\sigma$ )	$\pm 15 \mu\text{m}$	$\pm 5.4 \mu\text{m}$ ( $3\sigma$ )
$\delta_R$ Fokuslinse	-50 $\mu\text{m}$ (maximal)	-7 $\mu\text{m}$ (maximal)	-50 $\mu\text{m}$ (maximal)	-7 $\mu\text{m}$ (maximal)
$C_Z$ ( $\delta_Y$ Zylinderlinsenarrays)	40 $\mu\text{m}/\text{cm}$	4.2 $\mu\text{m}/\text{cm}$	40 $\mu\text{m}/\text{cm}$	3.5 $\mu\text{m}/\text{cm}$

Die teilweise um eine Größenordnung unter den erwarteten Toleranzen liegenden Werte (Welligkeit) können dem Prototypencharakter der gefertigten Substrate und der sorgfältigen Auswahl des Rohmaterials zugeordnet werden. Die hohen Abweichungen beim Abstand der Auflagekanten resultieren aus Sicht der Substrathersteller aus den ungewöhnlichen Geometrieforderungen und können mit besserer Prozessbeherrschung der Strukturierung verringert werden. Ein Fortschritt bei der starken Toleranzschwankung der LTCC-Substrate ist dagegen nur durch ein besseres Verständnis und eine modellbasierte Optimierung der gesamten Prozesskette zu erwarten.

### 3. Montage hybrid-optischer Systeme auf ebenen Keramiksubstraten

Wie in Kapitel 1.1 bereits ausgeführt, umfasst die Montage hybrider Systeme das definierte Bereitstellen der Bauelemente für den Montageprozess, deren Handhabung, das Positionieren bzw. Justieren der Bauelemente am Ort der Montage und schließlich die Fixierung durch ein geeignetes Fügeverfahren. Ziel des Montageprozesses ist es, die Bauelementeposition innerhalb einer Baugruppe mit einer ausreichenden Genauigkeit herzustellen und zu fixieren. Der dabei entstehende Aufwand macht, wie bereits erwähnt, unter Umständen den größten Teil der Produktkosten aus.

Es wird daher angestrebt, unter Beachtung aller Randbedingungen diesen Aufwand zu minimieren. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten keramischen Systemplattformen tragen dazu bei, indem diese:

- integrierte mechanische Strukturen zum unmittelbaren Fassen und Positionieren optischer Bauelemente bereitstellen, so das zusätzliche Montageschritte, wie sie beim Einsatz mittelbarer Fassungen notwendig sind, entfallen können,
- hybride Elektronikbaugruppen direkt auf der Systemplattform integrieren und so die In-Situ-Ansteuerung optoelektronischer Bauelemente ermöglichen, um deren Signal zur Justierung zu nutzen bzw. deren Funktion zu prüfen.

Aufgrund der Ähnlichkeit von keramischen Systemplattformen mit Leiterplatten aus der Elektronikfertigung ist es naheliegend, dort eingeführte Montagetechnologien wie das „Pick & Place“ auch bei der Montage hybrider optoelektronischer Systeme zu nutzen. Der Begriff des „Pick&Place“ beschreibt dabei eine Teilmenge der Montagetechnologien hybrider Elektronikbaugruppen und hat sich in der Leiterplattenbestückung etabliert als die Bezeichnung der Aufnahme von elektronischen Bauelementen aus Magazinen („Pick“) und deren Positionierung („Place“) am Montageort [HAR-99, HAR-02]. Resultierend aus zumeist flächenförmigen Bauelementen wie SMD-Bauteilen oder auch Nacktchips („Bare-Die“) kommen bei der Handhabung Vakuumbreifer zum Einsatz. Die Positionierung der Bauelemente erfolgt in den vier durch die Leiterplatte vorgegebenen Freiheitsgraden mit der Genauigkeit der Positioniersysteme, die beim vollautomatischen Bestücken  $\pm 30\mu\text{m}$  [SIE-04] und in Sonderfällen auch  $\pm 1\mu\text{m}$  [FIN-04] Genauigkeit erreichen.

### 3.1 Besonderheiten bei der Montage optischer Bauelemente

Bei der Montage optoelektronischer Bauelemente auf ebenen Systemplattformen sind im Vergleich zum standardmäßigen „Pick&Place“ folgende Besonderheiten zu beachten, die die Entwicklung speziell angepasster Vorrichtungen und Technologien erforderlich machen:

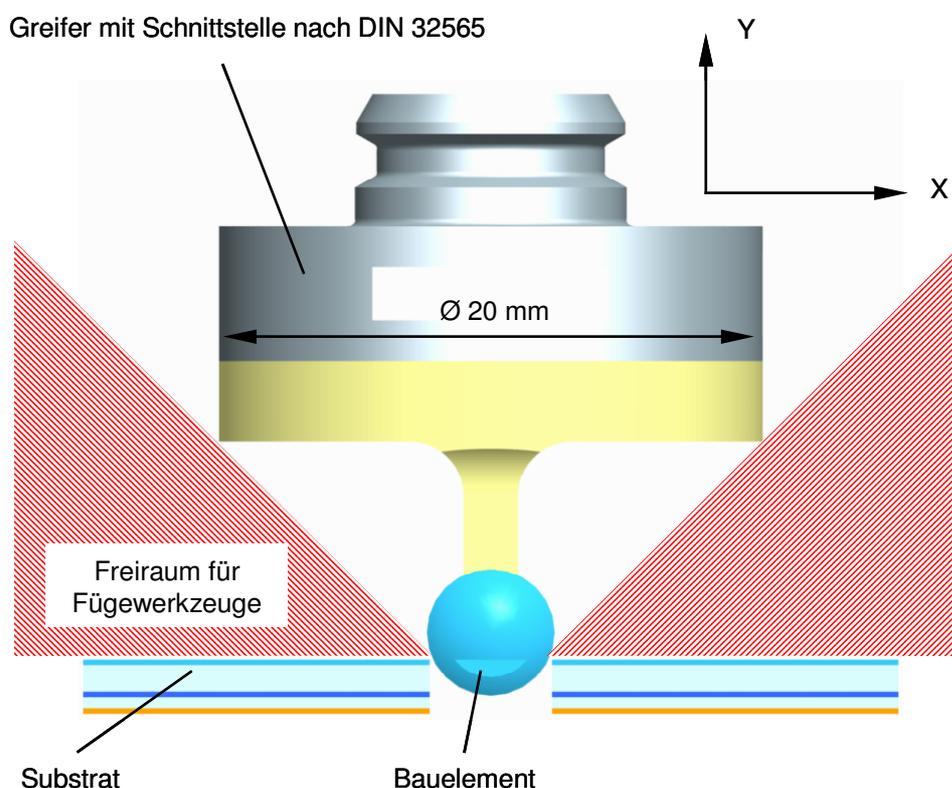
- Optische Bauelemente weisen Funktionsflächen auf, die empfindlich gegenüber Verschmutzung und mechanischer Beanspruchung sind. Die Bereitstellung der Bauelemente muss daher in Magazinen erfolgen, die Funktionsflächen nicht beschädigen, leicht zu reinigen sind und keine Kontaminationen verursachen. Als Material für solche Magazine kommen ausgasungsarme Kunststoffe wie PEEK oder spanbar und gratfrei bearbeitbare Keramiken wie Macor® in Frage.
- Die Vielzahl von Grundformen optischer Bauelemente (Rundoptiken, Planoptiken, Sonderbauformen) macht die Verwendung angepasster Wirkelemente am Handhabungswerkzeug erforderlich. Im Gegensatz zu Vakuumgreifern in der Baugruppenbestückung der Elektronikfertigung, die sich meist für ganze Bauteilspektren eignen, sind bei der Optikmontage für nahezu jedes Bauelement spezielle Wirkgeometrien zu entwickeln. Die konstruktive Gestaltung der Schnittstelle zwischen Greifer und Montagevorrichtung sollte sich an bestehenden Normen und Standards wie der [DIN 32565] orientieren, um ein schnelles und präzises Auswechseln der Handhabungswerkzeuge zu gewährleisten.
- Die Positionierung bzw. Justierung optischer Bauelemente kann in bis zu sechs Freiheitsgraden erfolgen. Bei toleranzkritischen Systemen, z.B. der Einkopplung von Signalen in Singlemode-Fasern, sind dabei kleinste Justierschrittweiten von bis zu 100 nm [SIE-00] erforderlich. Für die markengeregelte Justierung ist eine Beobachtbarkeit der Bauelemente am Montageort zu gewährleisten, während bei der Justierung mit Hilfe der optische Funktion des optischen Bauelements dessen Apertur nicht durch Handhabungs- oder Fügwerkzeuge verdeckt werden darf.
- Im Gegensatz zum „Pick&Place“, wo nach dem Absetzen des Bauelements der Greifer gelöst und die Bauelementeposition bis zum eigentlichen Fügevorgang durch Hilfsstoffe (Klebstoff) oder das Fügematerial selbst (Lotpaste) gehalten wird, muss bei der Montage optischer Bauelemente die Position des Bauelements unmittelbar nach dem Positionieren bzw. Justieren fixiert werden. Die zum Ein-

satz kommende Füge­technologie darf die Bauelemente­position mög­lichst nicht beein­flussen bzw. muss dieser Ein­fluss so repro­duzierbar sein, dass vorab eine Kom­pen­sa­tion er­fol­gen kann. In Aus­nah­me­fäl­len und be­son­ders bei ex­tre­men An­for­de­run­gen an die Ge­nau­ig­keit der Bauelemente­position ist auch ein Justieren nach dem Fügen mög­lich .

Die fol­gen­den Kapitel zeigen, wie diese An­for­de­run­gen bei der Ent­wick­lung von Tech­nolo­gien und Vor­rich­tun­gen für die Mont­age der Strahl­kol­li­ma­tions­optik auf ke­ra­mischen Sys­tem­plat­for­men beachtet wer­den und zu wel­chen Er­geb­nis­sen dies führt. Die Aus­füh­run­gen be­sch­rän­ken sich auf den Auf­bau von fünf Dem­on­stra­toren auf den in Kapitel 2.4.2 e­va­luierten LTCC-Sub­stra­ten, da hier der Zu­sam­men­hang zwi­schen den Ge­nau­ig­keiten der Sub­stra­te­ge­o­met­rien und dem Mont­age­er­geb­nis be­son­ders deut­lich wird. Die Mont­age der Strahl­kol­li­ma­tions­optik auf den eben­falls in Kapitel 2.4.2 e­va­luierten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Sub­stra­ten er­folgt analog.

### 3.2 Handhabung optoelektronischer Bauelemente

Auf­grund der Eben­heit der Sys­tem­plat­form und der im Sub­stra­te ein­ge­bet­te­ten Fas­sungs­struk­tu­ren stehen für die Hand­habung der zu montieren­den optischen Kom­po­nen­ten nur be­grenzt Hand­habungs­flä­chen zur Ver­fü­gung (Bild 43).



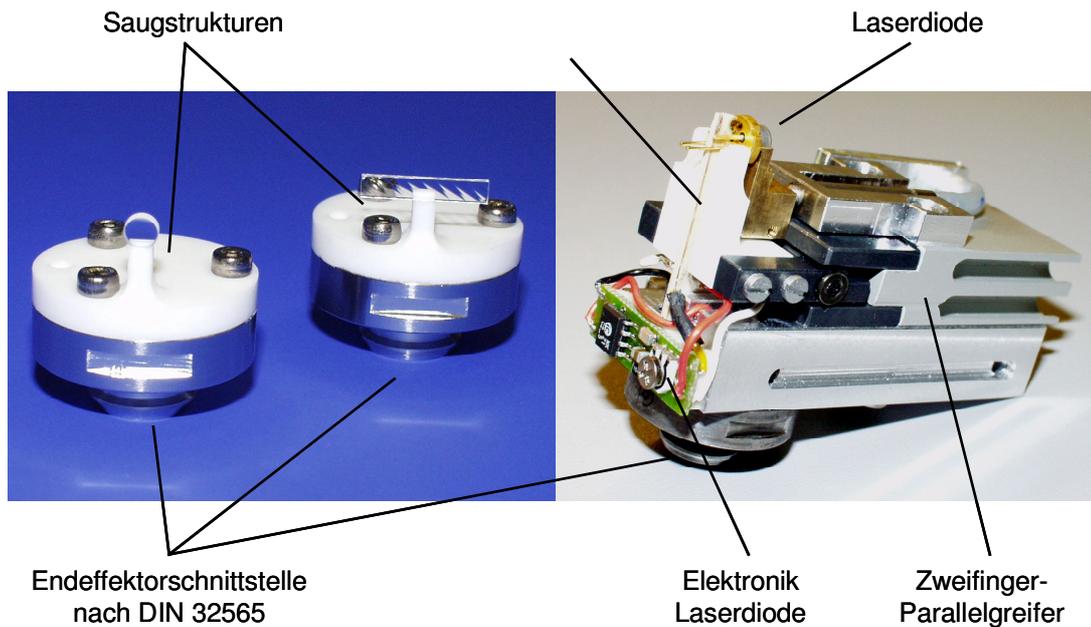
**Bild 43: Besonderheiten der Handhabung am Beispiel der Strahlkollimationsoptik**

Für die Montage der Strahlkollimationsoptik sind insgesamt drei verschiedene, speziell für diese Baugruppe entwickelte Greifer erforderlich. Für die rundoptischen Bauelemente (Kollimations- und Fokuslinse) kommt ein Vakuumgreifer mit am Außenumfang der Linsen ansetzender Wirkgeometrie zum Einsatz. Bei dem zweiten Vakuumgreifer für die Zylinderlinsenarrays ist lediglich die Wirkgeometrie an die nun ebene Handhabungsfläche der planoptischen Bauelemente angepasst. Beide Greifer sind aus der spanend bearbeitbaren Keramik Macor<sup>®</sup> gefertigt. Der dritte Greifer ist ein mechanischer Zweifinger-Parallelgreifer zur Handhabung der Laserdiode. Dieser greift die Laserdiode an ihren Kontaktstiften, die Referenzierung erfolgt durch das Anlegen der Greiferbacken an die Rückwand des TO-Gehäuses der Laserdiode. In die Wirkelemente des Greifers, die Greiferbacken, sind elektrisch leitende Strukturen zur Kontaktierung der Diode integriert. Eine miniaturisierte Leiterplatte mit der Schaltung zur temporären Ansteuerung der Laserdiode während deren Justierung befindet sich ebenfalls auf dem Greifer (Bild 44). Tabelle 14 stellt in einer Übersicht die verwendeten Greifprinzipien und -parameter dar.

**Tabelle 14: Handhabungswerkzeuge zur Montage der Strahlkollimationsoptik**

	Greifer Linsen	Greifer Arrays	Greifer Laserdiode
Greifprinzip	Vakuum	Vakuum	Zangengreifer
Greiffläche	0.72 mm <sup>2</sup>	0.72 mm <sup>2</sup>	-
Greifkraft	max. 60 mN bei 85 kPa	max. 60 mN bei 85 kPa	max. 6 N bei 0.5 MPa

Die drei Greifer sind mit einer einheitlichen Schnittstelle zum Positioniersystem ausgestattet. Diese dient als „Schnittstelle zwischen Endeffektor und Handhabungsgerät“ [DIN 32565] dem flexiblen Einwechseln verschiedener Greifer und Greifersysteme an einer Montagevorrichtung. Neben einer kombinierten Axial- und Lateralverspannung, die abhängig von der Präzision der Fertigung Einwechselgenauigkeiten < 10 µm ermöglicht, stellt diese Schnittstelle auch eine zentrale Mittenbohrung zum optionalen Beobachten des gegriffenen Bauelements durch die Schnittstelle hindurch zur Verfügung. Weiterhin sind fluidische und elektrische Durchführungen vorhanden. Diese werden bei den Greifern zur Montage der Strahlkollimationsoptik genutzt, um die Vakuumgreifer mit Unterdruck, den Laserdiodengreifer mit Überdruck und die Ansteuerelektronik auf dem Laserdiodengreifer mit der Betriebsspannung zu versorgen.



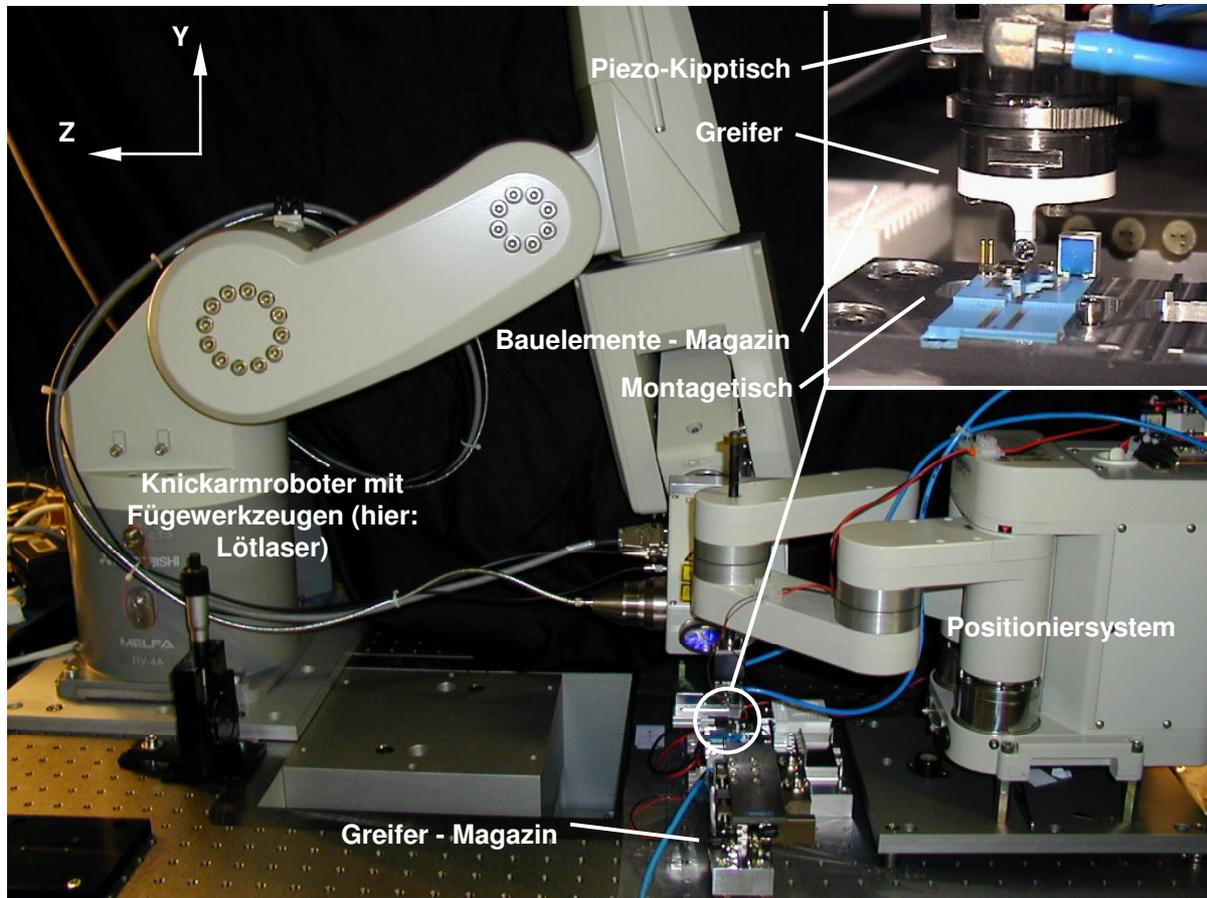
**Bild 44:** Links: Vakuumbreifer für rund- und planoptische Bauelemente, Rechts: Zangen- greifer mit Kontakten für Laserdioden im TO-18-Gehäuse

### 3.3 Positionier- und Justiertechnologien

Zentrales Element einer Montageumgebung ist das verwendete Positioniersystem. Beim Aufbau der Strahlkollimationsoptik kommt dafür ein „Scara“-Roboter RP1-AH [MIT-02] zum Einsatz (Bild 45). Dieses Positioniersystem verfügt über einen Arbeitsraum von ca. 210 mm x 140 mm x 30 mm, in dem es mit einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  in X und Z,  $\pm 10 \mu\text{m}$  in Y (Schrittauflösung jeweils  $1 \mu\text{m}$ ) sowie  $\pm 350 \mu\text{rad}$  in rotZ (Schrittauflösung  $20 \mu\text{rad}$ ) positioniert. Zur Vervollständigung der sechs Freiheitsgrade, die allerdings für die Montage der Strahlkollimationsoptik nicht unbedingt benötigt werden, ist am Werkzeugkopf des Positioniersystems ein piezoelektrisch angetriebener Kipptisch befestigt (Bild 45, vergrößerter Ausschnitt), der in einem Bereich von  $\pm 2.5 \text{ mrad}$  in rotX und rotY mit einer Auflösung von  $0.5 \mu\text{rad}$  positioniert. An diesem Kipptisch befindet sich die Schnittstelle nach DIN 32565 zur Aufnahme der verschiedenen, für die einzelnen Montageschritte notwendigen Greifer. Ein weiteres Positioniersystem, der Knickarmroboter RV-4A [MIT-04], wird im Rahmen der Montage zur flexiblen Manipulation der Fügwerkzeuge (Kapitel 3.4) eingesetzt, die durch den Roboter mit einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 30 \mu\text{m}$  im Montageraum positioniert werden können.

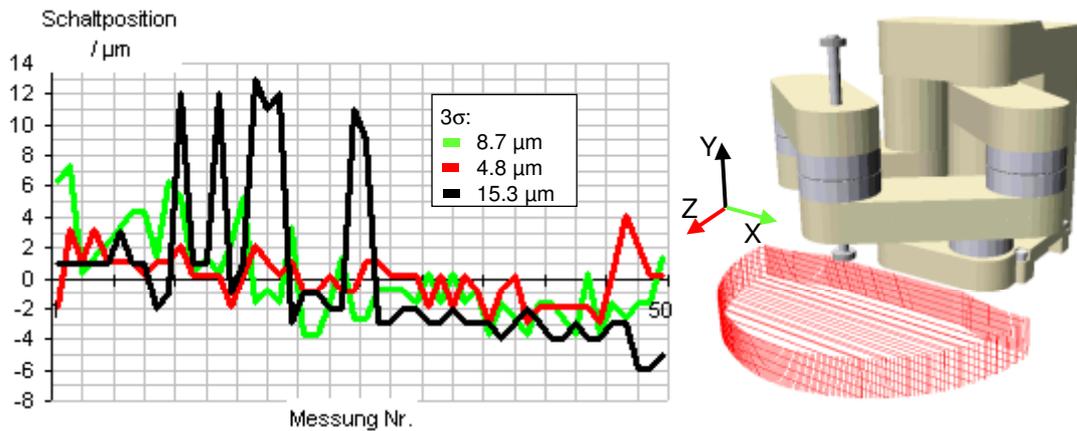
Während der Montage wird das Profil des Ausgangsstrahls der Strahlkollimationsbaugruppe als Messsignal für die Justierung von einer CCD-Kamera (Pixelauflösung

6.7  $\mu\text{m}$ ) aufgenommen, die in einer Entfernung von ca. 1500 mm (Fernfeld) und 80 mm angeordnet werden kann. Magazine für die Greifer und die einzelnen Bauelemente sowie ein Montagetisch mit Referenzkanten zur definierten Aufnahme der keramischen Systemplattformen vervollständigen die Montageumgebung.



**Bild 45: Montageumgebung für die Strahlkollimationsoptik**

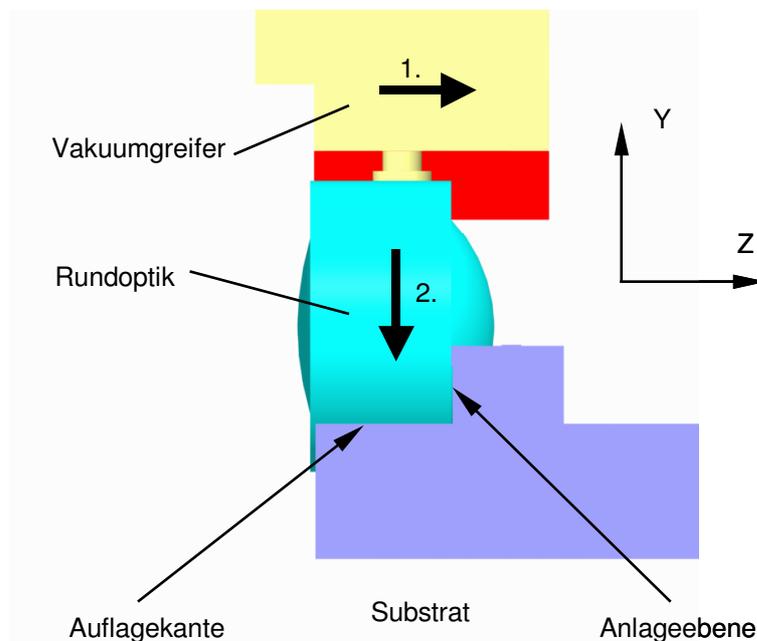
Das Ergebnis der Überprüfung der translatorischen Wiederholgenauigkeit des „Scara“-Roboters RP-1AH ist in Bild 46 dargestellt. Für diese Messung wird ein Präzisionsschalter mit einer Schaltgenauigkeit von  $\pm 1 \mu\text{m}$  [BAU-04] jeweils in X, Y und Z wiederholt angefahren und die Position im Schaltpunkt ermittelt. Die Platzierung des Präzisionsschalters erfolgt prinzipiell beliebig im Arbeitsraum, im vorliegenden Fall aber in etwa an der Stelle, an der der Roboter während der Montage die Bauelemente positioniert. Die in 50 Messzyklen tatsächlich ermittelte Wiederholgenauigkeit des Positioniersystems RP-1AH beträgt bei  $3\sigma$   $\pm 8.7 \mu\text{m}$  in X,  $\pm 4.8 \mu\text{m}$  in Z sowie  $\pm 15.3 \mu\text{m}$  in Y und entspricht damit in etwa den Spezifikationen des Herstellers. In Verbindung mit dem kleinsten Schritt von  $1 \mu\text{m}$  kann das System daher für die folgenden Positionier- und Justieraufgaben eingesetzt werden:



**Bild 46:** Wiederholgenauigkeit des Positioniersystems RP-1AH (links), Arbeitsraum (rechts)

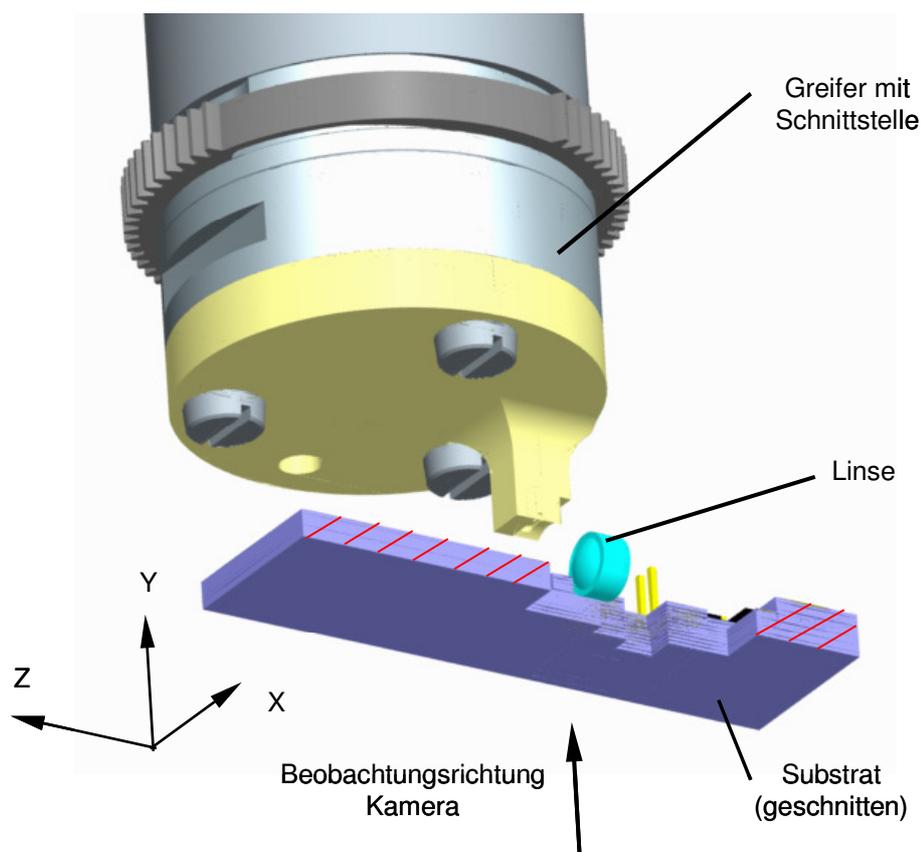
a) Positionieren gegen Anschläge

Die beiden Rundoptiken, Kollimations- und Fokusslinse, werden bei der Montage der Strahlkollimationsoptik sowohl axial als auch lateral gegen Anschläge positioniert. Dies ist möglich, da die Kollimationslinse (Montageschritt 1) das Bezugskordinatensystem bereitstellt und somit als Referenz für die Montage aller weiteren Bauelemente dient und die Fokusslinse (Montageschritt 3) laut Optikdesign mit einer Genauigkeit von  $\pm 50 \mu\text{m}$  bezüglich der Kollimationslinse positioniert werden muss. Bild 47 zeigt den Ablauf der Positionierung, bei der die jeweilige Linse zunächst grob vorpositioniert und anschließend im ersten Schritt gegen den axialen Anschlag angelegt wird.



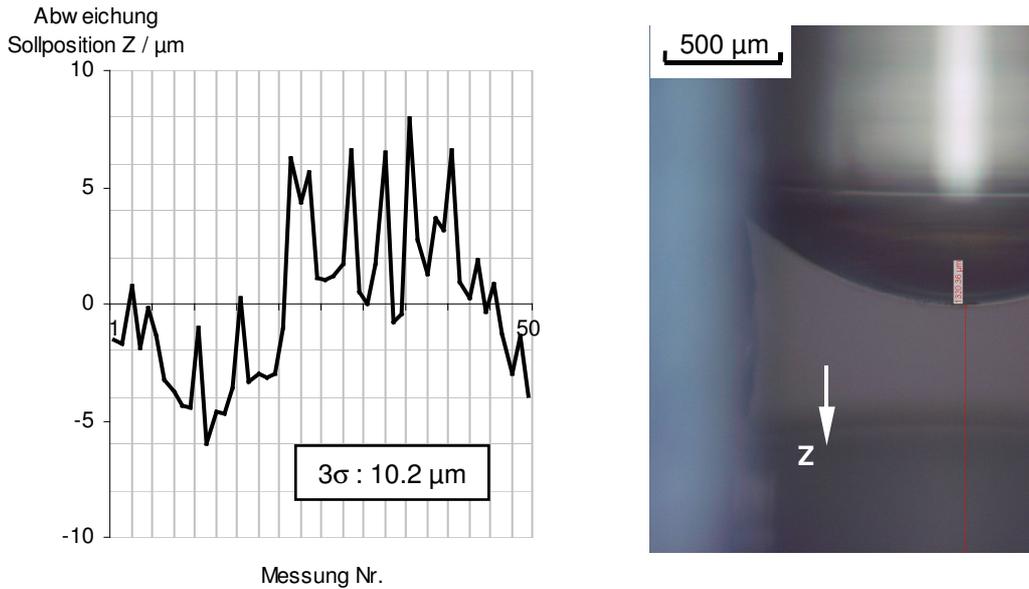
**Bild 47:** Positionieren einer Rundoptik gegen Anschläge (1.: Axiales Anlegen, 2.: Laterales Auflegen)

Die Verringerung der Haltekraft des Greifers auf den gerade notwendigen Betrag zur Kompensation der Gewichtskraft der Linse (0.3 mN) führt während des Anlegens dazu, dass die Linse im Moment des Anlegens an den Anschlag im Greifer nachgeben kann. Der Greifer selbst wird durch das Positioniersystem um einen bestimmten Betrag über den Sollwert in Z hinaus positioniert, um für alle möglichen axialen Abweichungen der Anschläge ein sicheres Anlegen des Bauelements zu gewährleisten. Im zweiten Schritt wird dann die Greifkraft abgeschaltet und die Linse fällt aufgrund der Gewichtskraft auf die lateralen Anschlagkanten.



**Bild 48: Prinzipschema zur Bestimmung der Genauigkeit beim Positionieren gegen einen axialen Anschlag**

Das Verfahren zur Überprüfung der axialen Genauigkeit dieser Art der Positionierung ist in Bild 48 dargestellt. Durch die Kavität eines LTCC-Substrat hindurch wird mittels einer Kamera mit Mikroskopobjektiv die Z-Position der vom Greifer in die Fassungsstruktur eingesetzten Linse beobachtet und über eine bildverarbeitungsgestützte Kantenanastung vermessen. Diese erreicht in Verbindung mit ca. 1  $\mu\text{m}$  Pixelauflösung der Beobachtungsoptik eine Genauigkeit im Subpixelbereich. Das Ergebnis eines Zyklus von 50 Positioniervorgängen zeigen Bild 49 und Tabelle 15.



**Bild 49: Genauigkeit der Positionierung einer Rundoptik gegen einen axialen Anschlag**

Dieses Resultat bestätigt in seiner Größenordnung auch die Ergebnisse anderer Untersuchungen [SCH-01], wonach beim Positionieren gegen mechanische Anschläge Genauigkeiten von  $\pm 10 \mu\text{m}$  erreichbar sind, wobei allerdings die Genauigkeit der Anschläge zusätzlich beachtet werden muss.

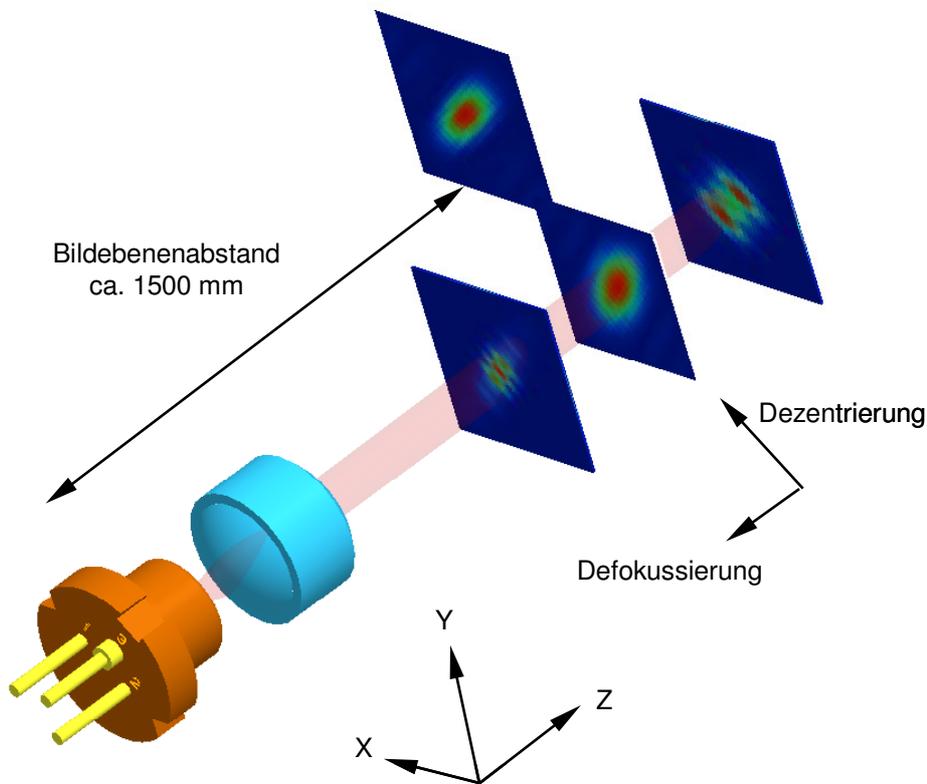
**Tabelle 15: Ergebnisse der Positionierung einer Rundoptik gegen einen axialen Anschlag, auf Mittelwert Null normiert**

	Kollimationslinse
Anzahl der Messungen	50
Mittelwert (normiert)	0 $\mu\text{m}$
3 $\sigma$	10.2 $\mu\text{m}$
Minimum	-6 $\mu\text{m}$
Maximum	8 $\mu\text{m}$

b) Justieren mit Hilfe der optischen Funktion

Werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Position eines Bauelements innerhalb einer Baugruppe gestellt (bei optischen Systemen im Bereich  $< 10 \mu\text{m}$  bis  $20 \mu\text{m}$ ), sind Justierprozesse in der Regel nicht zu vermeiden. Bei der Montage der Strahlkollimationsoptik wird, nachdem die Kollimationslinse als Bezugselement auf der keramischen Systemplattform montiert ist, zunächst die Laserdiode axial und

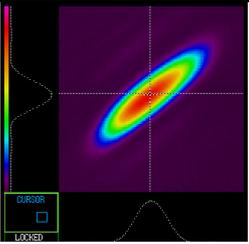
lateral zu dieser ausgerichtet (Montageschritt 2). Messglied innerhalb des geschlossenen Justierregelkreises ist eine das Strahlprofil aufnehmende CCD-Kamera (Pixelauflösung  $10\ \mu\text{m}$ ), die bei der Justierung der Laserdiode im Fernfeld in einem Abstand von ca. 1500 mm angeordnet ist. Die im Laserdiodengreifer befindliche und durch dessen Greifmechanismus vorausgerichtete Laserdiode wird dazu elektrisch angesteuert und das kollimierte, elliptische Bündel in der Kamera aufgenommen. Die Toleranzrechnung des Optikdesign (Tabelle 2) deutet auf eine besondere Empfindlichkeit der axialen Positionierung hin. Bild 50 zeigt, wie sich eine axiale (Defokussierung) bzw. laterale (Dezentrierung) Fehlpositionierung der Laserdiode auswirkt.



**Bild 50:** Justierung der Laserdiode (nicht maßstabsgerecht). Zur Veranschaulichung ist die Wirkung einer Defokussierung von  $\pm 10\ \mu\text{m}$  in verschiedenen Bildebenen dargestellt. Die Strahlprofile der Dezentrierung entsprechen einer Fehlpositionierung der Laserdiode von ca.  $100\ \mu\text{m}$  in // und  $150\ \mu\text{m}$  in  $\perp$ .

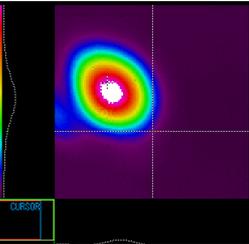
Die Justierung der Laserdiode erfolgt über die Beurteilung des Profils des kollimierten Strahls, wobei ein gaussförmiges Intensitätsprofil in // und  $\perp$  ohne Abberationen angestrebt wird. Tabelle 17 fasst die Ergebnisse der Laserdioden-Justierung *vor dem Fügen* bei der Montage von insgesamt fünf Strahlkollimationsoptiken zusammen. An dieser Stelle sind Abweichungen vom Sollwert noch unvermeidlich, da die Toleranzen der Divergenzwinkel  $\theta_{\perp}$  und  $\theta_{//}$ , die erst bei der Montage der Zylinderlinsenarrays kompensiert werden, das Ergebnis direkt beeinflussen.

**Tabelle 17: Ergebnis der Laserdioden-Justierung nach optischer Funktion (Kollimation)**

	Durchmesser $\perp$	Elliptizität $1 : \tan(\theta_{\perp})/\tan(\theta_{\parallel})$
Soll	2400 $\mu\text{m}$	1 : 4.1
Substrat 1	2210 $\mu\text{m}$	1 : 5.0
Substrat 2	3389 $\mu\text{m}$	1 : 2.0
Substrat 3	2556 $\mu\text{m}$	1 : 3.1
Substrat 4	2977 $\mu\text{m}$	1 : 2.3
Substrat 5	3145 $\mu\text{m}$	1 : 2.2

Bei der abschließenden Montage der Zylinderlinsenarrays (Montageschritt 4) erfolgt zunächst die Auswahl der geeigneten Radienpaarung für die tatsächliche Abstrahlcharakteristik der in Schritt 2 montierten Laserdiode. Nachdem die geeigneten Zylinderlinsen in den Strahlengang gebracht sind, werden diese in Z-Richtung justiert, indem abwechselnd der Träger des Array für // und  $\perp$  gegriffen und iterativ durch die Justierung ein rundes Strahlprofil mit dem Soll Durchmesser in der Bildebene der jetzt ca. 80 mm entfernten CCD-Kamera eingestellt wird (Tabelle 18).

**Tabelle 18: Ergebnis der Justierung der Zylinderlinsen-Arrays nach optischer Funktion (Kollimation und Zirkularisierung)**

	Durchmesser $\perp$	Divergenz	Elliptizität $1 : \tan(\theta_{\perp})/\tan(\theta_{\parallel})$
Soll	800 $\mu\text{m}$	< 2 mrad	< 1 : 1.05
Substrat 1	745 $\mu\text{m}$	3.2 mrad	1 : 1.40
Substrat 2	638 $\mu\text{m}$	2.9 mrad	1 : 1.20
Substrat 3	778 $\mu\text{m}$	3.8 mrad	1 : 1.35
Substrat 4	690 $\mu\text{m}$	4.0 mrad	1 : 1.10
Substrat 5	k.A. (defekt)		

Die Divergenz des kollimierten und zirkularisierten Strahls wird durch eine zweite Aufnahme des Strahlprofils in einer Entfernung von 250 mm ermittelt. Wiederum gelten die Ergebnisse aus Tabelle 18 nur für die noch nicht fixierten Zylinderlinsenarrays. Der Einfluss der gewählten Fügeverfahren auf das Positionier- und Justierergebnis der einzelnen Montageschritte wird im folgenden Kapitel dargestellt.

### 3.4 Fügetechnologien

Das durch den Lösungsansatz der unmittelbaren Fassungsstrukturen in ebenen keramischen Substraten verfolgte Prinzip, auf mittelbare Fassungselemente zu verzichten, schränkt den Einsatz von kraft-, form- und stoffschlüssigen Verfahren [KRA-04] zum Fügen von Bauelementen auf keramischen Systemplattformen in der folgenden Weise ein:

- Kraft- und formschlüssige Fügeverfahren (z.B. Klemmverbindungen) können aufgrund des hohen Elastizitätsmoduls sowie der Sprödigkeit der verwendeten Keramikwerkstoffe meist nur mit zusätzlichen Hilfselementen, im Sinn der Lösungsansatzes demnach mittelbaren Fassungen, realisiert werden. Diese sind dann sinnvoll, wenn die Forderung nach einer Justiermöglichkeit für einzelne Bauelemente im montierten Zustand besteht. Dem Prinzip der unmittelbaren Fassungen entsprechend sind kraft- und formschlüssige Fügeverfahren aber weitestgehend zu vermeiden und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.
- Stoffschlüssige Fügeverfahren eignen sich für das Prinzip der unmittelbaren Fassungsstrukturen, da durch das Fügemedium die direkte Verbindung zwischen Bauelement und Systemplattform hergestellt wird und mittelbare Fassungselemente nicht benötigt werden. Die Materialien der Fügepartner, auf Seiten der Systemplattform keramische Werkstoffe gegebenenfalls mit Dickschichtmetallisierung und auf Seiten der Bauelemente Gläser, Kunststoffe und Metalle, schränken die Auswahl möglichst universell einsetzbarer stoffschlüssiger Fügeverfahren auf das Kleben und das Löten ein.

An die zum Einsatz kommenden stoffschlüssigen Fügetechnologien bei der Montage hybrid-optischer Systeme auf keramischen Systemplattformen werden folgende prinzipielle Anforderungen gestellt:

- Das Bauelement soll während der stoffschlüssigen Verbindungsbildung (Aushärten des Klebstoffs, Erstarren des Lotes) möglichst gering bzw. reproduzierbar in

seiner Position beeinflusst werden, um den Einfluss des Fügeverfahrens auf den vorangegangenen Positionier- bzw. Justierprozess zu minimieren.

- Die thermomechanische Stabilität der Fügeverbindung darf im Bereich der Betriebs- und Lagertemperatur durch die Wahl des Fügemediums (dies gilt besonders für Klebstoffe) nicht beeinträchtigt werden.
- Bei der Montage verlustleistungsbehafteter optoelektronischer Bauelemente muss das Fügemedium über eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit verfügen. Insbesondere beim Justieren stellt unter Umständen allein das Fügemedium nach Abschluss der Montage den mechanischen Kontakt zur Ableitung der Wärme von Bauelement und Systemplattform her.
- Eine ausreichende Langzeitstabilität der Fügestelle ist notwendig.
- Das Fügeverfahren sowie das Fügemedium selbst darf die optischen Funktionsflächen nicht kontaminieren.

Der Aufbau der Strahlkollimationsoptik soll im wesentlichen anhand des Fügeverfahrens Kleben beschrieben werden, einige Ausführungen zum Löten zeigen darüber hinaus das Potential, welches dickschichtprozessierte keramische Systemplattformen für klebstofffrei montierte Optikbaugruppen haben.

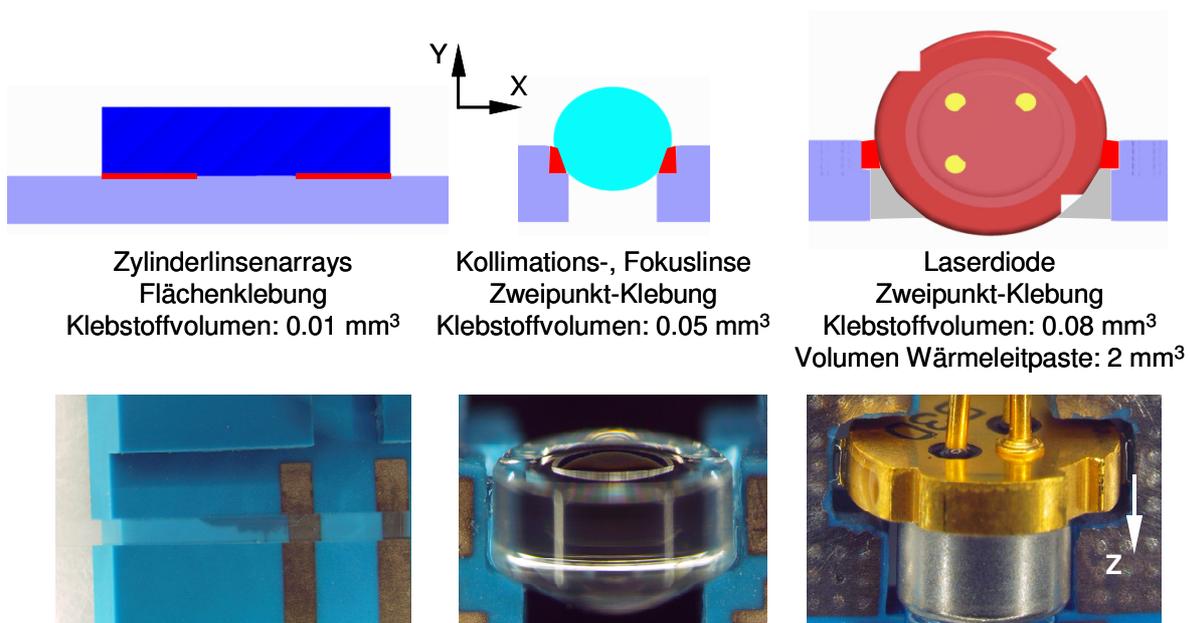
#### a) Stoffschlüssiges Fügen mittels Kleben

Nach [DIN 16920] beruht die Verbindungsbildung bei einer Klebstofffügestelle auf der Flächenhaftung (Adhäsion) des Fügemediums Klebstoff (welches allgemein als nicht-metallischer Stoff definiert wird) auf den Fügepartnern und der inneren Festigkeit (Kohäsion) im Fügemedium selbst. Im Bereich der Optikmontage haben sich vorwiegend UV-aushärtende Klebstoffe etabliert [BAC-99], die sich durch teilweise hohe Glasübergangstemperaturen, niedrige thermische Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ , geringen Polymerisationsschrumpf während des Aushärtens und geringe Ausgasung sowie Temperatureinsatzbereiche von  $-40\text{ °C}$  bis zu  $> +80\text{ °C}$  auszeichnen. Der besondere Vorteil dieser Klebstoffe ist das extrem schnelle ( $< 1\text{ min}$ ) Aushärten unter dem Einfluss von UV-Licht im Vergleich zu anderen chemisch oder physikalisch aushärtenden Klebstoffsystemen. Der für die Montage der Strahlkollimationsoptik ausgewählte UV-härtende Klebstoff [DYM-99] weist die in Tabelle 19 zusammengefassten Eigenschaften auf und benetzt im Vergleich zu anderen Klebstoffen sehr gut sowohl auf Glas und Keramik als auch Metall.

**Tabelle 19: Eigenschaften des verwendeten UV-härtenden Klebstoffs**

	Klebstoff zur Montage der Strahlkollimationsoptik
Viskosität	4500 Pa·s
Elastizitätsmodul	17.2 MPa
maximale Einsatztemperatur	150 °C
Glasübergangstemperatur	25 °C
Wärmeausdehnungskoeffizient	$250 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
linearer Schrumpf beim Aushärten	2.3 %

Die schematische Gestaltung der Fügestellen ist in Bild 51 dargestellt. Es wird deutlich, dass bis auf die Laserdiode bei allen Bauelementen die durch den Schrumpf des Klebstoffs beim Aushärten bedingte Dejustierung durch die in der keramischen Systemplattform integrierten mechanischen Anschläge eingeschränkt wird. Bei der Laserdiode hingegen kann bei einem mittleren Fügespalt von 250 µm und bei einem linearen Schrumpf des Klebstoffs beim Aushärten von 2.3 % mit einer Dejustierung von ca. 6 µm vorwiegend in lateraler Richtung gerechnet werden, die vorwiegend während der Aushärtung des Klebstoffs auftreten wird. Die zu einem späteren Zeitpunkt applizierte Wärmeleitpaste zur Verbesserung der Verlustleistungsabführung der Laserdiode trägt aufgrund ihrer Elastizität kaum zur Dejustierung bei.



**Bild 51:** Schematische Darstellung der Fügestellen im Querschnitt (oben, rot: Klebstoff, grau: Wärmeleitpaste) und in der realen Draufsicht (unten)

Um den Einfluss des Klebstoffschumpfs während des Aushärtens zu überprüfen, wurde analog zur Justierung der Laserdiode das Profil des kollimierten Strahls nach dem Fügen erneut aufgenommen (Tabelle 20).

**Tabelle 20: Laserdioden-Dejustierung während des Fügen mittels Kleben**

	Vor dem Aushärten des Klebstoffs		Nach dem Aushärten des Klebstoffs	
	Durchmesser $\perp$	Elliptizität $1 : \tan(\theta_{\perp})/\tan(\theta_{//})$	Durchmesser $\perp$	Elliptizität $1 : \tan(\theta_{\perp})/\tan(\theta_{//})$
Soll	2400 $\mu\text{m}$	1 : 4.1	2400 $\mu\text{m}$	1 : 4.1
Substrat 1	2210 $\mu\text{m}$	1 : 5.0	2280 $\mu\text{m}$	1 : 4.8
Substrat 2	3389 $\mu\text{m}$	1 : 2.0	3451 $\mu\text{m}$	1 : 2.2
Substrat 3	2556 $\mu\text{m}$	1 : 3.1	2613 $\mu\text{m}$	1 : 3.8
Substrat 4	2977 $\mu\text{m}$	1 : 2.3	3076 $\mu\text{m}$	1 : 2.3
Substrat 5	3145 $\mu\text{m}$	1 : 2.2	3156 $\mu\text{m}$	1 : 2.3

Die Änderung von Strahldurchmesser und Elliptizität entspricht nach der Toleranzrechnung des Optikdesigns einer axialen Dejustierung der Laserdiode von  $< 10 \mu\text{m}$  und liegt damit im Bereich der Erwartungen. Im Vergleich dazu zeigt Tabelle 21, dass bei den ebenfalls justierten Zylinderlinsenarrays ein Einfluss des Klebstoffschumpfs während des Aushärtens kaum festzustellen ist.

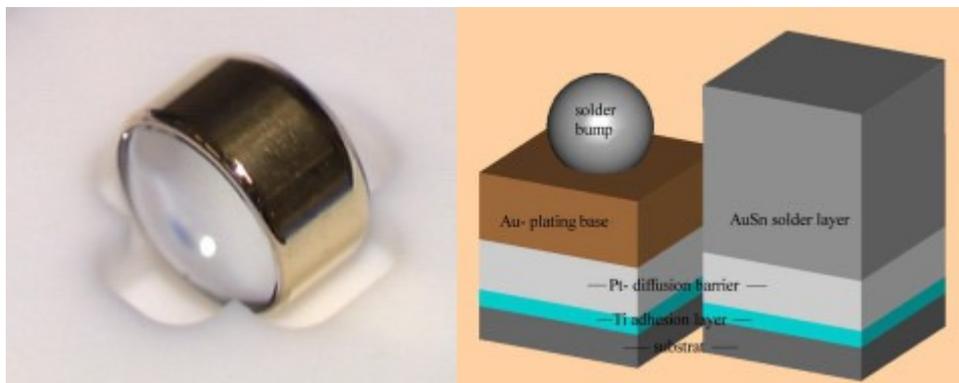
**Tabelle 21: Zylinderlinsenarray-Dejustierung während des Fügen mittels Kleben**

	Vor dem Aushärten des Klebstoffs		Nach dem Aushärten des Klebstoffs	
	Durchmesser $\perp$	Elliptizität $1 : \tan(\theta_{\perp})/\tan(\theta_{//})$	Durchmesser $\perp$	Elliptizität $1 : \tan(\theta_{\perp})/\tan(\theta_{//})$
Soll	800 $\mu\text{m}$	$< 1 : 1.05$	800 $\mu\text{m}$	$< 1 : 1.05$
Substrat 1	745 $\mu\text{m}$	1 : 1.40	750 $\mu\text{m}$	1 : 1.41
Substrat 2	638 $\mu\text{m}$	1 : 1.20	634 $\mu\text{m}$	1 : 1.18
Substrat 3	778 $\mu\text{m}$	1 : 1.35	780 $\mu\text{m}$	1 : 1.36
Substrat 4	690 $\mu\text{m}$	1 : 1.10	698 $\mu\text{m}$	1 : 1.15
Substrat 5	k.A. (defekt)			

## b) Fügen mittels Löten

Die nahezu immer vorhandene Metallisierung auf dickschichttechnologisch strukturierten Keramiksubstraten stellt neben Leiterbahnen auch Benetzungsflächen zum Fügen elektronischer Bauelemente mittels Löten zur Verfügung. Dieses Fügeverfahren ist auch für optoelektronische und optische Bauelemente interessant, da es gegenüber dem Kleben Vorteile bezüglich der zulässigen Einsatztemperatur, Langzeitstabilität, UV-Beständigkeit aufweist [SCH-03b] und einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis von Positionierung bzw. Justierung hat. Darüber hinaus kann das Lot als Fügemedium auch sehr gut die Funktion der Wärmeleitung übernehmen.

Um das Löten prinzipiell zu ermöglichen, müssen optische Bauelemente an der Fügestelle selektiv metallisiert werden, was beispielsweise durch Bedampfen oder Sputtern [MER-01] erfolgt. Während dieser Prozesse müssen die optischen Funktionsflächen abgedeckt werden, um eine Kontamination zu vermeiden. Als Metallisierung kann nach [EBE-03] ein gesputtertes Schichtsystem aus Titan als Haftvermittler, Platin oder Chrom als Diffusionsbarriere und Gold als Benetzungsfläche mit einer Gesamtschichtdicke  $< 4 \mu\text{m}$  (Bild 52) genutzt werden.



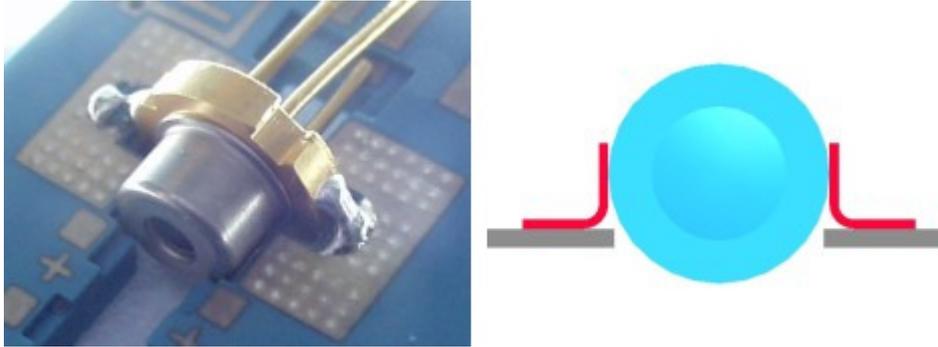
**Bild 52:** Am Umfang metallisierte Rundoptik (links); Metallisierungssystem nach [EBE-03] mit Lotkugel bzw. Lotschicht (rechts)

Ein wesentlicher Aspekt des Lötens optischer Bauelemente ist die flussmittelfreie Prozessführung, da sich während des Lötens verdampfende Flussmittelreste auf optischen Funktionsflächen absetzen und diese verschmutzen können. Als flussmittelfrei prozessierbare Lote nennt die Literatur [SCH-99] vorwiegend die eutektische Gold-Zinn-Legierung 80Au20Sn mit einer Schmelztemperatur von  $280 \text{ }^\circ\text{C}$ , aber auch die Zinn-Silber-Legierung 96Sn4Ag mit einer Schmelztemperatur von  $221 \text{ }^\circ\text{C}$ . Um eine Oxidation der Benetzungsflächen auf den Fügepartnern und damit die Notwendigkeit der Anwendung von Flussmittel zu vermeiden, schließen die

Benetzungsflächen meist mit einer Goldschicht ab bzw. mit dem Lot als Schicht selbst, wenn dieses nicht anderweitig, z.B. in Form von Lotkugeln („Bumps“) oder manuell platzierten Lotvolumina („Preforms“), zugeführt wird.

Im Gegensatz zu den in der Elektronikmontage üblichen Verfahren des Ofen- oder Schwalllötens muss beim Löten optischer und optoelektronischer Bauelemente die Energie zum Umschmelzen des Lotes lokal und zeitlich begrenzt eingebracht werden, um die empfindlichen Bauelemente nicht zu schädigen, optische Funktionsflächen durch umgeschmolzenes Lot nicht zu kontaminieren und thermomechanische Spannungen durch das großflächige Aufheizen und Abkühlen von Bauelementen mit unterschiedlichem thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  zu minimieren. Ein dafür geeignetes Werkzeug ist der Laser, der zusätzlich berührungsfrei arbeitet, womit ein geringstmöglicher Einfluss auf das Ergebnis der Positionierung bzw. Justierung gegeben ist. Dieser resultiert dann in erster Näherung allein aus der negativen Ausdehnung des Lotwerkstoffs selbst beim Abkühlen nach dem Lötvorgang. Beim Fügen der Laserdiode würde sich das Lot 80Au20Sn ( $\alpha = 16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) beim Abkühlen von 300 °C auf Raumtemperatur bei einem Fügespalt von 250  $\mu\text{m}$  um  $-1.4 \mu\text{m}$  ausdehnen (zum Vergleich: Klebstoffschrunpf bei gleichem Fügespalt ca. 6  $\mu\text{m}$ ). Darüber hinaus können Laserlötprozesse über die Integration eines temperaturmessenden Systems (z.B. Pyrometer) temperaturgeregelt durchgeführt werden, wodurch nur soviel Energie eingetragen werden muss, wie für das Umschmelzen des Lotes tatsächlich erforderlich ist.

Das Ergebnis von ersten Lötversuchen auf keramischen Systemplattformen ist in Bild 53 links dargestellt. Die Laserdiode, an ihrem Sockel mit Gold beschichtet, ist über eine 96Sn4Ag-Lotbrücke mit dem keramischen Substrat verbunden, auf dem eine kurz vor dem Löten aufgerauhte AgPd-Dickschichtmetallisierung als Benetzungsfläche dient. Das Lot ist in Form kleiner Stanzteile (2 mm x 2 mm x 0.3 mm) appliziert und wird durch einen Laser (948 nm Wellenlänge, Strahldurchmesser im Fokus 1.0 mm) mit einer Leistung von 60 W über einer Dauer von 1.4 s umgeschmolzen. Da der Greifer während des Fügens die Diode im justierten Zustand halten soll, muss der Löt laser in Analogie zu Bild 43 seitlich einstrahlen, im vorliegenden Fall unter einem Winkel von ca. 40° zu Substratoberfläche (siehe auch Bild 45).



**Bild 53:** Laserstrahlgelötete Diode auf LTCC-Substrat (links), Hilfselemente zum Überbrücken des Lötspaltes (rechts, schematisch)

Um den Prozess des Lötens optischer und optoelektronischer Bauelemente auf keramischen Systemplattformen sicher zu gestalten, sind weitere Untersuchungen und Prozessoptimierungen notwendig:

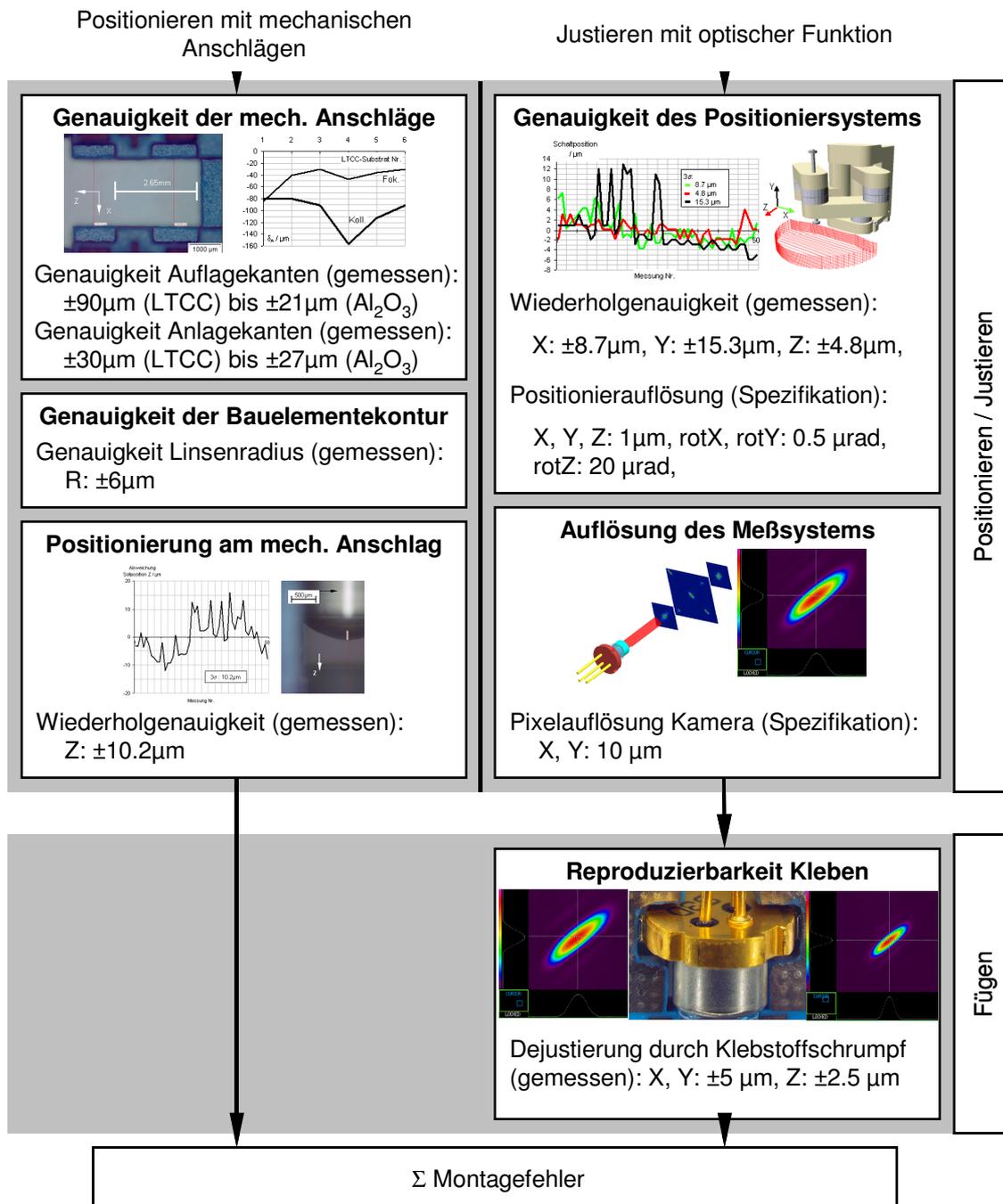
- Der gerade beim Justieren unter Umständen auftretende große Fügespalt wird vom umgeschmolzenen Lot oft nur unzureichend überbrückt, was in kollabierenden Lotbrücken resultieren kann. Ursache hierfür ist auch, dass der relativ kleine Strahldurchmesser des Lötlasers oft nicht in der Lage ist, die Benetzungsflächen an beiden Fügepartnern gleichzeitig ausreichend zu erwärmen und damit den Benetzungsvorgang zu unterstützen. Als Massenware ausführbare Zwischenelemente (Bild 53 rechts), die in sich grob toleriert sein können und die den Justierzwischenraum überbrücken, stellen an beiden Fügepartnern einen minimalen Fügespalt ein und könnten geeignet sein, stabile Lotbrücken zu erzeugen. Das Löten der zwei Fügespalte pro Verbindung kann sequentiell geschehen und gegebenenfalls mit einer Nachjustierung verbunden werden.
- Die beim Fügen rundoptischer Bauelemente (z.B. auch der Laserdiode) nahezu senkrecht stehende Benetzungsfläche am zu montierenden Bauelement behindert die Benetzung des Lotes, da die die Benetzung unterstützende Gravitation nicht senkrecht zur Fügefläche wirkt. Auch hier können Zwischenelemente gemäß Bild 53 die Benetzung aufgrund sich einstellender Kapillarkräfte verbessern.
- Die durch das Abkühlen des Lots nach dem Umschmelzen hervorgerufene Dejustierung des montierten optischen Bauelements ist für keramische Systemplattformen bisher, im Gegensatz zu der Wirkung des Klebstoffschumpfs (Tabellen 20 und 21), nicht untersucht. Andere Aufbauvarianten (siehe Kapitel 1.4) lassen eine Dejustierung im Bereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  erwarten [GRA-03]. Die thermomechanische Optimierung der Fügestellen mittels FEM muss dies beachten.

- Die temperaturgeregelte Prozessführung des Laserstrahl­lötens stößt aufgrund der schrägen Einstrahlung des Laserstrahls, der geometrischen Unregelmäßigkeit der Fügeflächen und der damit verbundenen Unsicherheit bei der Aufnahme des Temperatursignals an Grenzen und führt derzeit zu keinen reproduzierbaren Ergebnissen. Es ist zu prüfen, ob eine leistungsgesteuerte Prozessführung in geeigneter Weise für das schrägeinstrahlende Laserstrahl­löten parametrisiert werden kann.
- Der metallische Grundkörper der Laserdiode stellt eine große Wärmesenke dar, die es verhindert, dass der Laser diese Benetzungsfläche ausreichend erwärmen kann, was ebenfalls zu Benetzungsproblemen und nicht reproduzierbaren Fügeergebnissen führt.

#### 4. Diskussion der Ergebnisse

Mit den Resultaten der Montage der Strahlkollimationsbaugruppe auf der keramischen Systemplattform in LTCC kann die in Bild 3 allgemein dargestellte Toleranzkette bei der Montage hybrid-optischer Systeme nun für die beiden Strategien des Positionierens an mechanischen Anschlängen und des Justierens mit Hilfe der optischen Funktion mit konkreten Werten unter­setzt werden. Unter Berücksichtigung der Einschränkung, dass bei der Realisierung des vorgeschlagenen Aufbau­konzepts auf industriell verfügbare Strukturierungstechnologien für ebene keramische Substrate zurückgegriffen werden soll, sind die Ergebnisse wie folgt zu beurteilen:

- Die Strukturierung ebener keramischer Substrate erlaubt es, auf mittelbare und zusätzliche Fassungs­elemente zu verzichten. Die Montage hybrid-optischer Systeme kann so wesentlich vereinfacht werden. Die besonders einfache und kostengünstige Montage, bei der Bauelemente gegen mechanische Anschlüsse positioniert werden, ist mit dem vorgestellten Lösungsansatz und den derzeit verfügbaren Strukturierungstechnologien theoretisch dann sinnvoll, wenn die zulässigen Positionstoleranzen des zu montierenden Bauelements  $> \pm 20 \mu\text{m}$  (Einlagentechnologie) bis  $\pm 50 \mu\text{m}$  (Mehrlagentechnologie) betragen. Praktisch müssen die Strukturierungstechnologien im Prototypenstadium evaluiert und optimiert werden, da insbesondere in der Mehrlagentechnologie noch größere Ungenauigkeiten (bis  $\pm 90 \mu\text{m}$ , Bild 54) auftreten können.

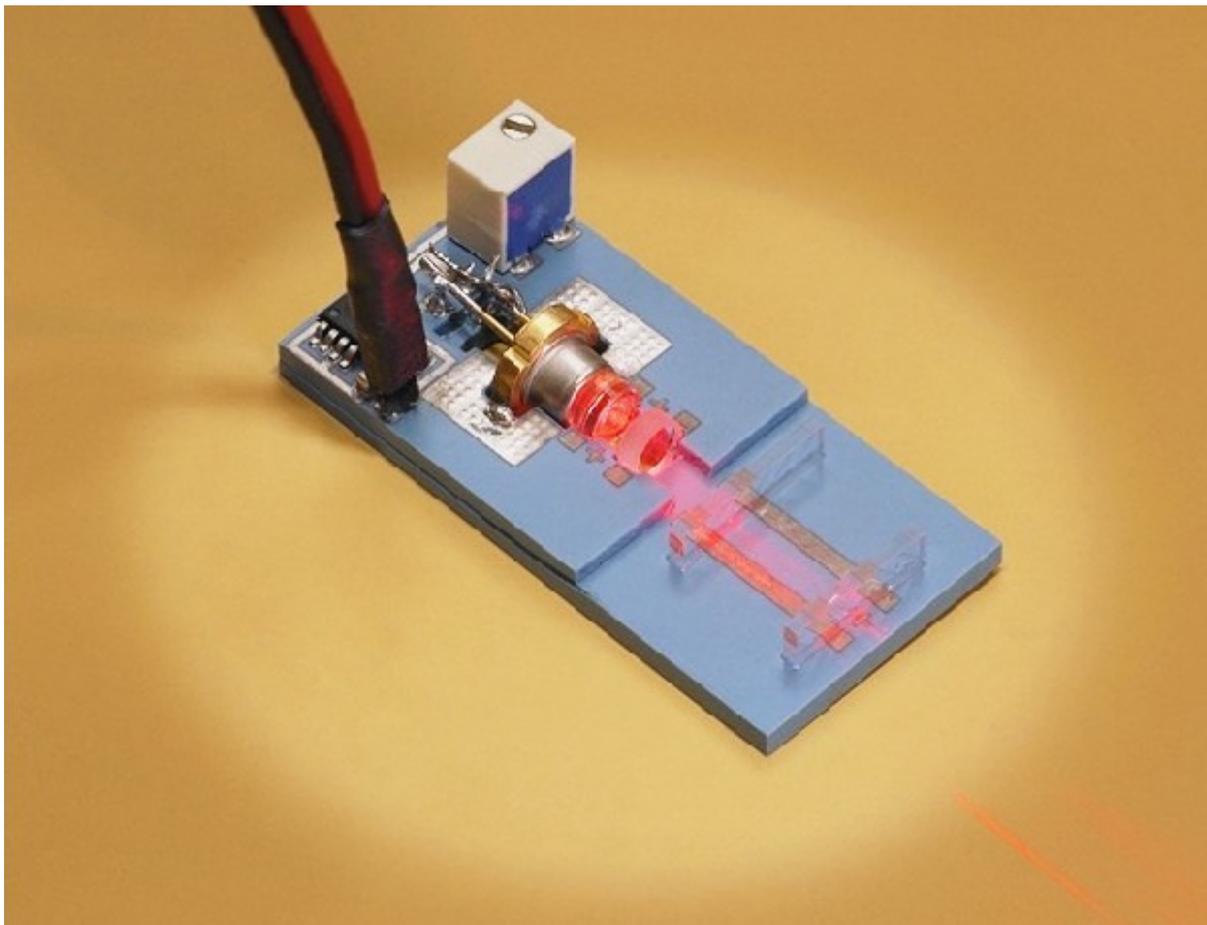


**Bild 54: Toleranzketten bei der Montage der Strahlkollimationsbaugruppe**

- Die erreichbaren Strukturgenauigkeiten, die derzeit bei Mehrlagensubstraten aus LTCC noch fast in den dreistelligen Mikrometerbereich reichen, sind um mindestens eine Größenordnung schlechter im Vergleich zu anderen Verfahren der Mikrostrukturierung. Dies ist vorwiegend dem Umstand geschuldet, dass hohe Strukturgenauigkeiten in keramischen Substraten bei Hybridbaugruppen der Elektronik oder Mikrofluidik bisher nicht benötigt wurden. Keramische Systemplatt-

formen für hybride optoelektronische Systeme können aber am Miniaturisierungsbestreben und einhergehenden Trends zur immer genaueren Strukturierung auch bei der Fertigung elektronischer Baugruppen (siehe auch Kapitel 5) partizipieren.

- Da Fassungsstrukturen als mechanische Anschläge in ebenen Substraten gerade bei der laterale Positionierung optischer Bauelemente zum größten Teil an optisch nicht relevanten Flächen wie z.B. dem Außenumfang anliegen, führt die in diesen Geometrien oft grobe Tolerierung der zu montierenden Bauelemente zu einer weiteren Verschlechterung der erreichbaren Positioniergenauigkeit während der Montage. Die naheliegende Forderung, die optischen Bauelemente auch an nichtoptischen Funktionsflächen genauer zu tolerieren, stößt bei Katalogware schnell an wirtschaftliche Grenzen.
- Die genannten Einschränkungen für die Positionierung der Bauelemente an mechanischen Anschlägen lassen sich durch eine Justierung umgehen, mit der (bei erhöhtem Aufwand) wesentlich höhere Genauigkeiten erzielt werden können.



**Bild 55: Auf LTCC-Systemplattform montierte Strahlkollimationsbaugruppe**

- Die Notwendigkeit, aufgrund zu erwartender Strukturierungsungenauigkeiten

größere Fügespalte als eigentlich notwendig für die Justierung von Bauelementen vorzuhalten, hat Rückwirkungen auf die Justiergenauigkeit, da das den Fügespalt überbrückende stoffschlüssige Fügemedium und dessen Aushärte- (Klebstoff) bzw. Abkühlungsverhalten (Lot) umso größeren Einfluss auf die Dejustierung während des Fügens haben bzw. wieder auf dem Prinzip der unmittelbaren Fassung entgegenstehende Hilfselemente zurückgegriffen werden muss.

Als Richtlinien für den Entwurf keramischer Systemplattformen für hybrid-optische Systeme können angeführt werden:

- *Ein- oder Mehrlagensubstrate*: Mehrlagensubstrate kommen in Frage, wenn einerseits Strukturen zur lateralen Positionierung in Y aufgrund von gegebenen Bauelementgeometrien zwingend in unterschiedlichen Höhen angeordnet bzw. komplexere dreidimensionale Geometrien zur Verwirklichung von anderen Funktionen erzeugt werden müssen oder andererseits viel Elektronikfunktionalität in Form von mehrlagigen Leiterbahnen oder auch vergrabenen passiven Bauelementen integriert werden soll. Im Normalfall sind bereits gesinterte einlagige Substrate, z.B. aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vorzuziehen. Diese sind in der Regel kostengünstiger und können in der Regel auch wesentlich genauer mechanisch strukturiert werden als Mehrlagensubstrate.
- *Höhe der optischen Achse über der Substratoberfläche*: Diese ist prinzipiell zu minimieren, wird aber in der Regel bestimmt von der Auflagefläche des größten planoptischen Bauelements, das nicht durch eine Nachbearbeitung modifiziert werden kann. Rundoptische Bauelemente der optischen Baugruppe sollten in die Substratoberfläche, also die negative Y-Koordinate, hineinragen, um über Auflagekanten gefasst werden zu können. Dabei ist darauf zu achten, dass sinnvolle Aufwinkeln sich im Bereich  $< 60^\circ$  bewegen (Bild 26).
- *Mechanische Anschläge in Mehrlagensubstraten*: Fassungsstrukturen mit mechanischen Anschlägen zur Positionierung von Bauelementen müssen in Mehrlagensubstraten so ausgeführt werden, dass sich die Anschläge für verschiedene Bauelemente in ein- und derselben Folienlage, der Referenzebene, befinden. Die Referenzebene sollte die erste Folienlage (Bild 27), also die Substratoberfläche, sein. Deren Genauigkeit kann durch geeignete Maßnahmen beim Laminieren und Sintern („Constrained Sintering“ [HIN-04]) beeinflusst werden.
- *Dickschichtmetallisierungen*: Dickschichttechnologisch strukturierte Metallisie-

rungen kommen neben Leiterbahnen für Positionsmarken in der Nähe von Fassungsstrukturen, als Auflageflächen für planoptische Bauelemente und als Benetzungsflächen für das stoffschlüssige Fügeverfahren mittels Löten in Frage. Beim stoffschlüssigen Fügen mit Klebstoff erleichtern Dickschichtmetallisierungen als Auflageflächen den definierten Klebstoffauftrag aufgrund der Kapillarwirkung im sich durch die Schicht als Abstandshalter einstellenden Spalt zwischen Bauelement und nicht metallisierter Substratoberfläche.

- *Wärmeableitung durch das Substrat:* Geringe Verlustleistungen im Bereich weniger 100 mW können durch das Substrat abgeführt werden, wenn „Thermal Vias“ die thermisch leitenden Geometrien definieren und damit eine Erwärmung des gesamten Substrats verhindern. Wärmeleitpfade in unmittelbarer Nähe von Fassungsstrukturen sollten aufgrund zu erwartender Geometriedeformationen vermieden werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der in der Arbeit vorgestellte neue Ansatz zum Aufbau hybrid-optischer Systeme zeigt, dass auf ebenen keramischen Systemplattformen mikrooptische Bauelemente und miniaturisierte optische Baugruppen mit elektronischen Bauelementen zu komplexen optoelektronischen Baugruppen integriert werden können. Der Anspruch der Arbeit, mit dem Aufbaukonzept die Funktionalität solcher Systeme zu erhöhen und deren Montage zu vereinfachen, wird durch die direkte Einbettung mechanischer Strukturen, die als Fassungen für die optischen Bauelemente dienen, in dickschichttechnologisch prozessierte und SMD-bestückte keramische Substrate erreicht. Diese unmittelbaren Fassungen erlauben es, auf mittelbare Fassungen, die als zusätzliche Bauelemente mit erhöhten Aufwand bei Fertigung und Montage verbunden sind, zu verzichten. Darüber hinaus können unmittelbare Fassungen bei ausreichender Genauigkeit mechanische Anschläge zur Verfügung stellen, die das mit verhältnismäßig geringem technologischen Aufwand verbundene Positionieren von optischen Bauelementen durch Anlegen gegen diese Anschläge ermöglichen.

Ziel des Aufbaukonzepts ist es, die Erzeugung der Fassungsstrukturen in die im Rahmen der Dickschichttechnologie stattfindende mechanische Strukturierung keramischer Substrate zu integrieren. Für zwei mögliche Prozessvarianten, die Strukturierung von Mehrlagensubstraten im Grünzustand mit anschließender Sinte-

rung zu einem monolithischen Substrat bzw. die Strukturierung von Einlagensubstraten im bereits gesinterten Zustand, können anhand der Untersuchung von im Rahmen dieser Arbeit entworfenen und extern gefertigten Systemplattformen für den Aufbau einer Strahlkollimationsoptik nachfolgende Aussagen getroffen werden.

Die in ebenen Keramiksubstraten realisierbaren mechanischen Strukturen sind zweieinhalb- (Einlagentechnologie) und eingeschränkt dreidimensional (Mehrlagentechnologie). Wesentliche Geometrielemente zum Fassen optischer Bauelemente sind Auflageebenen und –kanten zur Lagebestimmung lateral zur optischen Achse sowie Anlageecken und –kanten zur Lagebestimmung in entlang der optischen Achse. Weitere für die Montage relevante Geometrielemente sind dickschichttechnologisch strukturierte Marken oder an das Fügeverfahren angepasste Geometrien (Benetzungsflächen, Klebstofffallen). Das Mehrlagen-Material LTCC, eine bei Temperaturen um 850 °C sinternde Kombination von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit verschiedenen Gläsern, wird im Grünzustand Einzellage für Einzellage z.B. mittels Stanzen oder Laserschneiden strukturiert. Die Verfahren selbst sind sehr genau (Strukturierungsgenauigkeiten bis  $\pm 20 \mu\text{m}$  sind nachgewiesen). Da jede Einzellage anders strukturiert werden kann, ist es möglich, im Mehrlagenverbund dreidimensionale Geometrien zu erzeugen. Deren Formenvielfalt wird nur durch die Anforderungen der der Strukturierung nachfolgenden Laminier- und Sinterprozesse (z.B. sind keine unter dem Laminierdruck kollabierende, überhängende Strukturen erlaubt) eingeschränkt. Laminieren und Sintern führen dazu, dass die am Ende der Prozessabfolge zur Herstellung von Mehrlagensubstraten erreichbare Genauigkeit deutlich schlechter ist als die Genauigkeit der mechanischen Strukturierung selbst. Für eine in LTCC gefertigte Systemplattform der Strahlkollimationsoptik führt das zu einer mittleren Abweichung der tatsächlichen Strukturgeometrien von bis zu  $100 \mu\text{m}$  und einer Toleranz von bis zu  $\pm 90 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ). Die Ebenheit der Substrate dagegen ist mit  $< 5 \mu\text{m}/\text{cm}$  deutlich besser als erwartet. Das in der Einlagentechnologie verbreitete Material  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wird im gesinterten Zustand mittels Laserschneiden strukturiert. Dieses Verfahren ist sehr genau (Strukturierungsgenauigkeiten bis  $\pm 10 \mu\text{m}$ ), es können allerdings nur zweieinhalbdimensionale Strukturen erzeugt werden, wodurch die Formenvielfalt eingeschränkt wird. Da das Laserschneiden als letzter Prozess in der Technologiekette zur Herstellung von einlagigen Substraten eingeordnet werden kann, wird die erreichbare Genauigkeit direkt von diesem Strukturierungsverfahren selbst bestimmt. Für

die in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Systemplattform der Strahlkollimationsoptik führt das zu einer mittleren Abweichung der tatsächlichen Strukturgeometrien von bis zu  $31\ \mu\text{m}$  und einer Toleranz von bis zu  $\pm 27\ \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ). Die Ebenheit der Substrate beträgt  $< 7\ \mu\text{m}/\text{cm}$ .

Bei der Montage der Strahlkollimationsbaugruppe werden die beschriebenen Fassungen als mechanische Anschläge zum Positionieren von rund- und planoptischen Bauelementen genutzt. Die experimentell ermittelte Wiederholgenauigkeit dieser Art der Positionierung beträgt  $< \pm 10\ \mu\text{m}$  und resultiert aus Ungenauigkeiten beim Anlegen an den mechanischen Anschlag sowie der Ungenauigkeit des Positioniersystems selbst (bis zu  $\pm 15\ \mu\text{m}$ ). Für genauer in der Lage zu bestimmende Bauelemente kommen Justierprozesse zum Einsatz. Die Vorabbestückung der Systemplattform mit elektronischen Bauelementen erleichtert die Justierung, da optoelektronische Bauelemente, im Fall der Strahlkollimationsoptik die Laserdiode, mit Hilfe der Elektronik angesteuert werden können. Die Genauigkeit der erreichten Bauelementeposition wird dann wesentlich vom Fügeprozess beeinflusst. Das bei der Montage der Strahlkollimationsbaugruppe eingesetzte Fügeverfahren Kleben dejustiert die Bauelemente im Bereich  $< \pm 5\ \mu\text{m}$  aufgrund des Klebstoffschrumpfs.

Keramische Systemplattformen eignen sich demnach besonders für miniaturisierte optoelektronische Baugruppen mit Toleranzanforderungen im Bereich  $> \pm 10\ \mu\text{m}$ , bei denen optische und optoelektronische Bauelemente als Katalogware und Sonderkomponenten mit diskreten elektronischen Schaltungen hybrid und mit wenig Montageaufwand auf engem Raum integriert werden sollen. Das keramische Substrat selbst stellt eine thermisch stabile, langzeitbeständige Plattform dar, die durch die Infrastruktur der Elektronikindustrie einschließlich Vorabbestückung der Elektronik preiswert bei kleinen und mittleren ( $< 10000$ ) Stückzahlen bereitgestellt werden kann. Keramische Systemplattformen eignen sich weniger für klassisch makroskopische optische Baugruppen mit großem Bauraum, in denen nichtoptische Funktionalität eine untergeordnete Rolle spielt oder bei denen Wert auf sehr geringe thermisch bedingte Dejustierung gelegt wird.

Die derzeit erreichbaren Genauigkeiten der Strukturierungsverfahren schränken die Nutzung keramischer Systemplattformen für höchstpräzise optoelektronische Baugruppen mit Toleranzanforderungen  $< \pm 1\ \mu\text{m}$  ein. Mit dem zunehmenden Trend zu Miniaturisierung auch in der Elektronikbestückung kann das vorgestellte Aufbaukonzept in Zukunft von der notwendigen Optimierung der bisher verfügbaren und

der Entwicklung neuer Technologien zur Herstellung keramischer Substrate profitieren. Alternative Strukturierungsverfahren wie z.B. das Prägen von Grünfolien gewinnen zunehmend an Bedeutung. Damit sollen kleinere Strukturauflösungen und bessere Genauigkeiten erreicht werden. In der Substratebene niedrigschrumpfende LTCC-Materialien (Schrumpfungstoleranz beim Sintern  $\pm 0.014\%$  [LAU-02]), spezielle Drucksinterverfahren [HIN-02] und der Einsatz von Negativformen für Kavitäten werden die Genauigkeit des Laminier- und Sinterprozesses verbessern.

Weiterhin werden Bestrebungen, neue Materialien und zusätzliche Funktionalität in ebene Substrate für elektronische Schaltungsträger zu integrieren, auch die Anwendungsmöglichkeiten für optoelektronische Baugruppen erweitern. Die Integration mikrofluidischer Bauelemente in Mehrlagensubstrate aus LTCC wird bisher untersucht, um Schaltkreise mit hoher Verlustleistung effektiver als es mit passiven Komponenten wie „Thermal Vias“ möglich ist zu kühlen. Diese Art der aktiven Kühlung lässt sich auch auf optoelektronische Bauelemente wie Laserdioden anwenden. Dem Zweck der verbesserten Abführung von Wärme bei Bauelementen hoher Verlustleistung dient ebenfalls der Einsatz alternativer Materialien wie Aluminiumnitrid (AlN) oder Berylliumoxid (BeO) und die Anwendung strukturierter Verbundsubstrate aus z. B. Keramik und Kupfer („DCB“-Technologie [SHA-98]), letztere ebenfalls versehen mit fluidischen Funktionselementen (Kühlkanäle). Derartige Basismaterialien werden in Zukunft für optoelektronische Systeme mit hohen Verlustleistungen interessant. Erste Ansätze zur Integration aktorischer Funktionselemente wie Biegebalken oder Membranen in Verbindung mit piezoelektrischen Schichten haben bisher vor allem mikrofluidische Anwendungen zum Ziel. Im Hinblick auf optoelektronische Baugruppen können solche aktorische Funktionselemente zum Aufbau adaptiver, selbstjustierender Systeme interessant werden und dann den Bereich der Mikrometer- und Submikrometerjustage abdecken. Die mechanische Strukturierung kann in Zukunft auch dazu angewendet werden, reflektive optische Funktionselemente in die keramische Systemplattform zu integrieren. Dazu zählen z. B. geprägte Flächen [BUS-03] oder sehr präzise spanend (Ultrapräzisionsbearbeitung) nachbearbeitete Dickschichten.

## 6. Literatur

- [AMB-03] Ambrosy, A. et al.: Technologien für optische Steckerschnittstellen (BMBF-Projekt OPST II). In: Proceedings ITG-Workshop „Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik“, 2003, Wernigerode
- [BAC-99] Bachmann, C.: Light Curing Assembly: A Review and Update. In: Wavelength, Mai 1999, S. 6-10
- [BAU-04] My-Com Präzisionsschalter. Firmenschrift Baumer Electric GmbH, Friedberg, 2004
- [BEC-03] Beckert, E. et al.: Integration of optics electronics and mechatronics on miniaturized platforms. In Proceedings MICRO.tec 2003, München, S. 179-183
- [BIN-97] Bindra, A.: Sensors: It's a package deal. Electronic Engineering Times. Mai 1997, S. 45
- [BOU-03] Boudreau R.A., Tan S.: Ceramic waferboard for integration of optical/optoelectronic/ electronic components. US-Patent US6574399, 2003
- [BUS-03] Buss, W. et al.: Geprägte Glaskeramik für optische und optoelektronische Anwendungen. In: Jahresbericht des Fraunhofer Instituts Angewandte Optik und Feinmechanik 2003, S. 26 -29
- [CER-04] RUBALIT<sup>®</sup> Substrate für Dickfilmtechnologie, trockengepresst. Firmenschrift CeramTec AG, Plochingen, 2004
- [CHI-03] Chien, H. et al.: Disk-Shaped Miniature Heat Pipe (DMHP) with radiating Micro Grooves for a TO Can Laser Diode Package. IEEE Transactions on components and packaging technologies 26/3 (2003), S. 569-573
- [CHO-99] Chollet, S.; Jacot, J.: Cost Efficient Assembly of Microsystems. mst-news. (1999) 1, S. 30-32
- [CMA-02] LTCC – The Complete Enabling Solution. Firmenschrift C-MAC Microcircuits GmbH. Villingen, 2002
- [COH-99] Coherent Inc.: Diode-Laser Module with a bonded Component and Method for bonding same. US-Patent US5930600, 1999
- [DAT-04] Datta, M.; Dagenais, M.: Solder-Assembled High Coupling Efficiency Single-Mode Laser Modules Using Micro-Heaters and Precompensation Technique. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology 27/2 (2004), S. 305-310
- [DIS-04] Fully Automatic Dicing Saw. Firmenschrift Disco Corporation, Tokio, 2004
- [DUP-04] Green Tape<sup>™</sup> Design and Layout Guide. Firmenschrift DuPont GmbH, Bad Homburg, 2004
- [DYM-99] OP-30 and OP-32 Low stress, flexible, clear high performance optical adhesives. Firmenschrift Dymax Europe GmbH, Frankfurt am Main, 1999

- [EBE-03] Eberhardt, R. et al.: Laser beam soldering of microoptical components. SPIE Proceedings, Vol. TD02 (2003), S. 152-154
- [EKR-04] SMT-Equipment. Firmenschrift EKRA GmbH, Bönningheim 2004
- [FIN-04] Fineplacer<sup>®</sup> Lambda. Firmenschrift Finetech GmbH & Co. KG, Berlin, 2004
- [GAT-96] Gates, J. V. et al.: Uncooled laser packaging based on silicon optical bench technology. SPIE Vol.2610, 1996, S. 127-137
- [GER-97] Gerlach, G., Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik. 1. Auflage, München: Hanser-Verlag, 1997
- [GON-98] Gonzáles, C. et al. : MicroJoinery: concept, definition, and application to microsystem development. Sensors and Actuators A 66 (1998), S. 315-332
- [GON-01] Gongora-Rubio, M.R. u. a.: Overview of low low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST). Sensors and Actuators A 89 (2001), S. 222-241
- [GOO-04] Materialkatalog Goodfellow GmbH. Bad Nauheim, 2004
- [GRA-03] de Graffenried, R.; Scussat, M.: Device for thermally, stably supporting a miniaturised component. Patentschrift WO0028367, 2003
- [HAB-93] Habig, K.H.: Tribologisches Verhalten keramischer Werkstoffe. 1. Auflage, Böblingen: Expert-Verlag, 1993
- [HAN-67] Hansen, F.: Justierung. 2. Auflage, Berlin: VEB Verlag Technik, 1967
- [HAN-94] Hanke, H.-J.: Baugruppentechologie der Elektronik – Hybridträger. Berlin: Verlag Technik, 1994
- [HAN-00] Hanke, R.; Baumbach, T.: Nanofocus CT - A New Dimension in Radioscopic Inspection on Micro Materials. In: Proceedings MicroMat 2000, S. 700-701
- [HAR-02] Harper, Ch. A.: Electronic assembly fabrication. 1. Auflage, New York: McGraw-Hill, 2002
- [HEI-04] Heikkinen, V.: Tunable laser module for fibre optic communications. Dissertation, University of Oulu, 2004
- [HES-02] Hesselbach, J.; Raatz, A.: mikroPRO – Untersuchungen zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. Essen: Vulkan-Verlag, 2002
- [HIN-02] Hintz, M. et al.: Generic investigation on 0-shrinkage processed LTCC. In: Proceedings IMAPS Nordic Conference 2002, S. 243-249.
- [HIT-03] Hitachi HL6314MG AlGaInP Laser Diodes. Firmenschrift Opnext Japan, Inc., Nagano, 2003
- [HOE-01] Höhn, M.: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme. Dissertation, TU München, 2001
- [HOU-03] Houbert, R. et al.: Inorganic-Organic Hybrid Materials for Application in Optical Devices. In: Thin Solid Films 442/1-2 (2003), S. 194-200
- [NAU-92] Naumann, H.; Schröder, G.: Bauelemente der Optik. 6. Auflage, München: Hanser Verlag, 1992

- [KAR-00] Karthe, W. et al.: Hybrid Integration of Microoptical Systems – Step by Step to Wafer Scale Integration. In: Proceedings EUSPEN 2000 – Precision Engineering and Microtechnology, S. 89-101
- [KEM-03] Modulare Stanztechnologie. Firmenschrift KMS Kemmer Automation GmbH, Schramberg-Waldmössingen, 2003
- [KIN-03] W. Kinzy Jones et al.: Micro Heat Pipes in Low Temperature Cofire Ceramic (LTCC) Substrates. IEEE Transactions on components and packaging technologies 26/1 (2003), S. 110-115
- [KIT-02] Kita, J. et al.: Laser treatment of LTCC for 3D structures and elements fabrication. Microelectronics International 19/3 (2002), S. 14-18
- [KOE-03] Präzisionsschablonen für den technischen Siebdruck. Firmenschrift Koehnen GmbH, Ottobrunn, 2003
- [KRA-81] Krause, E. u.a.: Technologie der Keramik, Band 1: Verfahren – Rohstoffe – Erzeugnisse. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1981
- [KRA-91] Kraus, J.: Folientechnologie in der Keramik – ein zukunftssträchtiges Formgebungsverfahren. Keramik-Ingenieur (1991) 3, S. 34-37
- [KRA-00] Krause, W.: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik. 3. Auflage, München: Hanser Verlag, 2000
- [KRA-04] Krause, W.: Konstruktionselemente der Feinmechanik. 3. Auflage, München: Hanser Verlag, 2004
- [KRY-04] Miniature Single Stage TEMs. Firmenschrift Kryotherm Ltd., Sankt Petersburg, 2004
- [LAU-02] Lautzenhiser, F.; Amaya. E.: HeraLock™ 2000 Self-Constrained LTCC-Tape. In: Proceedings Internation Conference on Advanced Packaging and Systems 2002
- [LIG-04] Aspheric Lenses: Firmenschrift LightPath Technologies Inc., Orlando, 2004
- [LIN-04] Piezo-Spiegelversteller PS-5. Firmenschrift LINOS Photonics GmbH & Co. KG, Göttingen, 2004
- [LPK-04] LPKF MicroLine Drill 600. Firmenschrift LPKF Laser & Electronics AG, Garbsen, 2004
- [MAZ-03] Mazzochette, J.: LTCC on Metal: A New Substrate for High-performance Requirements. Advanced Packaging, April 2003
- [MER-01] Mertz, K. W. ; Jehn, H. A. : Praxishandbuch moderne Beschichtungen – Advanced Surface Coating. 1. Auflage, München: Hanser-Verlag, 2001
- [MIC-97] Mickelson, A. R. u. a.: Optoelectronic packaging. 1. Auflage, New York: Wiley, 1997
- [MIT-02] MELFA Industrieroboter RP-1AH/3AH/5AH Technisches Handbuch. Firmenschrift Mitsubishi Electric Europe B.V., Ratingen, 2002
- [MOH-96] Mohr, J. et al.: Microoptical devices based on free space optics with LIGA microoptical benches. Examples & Perspectives. In: SPIE Vol.2783, Micro-Optical Technologies for Measurement, Sensors and Microsystems, 1996, S. 48-54

- [MUE-02] Müller, B.: Laserstrahljustieren – Das Fertigungsverfahren der Gegenwart und Zukunft für Komponenten der optischen Telekommunikation. In: Tagungsband Laser in der Elektronikproduktion und Feinwerktechnik, 2002, S. 147-154
- [NAU-92] Naumann, H., Schröder, G.: Bauelemente der Optik. 6. Auflage, München: Hanser-Verlag, 1992
- [NEU-96] Neuhäuser, U.: Messen im Bild – eine Herausforderung. Dissertation. TU Ilmenau, 1996
- [OLO-02] Olowinsky, A.: Laserstrahlmikroumformen – neues Justageverfahren in der Mikrotechnik. Dissertation, TH Aachen, 2002
- [PAL-04] Automatic Laser Diode Assembly Cell. Firmenschrift Palomar Technologies Inc., San Diego, 2004
- [PAN-90] Panicker, M.P. et al.: Thermal substrates - A new microwave substrate technology for thermal management and low parasitic elements. In: Microwave Journal, Band 33, 1990, S. 99-105
- [REB-03] Rebenklau, L.: Beiträge zum Aufbau und zur Technologie LTCC-basierter mikrofluidischer Bauelemente und Systeme. Dissertation, TU Dresden, 2003
- [RUZ-00] Ruzzu, A.: Entwicklung einer opto-elektro-mechanischen 2x2 Schaltmatrix in LIGA-Technik für die optische Telekommunikation. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6514, 2000
- [SCH-99] Scheel, W.: Die Leiterplatte und ihre elektrooptische Zukunft. Elektronik 22 (1999), S. 96-101
- [SCH-01] Scheller, T.: Untersuchungen zu automatisierten Montageprozessen hybrider mikrooptischer Systeme. Dissertation, TU Ilmenau, 2001
- [SCH-02] Schott Glaskatalog. Firmenschrift Schott AG, Mainz, 2002
- [SCH-03a] Schreiber, P. et al.: Mikrooptik für die Faserkopplung von Hochleistungs-Diodenlasern. In: Photonik 35/6 (2003), S. 50
- [SCH-03b] Schmidt, J.P. et al.: Präzisionsfügen von Mikrooptiken mittels Kleben und Löten. In: Tagungsband zum Statusseminar BMBF-Verbundprojekt Mikrooptische Bausteine für die modulare MST (MOBMO), Projekt-nummer 16 SV1340, München, 2003
- [SCH-04a] Schleuning, D.A. et al.: Packaging Multiple Active and Passive Elements in a Hybrid Optical Platform. Journal of lightwave technology 22/5 (2004), S. 1320-1326
- [SCH-04b] Schwertfeger, S. et al.: Compact Hybrid Master Oscillator Power Amplifier With 3.1-W CW Output Power at Wavelengths Around 1061 nm. In: IEEE Photonic Technologies Letter, Band 16 (2004), S. 1268-1270
- [SCU-00] Scussat, M. et al.: An innovative, flexible and accurate packaging technique suited to fabricate low cost micro optoelectronic modules. In: Proceedings 50<sup>th</sup> Electronic Components & Technology Conference 2000, S. 26-326

- [SER-98] Sergent, J. ; Krum, A. : Thermal management handbook: for electronic assemblies. 1. Auflage, New York: McGraw-Hill, 1998
- [SHA-98] Schulz-Harder, J.: Fluid -Cooled DBC Substrates. In: PCIM Europe Power Conversion, Nr. 2, 1998, S. 66 - 71
- [SIE-00] Siebenhaar, Chr.: Präzisionsjustierungen durch Einleitung von mechanischen Impulsen. Dissertation, TU Ilmenau, 2000
- [SIE-04] Siplace HF-Serie. Firmenschrift Siemens Dematic AG, München, 2004
- [SIM-00] Simon, W. et al.: Interconnects and transitions in Multilayer LTCC Multichip Modules for 24 GHz ISM-Band Applications. In: Proceedings IEEE International Microwave Symposium 2000, S. 1047-1050
- [STR-98] Straub, P.L.; Mehlhorn, T.: Thermal management for PCBs. In: Proceedings EuPac'98 (1998), S. 72-74
- [TAY-98] Form Talysurf 120L – Aspheric Measurement System. Firmenschrift Taylor-Hobson Ltd., Leicester, 1998
- [THE-02] Thelemann T. et al.: Using LTCC for Microsystems. Microelectronics International 19/3 (2002), S. 19-23
- [THO-04] Produktkatalog Thorlabs GmbH, Karlsfeld, 2004
- [THU-03] Thust, H. et al.: Embedded Components and function in LTCC. In: Proceedings 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau , 2003
- [TUC-81] Tuckermann, D. B.; Pease, R.: High-Performance heat sinking for VLSI. IEEE Electron Device Letters, EDL-2/5 (1981), S. 126-129
- [VIA-02] Design Rules for LTCC. Firmenschrift VIA electronic GmbH, Hermsdorf 2002
- [WEI-01] Weiss, St.: The Automation Crisis. In: Photonics Spectra, June 2001, S. 98-110
- [YOD-98] Yoder, P.: Design and mounting of prisms and small mirrors in optical instruments. 1. Auflage, Washington: SPIE Press, 1998
- [YOD-02] Yoder, P.: Mounting optics in optical instruments. 1. Auflage, Washington: SPIE Press, 2002
- [ZAP-04] Zappe, H.: Laser Diode Microsystems. 1. Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2004
- [ZEI-03] Das konfokale Laser Scanning Mikroskop. Firmenschrift Carl Zeiss Jena GmbH, 2003
- [DIN 16920] DIN 16920: Klebstoffe, Klebstoffbearbeitung, Begriffe. Ausgabe 1981
- [DIN 32565] Normentwurf DIN 32565: Fertigungsmittel der Mikrosystemtechnik – Schnittstelle zwischen Endeffektor und Handhabungsgerät. 2003
- [DIN 58390] DIN 58390: Umweltprüfung von optischen Geräten. Ausgabe 1991-12
- [VDI 2860] VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik. Ausgabe 1990

## **Ebene Keramikssubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme**

vorgelegt von Dipl.-Ing. Erik Beckert

1. Die zunehmende Miniaturisierung optischer Systeme, verbunden mit einer steigenden Funktionalität, die nur mit der Integration optischer und nichtoptischer Bauelemente (z.B. Elektronik, Aktoren) erreicht werden kann, stellt hohe Anforderungen an die Auswahl geeigneter Systemplattformen, auf denen derartige Systeme dicht gepackt sowie thermisch und langzeitstabil montiert werden können.
2. Ebene keramische Substrate aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics), die bereits zur Herstellung von elektronischen Schaltungsträgern verwendet werden, bieten sich als Systemplattform an. Die Keramiken besitzen eine sehr gute Steifigkeit bei einer geringen Dichte, einen niedrigen und an Silizium bzw. Glas angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten und eine in weitem Bereich wählbare thermische Leitfähigkeit. Dünn- oder Dickschichtverdrahtungen auf den Substraten stellen in Verbindung mit bestückten Komponenten elektronische Funktionalität zur Verfügung.
3. Zur Montage optischer Bauelemente auf keramischen Systemplattformen sind geeignete mechanische Strukturen zum Fassen der Bauelemente vorzusehen. Der im Rahmen der Arbeit entwickelte Ansatz sieht vor, diese Strukturen bereits während des Herstellungsprozesses unmittelbar in das keramische Substrat zu integrieren. Dazu werden bei mehrlagigen Substraten vorwiegend die Einzellagen im Grünzustand und bei einlagigen Substraten das fertig gesinterte Substrat mechanisch strukturiert.
4. Die im ebenen Substrat integrierten Strukturen dienen als Auflagekanten und –ebenen zur lateralen und als Anschlagkanten, -ecken und –ebenen zur axialen Lagebestimmung der einzelnen Bauelemente bezüglich des parallel und nah zur Substratoberfläche verlaufenden Strahlengangs eines freiraumoptischen Systems.
5. Die einfache und kostengünstige Variante der Positionierung optischer Bauelemente, indem diese gegen die als mechanische Anschläge dienenden Fassungsstrukturen angelegt werden, ist in der erreichbaren Genauigkeit durch die Fassungs- und Bauelementtoleranzen, die Geometrie der Paarung sowie durch den Positioniervorgang begrenzt.
6. Der Einfluss der Geometrie der Paarung wurde analytisch anhand von Modellrechnungen charakterisiert. Stark gekrümmte Anschlaggeometrien ( $R < 5 \text{ mm}$ ) am optischen Bauelement verstärken den Einfluss von Fassungs- und Bauelementtoleranzen.
7. Bei Mehrlagensubstraten wurden Genauigkeiten der Fassungsstrukturen im Bereich  $\pm 30 \text{ }\mu\text{m}$  bis  $\pm 90 \text{ }\mu\text{m}$ , bei Einlagensubstraten im Bereich  $\pm 21 \text{ }\mu\text{m}$  bis  $\pm 27 \text{ }\mu\text{m}$  nachgewiesen. Der Positioniervorgang selbst wurde beispielhaft als  $\pm 11 \text{ }\mu\text{m}$  genau charakterisiert, während die Bauelementtoleranzen bei Standardkomponenten bis zu  $\pm 25 \text{ }\mu\text{m}$  und mehr betragen können.
8. Werden höhere Genauigkeiten benötigt, können die optischen Bauelemente in der Fassungsstruktur justiert werden, zum Beispiel bezüglich der optischen Funktion. Ein geeigneter Fügehilfsstoff (z.B. Klebstoff) überbrückt dann den entstehenden Justierspalt. Hier wurden erreichbare Justiergenauigkeiten von  $\pm 5 \text{ }\mu\text{m}$  und kleiner nachgewiesen. Die auf dem Substrat bestückte Elektronik kann dabei die Ansteuerung optoelektronischer Bauelemente übernehmen und die zur Justierung notwendigen Messsignale generieren.
9. Als Fügeverfahren kommen vorwiegend das Kleben und in Zukunft auch das Laserstrahllöten auf dickschichttechnologisch strukturierten Benetzungsflächen des Substrats und metallisierten Oberflächen der optischen Bauelemente zum Einsatz.