

# Laserstrahllöten – Technologie zum Aufbau optischer Systeme

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt dem Rat der Physikalisch-Astronomischen Fakultät  
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Dipl.-Ing. Henrik Banse

geboren am 05.05.1969 in Jena

### Gutachter

1. Prof. Dr. A. Tünnermann

2. Prof. Dr. U. Glatzel

3. Prof. Dr. R. Theska

Tag der letzten Rigorosumsprüfung: 10.02.2005

Tag der öffentlichen Verteidigung: 10.05.2005

# Inhalt

1	Einleitung .....	7
2	Stand der Technik.....	9
2.1	Montage optischer Systeme.....	9
2.2	Laserstrahllöten .....	19
2.2.1	Laserstrahllöten Prozessmodell / Einflussparameter.....	19
2.2.2	Lotzufuhr .....	22
2.2.3	Lotwerkstoffe .....	23
3	Grundlagen der Technologieentwicklung .....	28
3.1	Applikation durch den Sputterprozess .....	28
3.2	Laserstrahllötechnologie .....	30
3.2.1	Energieeinkopplung.....	30
3.2.2	Wärmeausbreitung.....	33
3.2.3	Thermomechanische Simulationen - Modellbildung.....	34
3.2.4	Pyrometrische Temperaturmessung .....	37
4	Systemtechnik .....	40
4.1	Vakuumbeschichtung .....	40
4.2	Laserstrahllöanlage.....	41
4.3	Geräte und Methoden der Charakterisierung .....	46
5	Technologieentwicklung .....	48
5.1	Optische Bauelemente.....	48
5.2	Thermomechanische Simulationen .....	49
5.3	Metallisierung - Lotapplikation.....	55
5.3.1	Einstellen der Legierungszusammensetzung gesputterter Lotschichten .....	57
5.3.2	Strukturierung.....	65

---

5.4	Strahl- und Prozessparameter .....	66
5.5	Charakterisierung von Lötverbindungen .....	69
5.5.1	Gefüge .....	70
5.5.2	Festigkeit .....	74
5.5.3	Vakuumdichtheit .....	75
5.5.4	Ebenheitsuntersuchungen .....	76
5.5.5	Transmission .....	77
5.5.6	Stabilität bei thermischer und mechanischer Wechselbelastung.....	78
6	Applikationen .....	80
6.1	Spiegelsystem .....	80
6.2	Ablenkbaustein .....	84
6.3	Klebstofffreie Montage .....	90
7	Zusammenfassung .....	92
8	Literatur .....	94

## Formelzeichen und Symbole

A	Fläche
$A_F$	absorbierende Fläche
$A_{\text{Pyrometer}}$	Pyrometermessfläche
$\alpha$	lineare Absorptionskoeffizient
$a_i$	Stoffmengenanteil
$\beta$	Einfallswinkel
b	Konstante
$c_0$	Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum
$c_m$	spezifische Wärme
$\sigma$	Strahlungskonstante
$\Delta$	Laplace Operator
d	Dicke
$d_F$	charakteristische Linearabmessung
$\varepsilon$	Emissionsgrad
$E_0$	Sublimationsenthalpie
h	Plancksches Wirkungsquantum
I	Intensität der Strahlung
$I_0$	Intensität der Strahlung an der Oberfläche
$\kappa$	Absorptionsindex
k	Stefan Boltzmann Konstante
K	Abschwächungskonstante
$k_w$	Temperaturleitfähigkeit
[K]	Leitfähigkeitsmatrix
$\lambda$	Wellenlänge
$\lambda_{\text{Laser}}$	Wellenlänge der Laserstrahlung
$\lambda_{\text{max}}$	Maximum der Wellenlänge
$\lambda_0$	Wellenlänge im Vakuum
$\lambda_{\text{Wärmestrahlung}}$	Wellenlänge der Wärmestrahlung
$\lambda_w$	Wärmeleitfähigkeit
$l_\alpha$	Absorptionslänge
n	optische Brechzahl
$n^*$	komplexer Brechungsindex
$\Pi$	Energieausdruck
P	Strahlungsleistung
$P_A$	Leistung der absorbierten Strahlung
$P_{\text{mittel}}$	mittlere Laserleistung
$P_o$	Leistung der auftreffenden Strahlung
$P_R$	Leistung der reflektierten Strahlung
$P_S$	Leistung der Temperaturstrahlung
$P_{WL}$	Leistungsverluste durch Wärmeleitung
$P_t$	Leistung der transmittierten Strahlung
$P_V$	Peak to Valley Wert
Q	Wärmemenge

---

$q$	Wärmestromdichte
$\{q\}$	Lastvektor
$s$	Standardabweichung
$S_1$	Hauptspannungskomponente
SEQV	Vergleichsspannung
$t$	Zeit
$T$	Temperatur
$T_S$	Schmelztemperatur
$T_{\max}$	maximale Temperatur
$v$	Geschwindigkeit
$V$	Volumen
$W$	Leistungsdichte
$V_A$	Wechselwirkungsvolumen
$Y$	Sputterausbeute
$Y_i$	Sputterausbeute der reinen Komponente
$Y_{\text{tot}}$	totale Sputterausbeute einer Legierung
$\zeta$	Dichte

# 1 Einleitung

Bei der Herstellung optischer und optoelektronischer Systeme tritt die Forderung nach einer erhöhten Integrationsdichte immer stärker in den Vordergrund. Gleichzeitig wachsen die Anforderungen an die Beständigkeit und Langzeitstabilität hybrider Systeme. Hohe Präzision im Mikrometerbereich (resp. im Bereich von Winkelsekunden), geringe thermische und mechanische Bauteilbelastung bei gleichzeitig akzeptablem wirtschaftlichen Herstellungsaufwand stellen die bestimmenden Kriterien der Aufbau- und Verbindungstechnologie dar. Für die Mikrooptik, als eine Grundvoraussetzung für die Informations- und Kommunikationstechnik, sind anzuwendende Technologien und automatisierbare Fertigungsverfahren jedoch noch nicht in dem Maße erarbeitet, wie es in der Mikroelektronik der Fall ist [Agenda 00].

Bei der Montage hybrider optischer Systeme müssen verschiedene Teilprozesse in der Gesamtheit betrachtet werden, insbesondere die Toleranzkette. Von signifikantem Einfluss ist vor allem das Greifen und Handhaben, das Justieren sowie das Fügen. Nur durch exakte Adaption jedes Teilprozesses ist der Aufbau hochwertiger optischer Systeme möglich, die spezifische Anforderungen erfüllen.

Als etablierte Fügeverfahren existieren im Rahmen der Montage hybrider optischer Systeme gegenwärtig vor allem das mechanische Fassen/Klemmen und Kleben. Das Justierkleben hat sich auf Grund der hohen Flexibilität und der Kosten als Fügeverfahren durchgesetzt. Bestehende Lösungen sind jedoch unter einigen Gesichtspunkten nicht ausreichend. So werden optische Systeme hauptsächlich auf Grund der Eigenschaften der verwendeten organischen Klebstoffe (Polymere) in der Anwendung beschränkt. Vor allem in Bezug auf Anforderungen bezüglich der Feuchtestabilität, UV-Beständigkeit, Temperaturwechselbelastung und Langzeitstabilität ist die Entwicklung neuer Fügeverfahren erforderlich.

Das Laserstrahllöten stellt ein alternatives Fügeverfahren dar, da es eine berührungslose, anpassungs- und automatisierungsfähige Fügeverfahrenstechnologie ist. Durch eine geregelte Prozessführung verbunden mit einem lokal eng begrenzten und zeitlich definierten Energieeintrag wird die Belastung der Bauteile im Fügeprozess minimiert, was besonders für sprödharte Materialien von Bedeutung ist. Durch Eigenschaften der Lötverbindungen wie Temperaturbeständig-

keit, Festigkeit und Beständigkeit gegenüber Laserstrahlung können die Anwendungsbereiche optischer Systeme deutlich erweitert werden.

Laserstrahllöten ist vor allem im Bereich der Halbleiterindustrie eine etablierte Verbindungstechnologie [Bosse 03], [Berkowitz 97]. Es dominieren bleihaltige Weichlotsysteme. Auf Grund der internationalen Marktentwicklung und Aspekten des Umwelt- und Arbeitsschutzes unternehmen Industrie und Institute verstärkt Aktivitäten zum Übergang zu einer bleifreien Verbindungstechnik, unter Verwendung von eutektischen Sn-basierenden Systemen. Die sehr geringen Toleranzen optischer und elektrooptischer Systeme und Module erfordern jedoch den Einsatz von, im Vergleich zu elektrischen Anwendungen, wesentlich widerstandsfähigeren Lotlegierungen, um eine ausreichende Langzeitstabilität der justierten Einzelbauteile zu gewährleisten. Für Legierungen mit geringem Kriechverhalten, hoher Festigkeit und Temperaturstabilität ( $T_S > 230 \text{ °C}$ ) existieren zum AuSn-System kaum Alternativen [Elger 03].

Die Einstellung der eutektischen 80/20 wt% Au/Sn Zusammensetzung stellt beim Einsatz des Lotsystems die größte Herausforderung dar. Durch Einsatz eines Sputterverfahrens soll das Lot in der eutektischen Zusammensetzung appliziert werden, was gleichzeitig die Herstellung von extrem dünnen und haftfesten Lotschichten erlaubt, die die Voraussetzung für hochpräzise und stabile Verbindungen bilden. Die Eignung des Verfahrens wird an Demonstratoren miniaturisiert optischer Systeme eruiert.

Das 80Au20Sn-Lot ist in seinen mechanischen Eigenschaften nur gering duktil und besitzt eine Fließgrenze bei Raumtemperatur von 275 MPa. Dadurch sind AuSn-Lötverbindungen nur begrenzt in der Lage, Spannungen aufzunehmen, die auf Grund von unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten hybrider Systeme während des Lötprozesses entstehen. Diese Spannungen sind insbesondere für sprödharte Materialien kritisch und werden im Vorfeld durch angepasste Methoden der FEM-Simulation abgeschätzt sowie durch eine geeignete Strahlformung und Auswahl der Werkstoffpaarung minimiert.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Füge-technologien auf der Basis des Laserstrahl löten unter Anwendung extrem dünner Lotschichtsysteme untersucht, die die präzise und langzeitstabile Verbindung von hybriden optischen Mikrosystemen ermöglichen. Eingesetzt werden AuSn-Lote.



## 2 Stand der Technik

### 2.1 Montage optischer Systeme

Optische Systeme können durch monolithische, d. h. stoffkohärente Integration von Funktionselementen unter Nutzung kompatibler Herstellungsverfahren oder hybride Integration, modular aus einzelnen Subsystemen hergestellt werden. Auf Grund der vielfältigen Anforderungen lassen sich nur wenige Optiksyste­me, wie z. B. Wellenleiteroptiken, rein monolithisch herstellen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden hybride optische Systeme mit Abmessungen der Funktionselemente: Höhe < 30 mm, Länge/Breite < 150 mm betrachtet.

Die einzelnen Komponenten, wie z. B. optische Funktionselemente, Fassungen und Substrate, sind in sich funktionell optimiert und werden auf Basis unterschiedlicher Fertigungsprozesse und Materialien hergestellt. Die Integration der Einzelkomponenten zu einem hybriden System erfolgt durch Technologien der Montage [Hesse 96]. Der Montageprozess lässt sich allgemein in die Teilaufgaben Magazinieren und Zuführen der Komponenten, Greifen und Handhaben, Justieren sowie dem Fügen der Einzelkomponenten zur Baugruppe in der definierten Position gliedern (Bild 2-1).

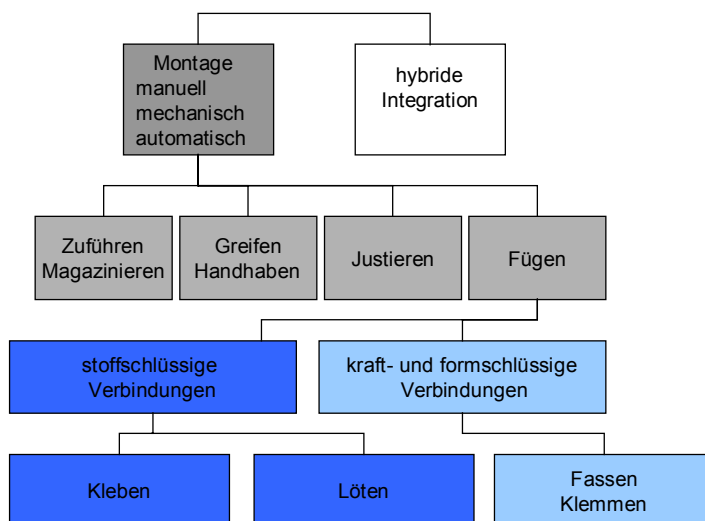



Bild 2-1 Teilprozesse der Montage

Die klassische Aufbautechnik optischer Systeme beruht auf dem Prinzip die optischen Einzelkomponenten separat zu fassen, zu justieren und zu fügen (Tab 2-1).

Tabelle 2-1 Klassische Aufbautechnik optischer Systeme

Klassische Aufbautechnik	Vorteile	Nachteile
 <ul style="list-style-type: none"> <li>- metallisches Chassis/ Gehäuse</li> <li>- optische Bauelemente in separaten, justierbaren Fassungen</li> <li>- Fügeverbindungen durch mechanisches Klemmen und Kleben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- optische Bauelemente in separaten, meist einzeln justierbaren Fassungen</li> <li>- klassische Bearbeitungstechnik</li> <li>- Austauschbarkeit von einzelnen Komponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Langzeit- und Temperaturstabilität in der Regel kritisch</li> <li>- aufwendige, manuelle Justage der einzelnen Bauelemente</li> <li>- durch Fertigungstechnik begrenzte Strukturgenauigkeit</li> </ul>

Als Fügeverfahren für optische Bauelemente existieren das Paaren (Kombinieren) und gemeinsames Fassen, Versprengen, Feinkitten (Kleben) und Löten [Grünwald 85].

Beim Fassen wird das optische Bauteil durch Kraft- oder Formschluss in einer definierten Position fixiert und ggf. zusätzlich, z. B. durch Klebstoff, gesichert. Rundoptiken werden in rohrförmigen Fassungsteilen durch beiderseitige Auflage schmaler Randzonen der ebenen oder gekrümmten optisch wirksamen Fläche gehalten und montiert. Prismatische Optikteile werden vorzugsweise an ebenen Flächen durch mechanisches Klemmen, meist in Verbindung mit Schrauben- und Federelementen sowie speziellen Anlagestrukturen befestigt. Die geringe Druck- und noch geringere Zugfestigkeit optischer Materialien ist von signifikanter Bedeutung für die Art der Krafteinleitung. Auflageflächenelemente, die mit großen Kräften auf kleine Flächen drücken, können leicht Aussprünge oder eine Zerstörung des optischen Bauteils verursachen. Die auf Grund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten von optischem Material und Werkstoff der Fassung bzw. des Klemmelements bei Temperaturänderung auftretenden Spannungen sind unter diesem Gesichtspunkt zu berücksichtigen [Naumann 92]. Auf Grund der Fertigbarkeit sind die einzelnen mechanischen Elemente nur bedingt miniaturisierbar. Die Genauigkeit der Aufnahmestrukturen hängt wesentlich von der Genauigkeit des Herstellungsverfahrens ab. Toleranzen von 10 µm bis 20 µm sind mit gebräuchlichen spanenden Fertigungsverfahren realisierbar. Für Systeme höchster Präzision kann die Genauigkeit durch Einsatz aufwendigerer Fertigungsverfahren (Bsp. Ultrapräzisionsbearbeitung, Siliziumtechnologie) oder Nachbearbeitung im fixierten Zustand (Bsp. Füllfassungen mit Justierdrehen der Einzelfassungen) erhöht werden. Hauptdefizit der Technologie ist die Langzeitstabilität, da

kraftschlüssige Verbindungen hybrider Systeme nur begrenzt in der Lage sind, eine hochgenaue Bauteilposition bei Temperaturwechselbelastung oder mechanischer Schwingungsbeanspruchung zu halten. Ursache sind die fehlende Temperaturkompensation bzw. der Einfluss von Schwingungen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von Festkörpern. Weitere Probleme bestehen darin, dass eine definierte Krafteinleitung in eine Richtung, d. h. orthogonal zur Reibfläche nicht möglich ist, dass meist eine manuelle Vormontage der zu fixierenden Bauteile erforderlich ist und dass der Verschleiß durch Festkörperkontakt zu Kontamination der Optikflächen führen kann.

Als Versprengen bezeichnet man das Fügen fertiger Optikbauteile zu einer Baugruppe ohne Fügemitel. Die gereinigten und polierten Fügeflächen gleichen Radius haften durch Molekularkräfte. Versprengte Optikbaugruppen sind extrem anfällig gegenüber Stoßbelastung. Je nach Einsatztemperatur dürfen die linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der zu versprengenden Gläser nur einen Unterschied  $\leq 2 \exp -6 \text{ K}^{-1}$  aufweisen. Das Versprengen wird hauptsächlich für prismatische Optikteile eingesetzt [Grünwald 85].

Kleben ist definiert als das Fügen gleicher oder ungleicher Werkstoffe unter Verwendung eines Klebstoffes. Nach DIN 8593-8 ist ein Klebstoff ein nichtmetallischer Stoff, der Fügebauteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann. Ein besonderes Kriterium für das Verhalten von Klebungen optischer Komponenten ist der im Vergleich zu den Klebstoffen sehr niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der optischen Materialien. Das kann zu erheblichen Spannungen in der Klebefuge führen, sowohl während eines möglichen Schwindungsprozesses im Verlauf der Aushärtung als auch durch spätere schockartige Temperaturbeanspruchung [Habenicht 90].

Für die Montage optischer Systeme wird hauptsächlich das Fügeverfahren Kleben angewendet. Als gebräuchliche Klebstoffe für Optikkomponenten haben sich thermisch induziert härtende sowie lichthärtende (UV-härtende) Systeme auf Basis von z. B. Epoxiden oder Acrylaten durchgesetzt. UV-härtende Systeme werden zur schnellen Fixierung der Justierung hybrider Systeme auf Grund der Härtemechanismen bevorzugt, wenn im Rahmen der Montage hochgenaue Justierschritte erforderlich sind. Tabelle 2-2 zeigt ausgewählte physikalische Kennwerte dieser Systeme.

Besonders bei der Herstellung miniaturisierter Klebeverbindungen ist der Einsatz eines angepassten Optikklebstoffes für die Funktionsfähigkeit der Baugruppe entscheidend. Basierend auf den Anforderungen der speziellen Applikation müssen Klebstoffe nach Kriterien, wie z. B. E-Modul, Viskosität, Temperaturfestigkeit und Volumenschwund ausgewählt oder neu entwickelt werden. Bedingt durch ihre Eigenschaften sind organische Klebstoffe für Anwendungen mit hoher UV- oder Laserstabilität nur begrenzt geeignet. In feuchten Umgebungsbedingungen sind Klebstoffe nicht langzeitstabil [Schmidt 03].

Tabelle 2-2 physikalische Kennwerte optischer Klebstoffe [Yoder 02]

Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha$ 27 °C bis 100 °C 100 °C bis 200 °C	$63 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ $56 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Scherfestigkeit	35 MPa
E-Modul	4,275 GPa
Wasseraufnahme (bulk material)	0,3 % nach 24 h bei 25 °C
Schrumpf während des Aushärtens	ca. 4 %
Viskosität	275 cP bis 320 cP
Dichte	1,22 g/cm <sup>3</sup>

Löten wird nach DIN 8505 Teil 1 als ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen definiert, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder Diffusion (Diffusionslöten) entsteht. Dabei wird die Solidustemperatur des Grundwerkstoffes nicht erreicht. Der Zusatzwerkstoff beim Löten ist in der Regel nicht artgleich aufgebaut. Der Lötvorgang selbst stellt einen komplexen physikalisch-chemischen Prozess dar. Durch Wechselwirkung des Lotes als Zusatz mit dem Grundwerkstoff entsteht eine stoffschlüssige nichtlösbare Verbindung. Die Verbindungszone wird durch die physikalischen Wechselwirkungen der Adhäsion, chemische Reaktionen, der Diffusion und Gefügeumwandlungen mit Bildung neuer Phasen, mechanischen Verklammerungen im submikroskopischen Bereich infolge inhärenter Aufrauung und inneren Spannungen infolge von Temperaturänderungen beeinflusst. Die durch den Lötvorgang realisierte Verbindung ist im makroskopischen Aufbau und in der Beschaffenheit inhomogen. Es bilden sich Zonen un-

---

vermischten Lotes, Übergangsbereiche mit Diffusionszonen sowie thermisch beeinflusste Bereiche im Grundwerkstoff aus [Kreutzburg 97].

Die Haupteinteilung der Lötverfahren erfolgt nach der Liquidustemperatur des Zusatzwerkstoffes:

Weichlöten - Liquidustemperatur unterhalb 450 °C

Hartlöten - Liquidustemperatur oberhalb 450 °C

Hochtemperaturlöten - Liquidustemperatur oberhalb 900 °C unter Luftabschluss

Lötverfahren können weiterhin durch die Art der Energiequelle (Wärmezuführung) unterschieden werden [DIN 8505 Teil 2]. Das Laserstrahllöten ordnet sich als Verfahrensvariante Löten durch Strahl neben Verfahren wie Elektronenstrahl- oder Lichtstrahllöten ein. Die zum Löten notwendige Temperatur wird durch den vom Werkstück absorbierten Strahlanteil der von der Laserquelle erzeugten hochenergetischen, monochromatischen Lichtstrahlung erzeugt. Es kann an Luft mit Flussmittel sowie im Schutzgas oder Vakuum gelötet werden [DIN 8505 Teil 3].

Eine selektive Erwärmung ist beim Löten von optischen Bauelementen zu bevorzugen. Insbesondere spezielle optische Eigenschaften wie Brechzahlgradienten, angepasste Funktionsschichten oder spezielle Dotierungen sind gegenüber einer vollständigen Bauteilerwärmung nicht beständig. Die an der Fugestelle auf Grund des unterschiedlichen Wärmeausdehnungsverhaltens entstehenden Spannungen müssen aber auch bei einer lokal begrenzten Erwärmung berücksichtigt werden. Das Laserstrahllöten stellt eine Möglichkeit des selektiven Energieeintrags dar.

Der Einsatz von Laserstrahlötverfahren in der Optik / Optoelektronik ist gegenwärtig noch nicht etabliert. In der Literatur werden in erster Linie die Montage von elektrooptischen Flip-Chip-Komponenten auf Substraten sowie das Fixieren von Glasfasern beschrieben. So erläutert [Althaus 98] ein Modul zur Ankopplung eines Diodenlasers an eine Faser (Bild 2-2). Laser- und Monitor-Chip sind in einem hermetisch abgeschlossenen Gehäuse separiert. Die Fertigungs- und Testmethoden der Baueinheit werden im Wafermaßstab realisiert. Zum hochgenauen Verbinden der mikrooptischen Konstruktionselemente wurde das Laserstrahllöten mittels einer  $< 4 \mu\text{m}$  dicken AuSn Lotschicht angewandt. Es konnten Lagetoleranzen durch den

Lötprozess  $< 1 \mu\text{m}$  sowie eine mechanische Stabilität der Verbindung mit Toleranzen  $< 0,1 \mu\text{m}$  erzielt werden.

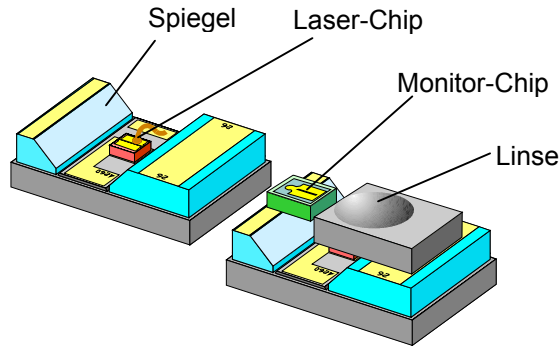
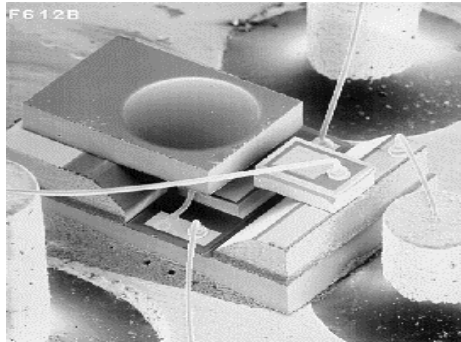
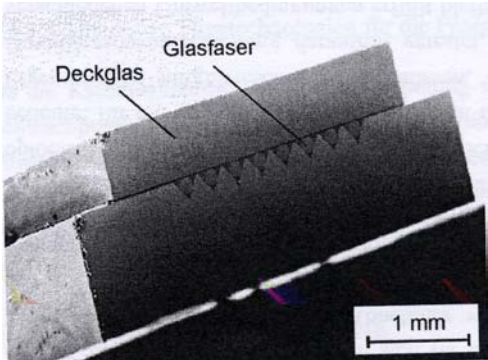

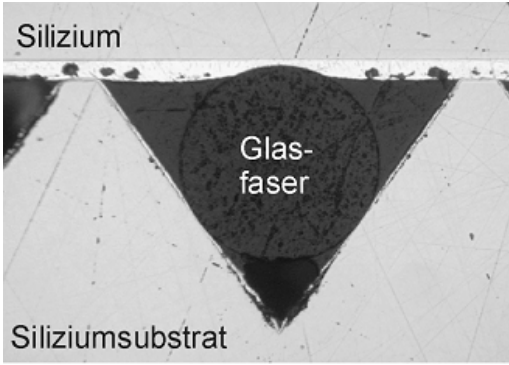
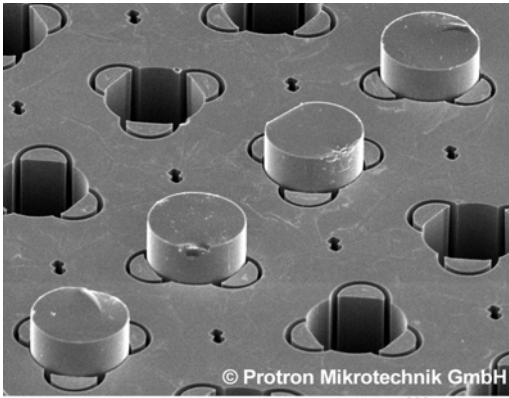
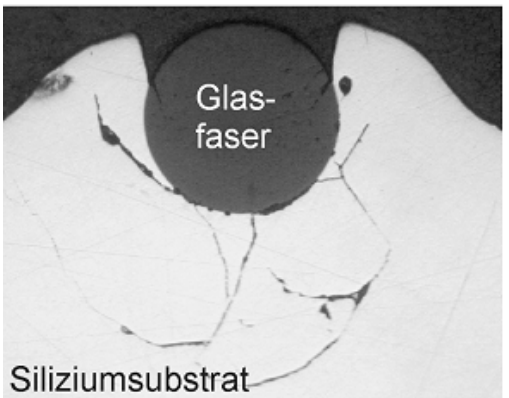


Bild 2-2 Laser- und Monitorchip des faseroptischen Moduls [Althaus 98]

Am Beispiel der Ankopplung von Glasfasern an elektrooptische Bauteile, d. h. der Fixierung von Glasfasern vorzugsweise in strukturiertem Silizium soll ein Vergleich der Fügeverfahren durchgeführt werden. Charakteristische Merkmale sowie Vor- und Nachteile der Fügeverfahren werden in Tabelle 2-3 erläutert.

Tabelle 2-3 Fügeverfahren zum Fixieren von 125  $\mu\text{m}$  Singlemode-Glasfasern

Technologie	Vorteil	Nachteil
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kleben der Fasern in V-Nuten,</li> <li>- UV-härtender Klebstoff</li> </ul>  <p>Quelle [Kauffmann 02]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Genauigkeit geätzter V-Nuten <math>\pm 0,2 \mu\text{m}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Feuchtigkeit und Temperatur als Hauptausfallursache</li> <li>-dünne Klebstoffschichten mit großem Oberfläche/Volumenverhältnis erhöhen den Einfluss der Umgebungsbedingungen</li> <li>- Dejustage durch Kriechvorgänge im Klebstoff</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kleben der Fasern in U-Nuten</li> <li>- UV-härtender Klebstoff</li> </ul>  <p>Quelle Alcatel SEL</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Koppelverluste <math>&lt; 0,5 \text{ dB}</math>, Versatz max. <math>0,2 \mu\text{m}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- radialer Versatz von <math>2 \mu\text{m}</math> führt zu <math>0,8 \text{ dB}</math>, Kippung um <math>2^\circ</math> zu <math>0,67 \text{ dB}</math> Dämpfungserhöhung [Kauffmann 02]</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nd:YAG-<b>Laserstrahl</b>löten</li> <li>Silizium-V-Nutenträger und Deckplatte metallisiert</li> <li>- AuSn-Lotdepot galvanisch aufgebracht</li> </ul>	 <p>Quelle [Kauffmann 02]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Auszugsfestigkeit der Glasfaser 5 N</li> <li>-Koppelverluste &lt; 0,4 dB</li> <li>-klebstofffrei</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faser nicht metallisiert</li> <li>-keine stoffschlüssige Verbindung</li> <li>-keine Aussagen zu Langzeitstabilität</li> <li>- keine industrielle Anwendung bekannt</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- mikro-mechanische <b>Klemm-strukturen</b> zur Zentrierung der Fasern</li> <li>- Siliziumplatte mit Durchführungen</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-hochgenaue Positionierung der Fasern</li> <li>-Toleranzen &lt; 500 nm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Kraftschlüssige Verbindungen</li> <li>- keine Angaben zu Auszugsfestigkeiten und Koppelverlusten</li> <li>- keine industrielle Anwendung bekannt</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Laserstrahl-klemmen / Schweißen</b></li> <li>-Absorption der Nd:YAG-Strahlung im Silizium</li> <li>- Klammern der Faser durch Aufwürfe beim Erstarren</li> </ul>	 <p>Quelle [Kauffmann 02]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Koppelverluste <math>\leq 0,4</math> dB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Auszugsfestigkeit &lt; 1 N erfordert zusätzliche Fixierung der Faser</li> <li>- Lagetoleranzen bis zu 4 µm</li> <li>- Rissbildung im Silizium</li> <li>- keine industrielle Anwendung bekannt</li> </ul>

Um die vorgestellten Varianten zu bewerten, sind die optischen Eigenschaften Eigendämpfung, Rückflussdämpfung und polarisationsabhängige Dämpfung nach mechanischen und klimatischen Prüfungen sowie die Auszugsfestigkeit zu quantifizieren. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass diese Werte nicht vollständig untersucht oder veröffentlicht sind. Es wird jedoch deutlich, dass die Hauptdefizite der etablierten Klebetechnologie die Zuverlässigkeit

und Langzeitstabilität sind [Kauffmann 02] und sich die weiteren vorgestellten Füge-technologien noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden. Ein potentieller Lösungsansatz, teilweise vergleichbar mit den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, beschreibt [Hoult 02]. Unter Verwendung einer auf einem Diodenlaser basierenden Laserstrahl- lötechnologie werden Singlemode-Glasfasern stabil auf einem Substrat fixiert (Tabelle 2-4). Eingesetzt werden jedoch relativ große Lotmengen in Form von Lotpreforms. Eine industrielle Anwendung des Verfahrens ist gegenwärtig ebenfalls nicht bekannt.

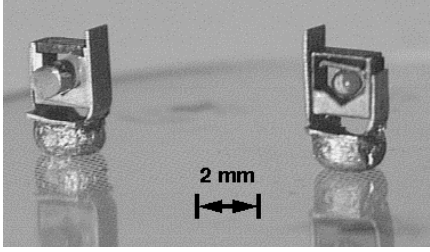
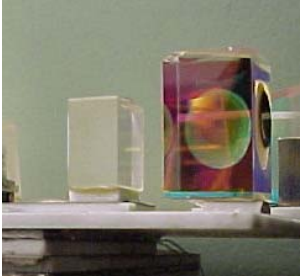
Tabelle 2-4 Laserstrahl- lötechnologie zum Fixieren von 125 µm Singlemode-Glasfasern

Technologie	Vorteil	Nachteil
<p>- <b>Laserstrahl- löten</b> mit Diodenlaser, eutektische 80Au20Sn Preforms.</p> <p>- Au-metallisierte Fasern auf Au-beschichteten Substraten</p> <div data-bbox="440 857 948 1182" style="text-align: center;"> </div> <p>Quelle [Hoult 02]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- reproduzierbar qualitativ hochwertige Lötverbindungen</li> <li>- sehr fein lamellar ausgeprägte eutektische Mikrostruktur</li> <li>- klebstofffrei</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Angaben zur Charakterisierung</li> <li>- große Lotmengen bedingen eine hohe Spannungsbelastung</li> <li>- keine industrielle Anwendung bekannt</li> </ul>

Es existieren weiterhin auf Lötprozessen basierende spezielle Montagetechnologien für ausgewählte optische Systeme einzelner Firmen, wie die plattformbasierenden Aufbauvarianten in Form der Konzepte der Firmen Leica und Coherent (Heißeleiterlöten) (Tabelle 2-5). Die Lösungen zeigen den Trend, optische Komponenten auf einer stabilen Basis durch Löten zu integrieren. Insbesondere das TRIMO-Prinzip [Würsch 00] verdeutlicht die Möglichkeit, die Laserstrahl- lötechnologie zum Aufbau präziser optischer Systeme zu nutzen.



Tab. 2-5 Planare Aufbaukonzepte optischer Systeme basierend auf Lötprozessen

TRIMO-SMD	Vorteil	Nachteil
<p><b>Laserstrahllöten</b> durch teildurchlässiges Substrat</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ebenes Substrat (Pyrex), matrixförmig metallisiert</li> <li>- universeller Optikhalter mit Lotbump</li> <li>- Pb-haltiges Lot</li> </ul> <div style="text-align: center;">  <p>[Quelle: Leica Geosystems]</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gute Positioniergenauigkeiten erreichbar (ca. 1 µm)</li> <li>- Justage in 6 Freiheitsgraden und großem Justierbereich möglich</li> <li>- für kleine und mittlere Stückzahlen geeignet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- immer mit aktiver Justage verbunden</li> <li>- erfordert Vorkonfektionierung der Optikhalter</li> <li>- Fixierung im Optikhalter durch Klemmen oder Kleben</li> <li>- keine flussmittelfreie Prozessführung</li> </ul>
<p><b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substrate</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Löten oder Kleben</b> der Stapel</li> <li>- ebenes Substrat (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dickschicht-metallisiert</li> <li>- spezielle Optik-“fassungen“ über verschieden hohe Keramikstapel</li> <li>- Pb-haltiges Lot</li> </ul> <div style="text-align: center;">  <p>[Quelle: Coherent Inc.]</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektronik hybrid integrierbar</li> <li>- Justage mit Freiheitsgrad 6 möglich</li> <li>- für kleine und mittlere Stückzahlen geeignet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- einseitige Fassung der optischen Elemente</li> <li>- immer mit aktiver Justage verbunden</li> <li>- möglicherweise instabil durch bezüglich der optischen Achse asymmetrischen Aufbau</li> </ul>

Insgesamt wird deutlich, dass ein direkter Vergleich der Fügeverfahren Fassen/Klemmen, Kleben und Laserstrahllöten auf Grund oft sehr produktspezifischer Entwicklungen optischer Systeme, die häufig kaum vergleichbare Genauigkeiten aufweisen, nur qualitativ möglich ist. Zusätzlich werden charakteristische Eigenschaften spezieller Klebstoffentwicklungen von der Industrie in der Regel nicht veröffentlicht.

Eine überwiegend qualitative Bewertung ausgewählter Kriterien der Fügeverfahren zeigt Tabelle 2-6. Basierend auf dieser leitet sich die Zielstellung der Arbeit ab.

Tabelle 2-6 Vergleich der Füge-technologien Kleben, Löten und Fassen

Kriterium	Kleben	Löten	Fassen/Klemmen
Langzeitstabilität gegenüber Wärme / Feuchte	begrenzt	dauerhaft	begrenzt
Alterungsverhalten	zeitlich begrenzt	dauerhaft, bedingt durch Kriechverhalten des Lotes	dauerhaft
Ausgleich mechanischer Spannungen bei $\Delta T$	möglich	teilweise möglich	teilweise möglich nicht reproduzierbar
Fügen im optischen Strahlengang	möglich	nicht möglich	nicht möglich
Realisierbarer minimaler Fügespalt	ca. 1 $\mu\text{m}$	ca. 3 $\mu\text{m}$ bis 4 $\mu\text{m}$	
Maximale Zug- bzw. Scherfestigkeit	20 MPa bis 35 MPa	Weichlote 3 MPa Hartlote ca. 100 MPa	u. a. abhängig von Klemmkraft, Haftreibungskoeffizient, Dauer und Art des Reibkontaktes
Reproduzierbarkeit des Fügeprozesses	gering	hoch	ausreichend
Lösen der Fügeverbindung	teilweise möglich	möglich	möglich
Volumentoleranz des applizierten Fügehilfsstoffes	groß	gering	
Verfügbarkeit der Technologie	etablierte Verfahren	im Entwicklungsstadium, partielle Anwendungen	etablierte Verfahren

Es bestehen Defizite der etablierten Füge-technologien vor allem bezüglich der Anforderungen an die Temperatur- und Feuchtebeständigkeit sowie der Langzeitstabilität optischer und elektrooptischer Verbindungen. Das Laserstrahllöten bietet unter dem Gesichtspunkt des implizierten zeitlich und räumlich definierten Energieeintrags sowie einer berührungslosen Prozessführung hervorragende Voraussetzungen für ein geeignetes Fügeverfahren. Deshalb soll eine auf dem Laserstrahl-lötprozess basierende neue Verbindungstechnologie zum Aufbau von hybriden optischen Systemen mit justierempfindlichen Bauelementen entwickelt werden. In der Literatur existieren verschiedene Konzepte zu dieser Thematik. Diese beschränken sich jedoch auf die Montage elektrooptischer Module oder konnten sich auf Grund bestehender Einschränkungen (vgl. Tabelle 2-3) nicht durchsetzen.

---

Ausgehend von einem theoretischen Modell soll anhand der Methode der Finiten Elemente (FEM) die Eignung des Laserstrahl­lötprozesses zum Aufbau hybrider optischer Systeme hinsichtlich der thermischen und mechanischen Belastung untersucht werden. Die zu entwickelnde Füge­technologie soll nachfolgend, insbesondere im Vergleich zur etablierten Füge­technologie Kleben, bei hoher Präzision langzeitstabilere, thermisch höhere belastbare und feuchtigkeitsresistente Verbindungen hybrider optischer Bauelemente ermöglichen. Die Verbindungstechnologie soll weiterhin, auf Grund der hohen Flexibilität des berührungslosen Fügeverfahrens die Möglichkeit der Adaption auf unterschiedlichste optische Systeme bieten und basierend auf einer hohen Reproduzierbarkeit die Voraussetzung für industrietaugliche Lösungen schaffen. Vakuumtaugliche miniaturisiert optische Systeme sollen durch Anwendungen der Verbindungstechnologie für UV- und EUV-Anwendungen qualifiziert werden.

## **2.2 Laserstrahl­löten**

### **2.2.1 Laserstrahl­löten Prozessmodell / Einflussparameter**

Der Laserstrahl definierter Leistung wird über die strahl­führende Optik auf dem zu fügenden Bereich des Bauteils über einen bestimmten Zeitraum abgebildet. Dieser Bereich wird durch den absorbierten Anteil der Laserstrahlung auf Löttemperatur erwärmt, der Lotwerkstoff aufgeschmolzen und das Lot benetzt die metallisierte Füge­fläche. Zur Unterstützung des Lötprozesses können Prozessgase eingesetzt werden.

Grundsätzlich bestimmen Energieeinkopplungsmechanismen, Wärmeleiteffekte und Fest-Flüssig-Grenzflächenreaktionen den Laserstrahl­lötprozess. Diese Prozesse sind sehr komplex und nur im Zusammenhang zu betrachten. Eine Untergliederung der Einflussfaktoren in strahl- und prozessseitige sowie bauteil- und werkstoffspezifische Parameter ist im Bild 2-3 dargestellt.

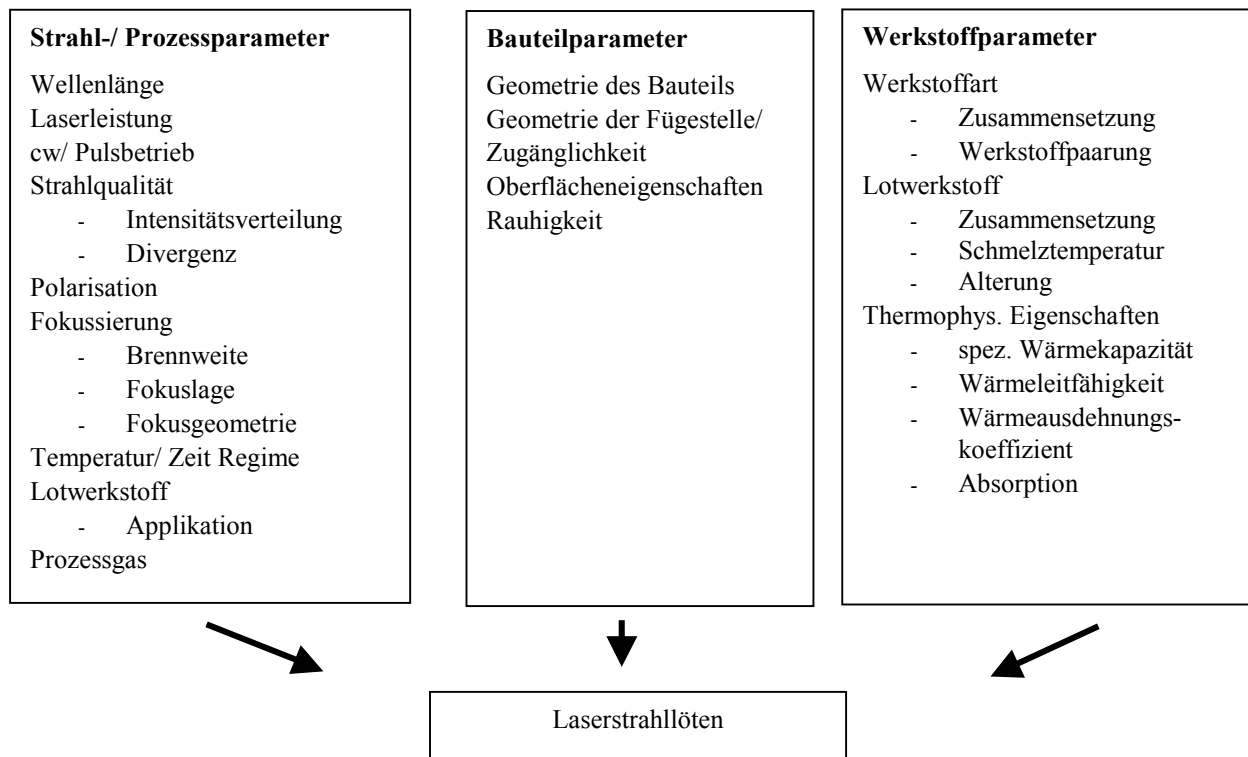


Bild 2-3 Einflussfaktoren des Laserstrahl­lötprozesses [Kreutzburg 97]

Die Wellenlänge, Laserleistung, Strahlqualität sowie bestimmte Fokussiermöglichkeiten stellen die Kennwerte der eingesetzten Laserstrahlquelle dar. Die Laserleistung bestimmt über den Fokussdurchmesser und die Fokusslage die Leistungsdichte und über das Temperatur / Zeit-Regime den Energieeintrag und somit das Temperaturfeld im Bereich der Verbindungszone. Die Ausbildung eines geeigneten Temperaturfeldes ist von signifikanter Bedeutung für das Benetzungs- und Fließverhalten des Lotes.

Gleichzeitig wird die für den Lötprozess maßgebliche Absorption der Laserstrahlung im Bauteil- und Lotwerkstoff durch die Parameter Wellenlänge, Strahleinfallswinkel, Polarisierung sowie durch werkstoffspezifische Absorptionskoeffizienten bedingt. Die Temperatur, der Oxidationszustand, die Rauigkeit der Oberfläche und möglicher Flussmittelauftrag beeinflussen den Absorptionskoeffizienten.

Die Werkstoffart der Fügepartner bedingt über eine gegenseitige Löslichkeit die Benetzung und Gefügeausbildung im Prozessablauf. Gleichzeitig werden durch die aus der Zusammensetzung resultierenden thermophysikalischen Eigenschaften die Wechselwirkungen und Bindefmechanismen im Bereich der Grenzfläche bestimmt. Von Bedeutung sind vor allem nicht-

umkehrbare Diffusionsvorgänge, die auf Grund der kurzen Strahl-Stoff-Wechselwirkungszeiten keinen Gleichgewichtszustand der Reaktionskinetik ermöglichen und zusätzlich durch Parameter wie Oxidschichten, Schmutz oder konzentrations- und ortsabhängige Diffusionskoeffizienten beeinflusst werden [Kreutzburg 97].

Einfluss auf ein für den Lötprozess optimal abgestimmtes Temperaturfeld haben die für die Wärmeleitung relevante Geometrieigenschaften von Bauteil und Fügestelle sowie die Zugänglichkeit (direkte oder indirekte Erwärmung) der Lötstelle. Eine indirekte Erwärmung ist insbesondere bei optischen Materialien möglich, da diese für Strahlung im Wellenlängenbereich der als Quellen verwendeten Löt laser weitestgehend transparent sind. Das Prozessgas beeinflusst im Wechselwirkungsbereich je nach Art des Gases Oxidations- und /oder Reduktionsvorgänge und über einen möglichen Gasstrom auch Wärmeabfuhr (Kühlung) von der Lötstelle.

Das Laserstrahllöten kann prinzipiell über verschiedene Bestrahlungskonzepte erfolgen. Im selektiven "Single Point"-Verfahren erfolgt die Bearbeitung sequentiell. Unter der Voraussetzung eines homogenen Laserstrahls mit plateau förmiger Strahlausbreitung wird eine gleichmäßige Leistungsdichte erreicht, die die erforderliche Temperaturverteilung innerhalb der Fügepartner gewährleistet [Hirt 00]. Konzepte zum simultanen Bestrahlen mehrerer Fügestellen oder zum Bestrahlen größerer Fügeflächen erfordern eine angepasste Strahlformungsoptik. Dadurch sind geringere Eigenspannungen der Lötverbindung der einzelnen Fügestellen bzw. der flächigen Verbindung möglich. Bei einer gezielten Anordnung kann weiterhin, unter der Voraussetzung der simultanen Erwärmung aller Fügestellen der Selbstjustageeffekt (durch die Oberflächenspannung des Lotes bewirkte Selbstzentrierung) [Kuhmann 97] zur Justierung ausgenutzt werden.

Ein wesentlicher Vorteil des Laserstrahl lötens besteht in der Möglichkeit der geregelten Prozessführung. Die sehr schnelle pyrometrische Temperaturmessung gekoppelt mit einem adaptiven Regler realisiert ein angepasstes Temperaturfeld im Bereich der Fügezone und minimiert somit die thermische Belastung der sensitiven optischen Bauelemente. In Zusammenhang mit einer optimalen Einstrahlung über variable Strahlformungskonzepte können qualitativ hochwertige und reproduzierbare Verbindungen hybrider optischer Systeme hergestellt werden. Aus diesem Gesichtspunkt leitet sich weiterhin ein hohes Automatisierungspotential der zu entwickelnden Verbindungstechnologie ab.

### 2.2.2 Lotzufuhr

Als typisches Reflow-Verfahren erfordert das Laserstrahllöten eine unabhängige Lotzufuhr und Lotaufbringung. Dafür existieren verschiedene Varianten:

- Zufuhr von Lotdraht während der Bestrahlung durch den Laser

Diese Verfahren erfordert eine sehr exakte Prozessführung. Die Synchronisation der Bestrahlung und der Lotzufuhr, Lotmenge, Laserleistung und Strahlverteilung sind entscheidend.

- Lotpaste über verschiedene Auftragsverfahren, z. B. Drucktechniken

Um Lötspritzer oder explosionsartiges Verdampfen des in der Lotpaste enthaltenen Flussmittels zu vermeiden, ist eine genaue Lötprozessführung erforderlich. Problematisch ist ein sich ändernder Emissionsgrad der Paste innerhalb des Lötprozesses. Zurückbleibende Verunreinigungen erfordern im Anschluss eine Reinigung der Lötstelle.

- Lotaufbringung über Lotdepot

Die Lotapplikation als Lotdepot kann in Form von Lotschichten, von Lotbumps oder Lotpreforms erfolgen. Bei der Applikation alternierender Schichtsysteme der einzelnen Lotlegierungselemente sind vor dem Lötprozess gelagerte Umschmelzvorgänge erforderlich. Es werden chemische (CVD - Chemical Vapour Deposition), elektrochemische bzw. physikalische Verfahren (PVD – Physical Vapour Deposition), wie z. B. Sputterprozesse, als Technologien der Schichtapplikation sowie Bumpingverfahren [PacTech 03] unterschieden. Das Aufsetzen von Preforms erfordert ein exaktes Positionieren und Fixieren der in einer großen Vielzahl an Formen und Größen erhältlichen Preforms. Insgesamt sind der Lotdepottechnik und der Flussmittelbereitstellung die gleiche Aufmerksamkeit für die Schaffung qualitativ hochwertiger Verbindungen zu widmen, wie der Bestrahltechnik durch den Laser [Rahn 00], [Hirt 00].

Im Unterschied zum Stand der Technik wird im Rahmen der Arbeit das direkte Sputtern von Lotschichtsystemen, bestehend aus Untermetallisierung und Lot, in einer Vakuumfolge untersucht. Durch dieses Verfahren ist es möglich, sehr dünne und haftfeste Systeme zu applizieren. Diese weisen eine sehr gleichmäßige, reproduzierbare Lotschichtdicke und Reinheit (ohne Verunreinigungen, Vermeidung von Oxidation) bei minimaler Lotmenge auf und bilden die Voraussetzung für hochpräzise Verbindungen.

### 2.2.3 Lotwerkstoffe

Bei der Wahl des einzusetzenden Lotwerkstoffes zählen erhöhte thermische und thermomechanischen Langzeitbelastungen zu den bestimmenden Faktoren. Hinzu kommen Anstrengungen aus ökologischen und gesundheitlichen Überlegungen eine bleifreie Verbindungstechnologie umzusetzen.

Bekannt ist weiterhin, dass thermische Ermüdungserscheinungen in gebräuchlicher PbSn-Lötverbindungen mit der Pb-reichen Phase verbunden sind [Hwang 00]. Auf Grund begrenzter Löslichkeit können Sn-Atome diese Pb-reiche Phase nicht effektiv verstärken. Bei Raumtemperatur führt die begrenzte Löslichkeit von Pb in der Sn-Matrix zu einer unzureichenden Verbesserung des plastischen Verhaltens der Lötverbindung. Bei thermomechanischen Wechselbelastungen neigt die Pb-reiche Phase zum Verspröden, was zur Rissbildung führen kann. Es wird erwartet, dass die Abwesenheit der Pb-Phase in einem Sn-basierendem Lot somit zu verbessertem mechanischem Verhalten auf Grund besserer Festigkeitseigenschaften des Lotes führt.

Von gesetzgeberischer Seite wird diese Entwicklung zusätzlich beschleunigt. So verabschiedete Japan ein Recycling-Gesetz für Haushaltgeräte und es bestehen Roadmaps verschiedener „bleifrei Organisationen“ zur Umsetzung bleifreier Verbindungstechniken und Produkte. Ähnliche Aktivitäten existieren in den USA und auch in der EU werden verschiedene Gesetzentwürfe diskutiert (WEEE-Direktive, ROS-Direktive, Auto-Eol-Direktive) bzw. bestehen länderspezifische Regelungen wie in Schweden, Norwegen oder Deutschland.

Prinzipiell gibt es aus materialwissenschaftlicher Sicht keine Alternativen zu Sn-basierenden Systemen. Grundlagen bilden die metallurgische Verbindungsfähigkeit zu bestehenden Substraten, die dynamischen Benetzungseigenschaften im Reflowprozess sowie die stofflichen Reaktionen und Gefügeausbildungen bzw. Legierungsbildungen der entsprechenden Elemente. Die Legierungsbildung sowie die Schmelzpunktniedrigung mit Sn sind in diesem Zusammenhang entscheidende Kriterien. Zur Auswahl stehen Elemente wie In, Bi, Ag, Cu, Zn, Au oder Sb. [White 99], [Hwang 00]. Mögliche Legierungen sind in Tabelle 2-7 zusammengestellt.

Tabelle 2-7 Alternative Grundmetalle zu Blei und deren Legierungen [Miric 99]

Element	Weltweite Produktion/ Kapazitätsreserve / 1000t	typische Zusammensetzung	T <sub>S</sub> / °C	Bemerkung
Ag	13/1,5	96,5Sn3,5Ag	221	gute Temperaturwechselbeständigkeit
Cu	8000/2200	95,5Sn4Ag0,5Cu 96,3Sn3,2Ag0,5Cu 95,5Sn3,8Ag0,7Cu 95Sn4Ag1Cu 99,3Sn0,7Cu	217 217 217 217 227	gute Temperaturwechselbeständigkeit bei hohen Temperaturen
Bi	4/4	58Bi42Sn 90Sn2Ag7,5Bi0,5Cu 91,8Sn3,4Ag4,8Bi	138 198 ... 212 200 ... 216	Niedrigtemperaturanwendungen, Bildung von niedrigschmelzenden Phasen bei 138 °C
Sb	78000/44000	95Sn5Sb 65Sn25Ag10Sb 96,7Sn2Ag0,8Cu0,5Sb	232 ... 240 230 ... 235 217 ... 220	hohe T <sub>S</sub> , toxisch, ähnliche Eigenschaften wie SnAgCu
In	0,1/0,1	52In48Sn 97In3Ag 77,2Sn20In2,8Ag	118 143 189	geringe Verfügbarkeit, In neigt zu Korrosion unter Feuchteinfluss, Bildung von niedrigschmelzenden InSn-Phasen bei 118 °C
Zn	6900/700	91Sn9Zn	199	anfällig gegenüber Oxidation und Korrosion
Au	niedrig	80Au20Sn	278	hohe T <sub>S</sub> , geringe Kriechneigung, hohe Festigkeit

Die Legierungszusammensetzungen müssen stets den spezifischen Einsatzbedingungen und Anforderungen angepasst werden. Für den Bereich der hochschmelzenden Lote mit T<sub>S</sub> > 230 °C existiert gegenwärtig mit AuSn, AuGe und SnSb nur eine geringen Anzahl von Alternativen [Herbert 00], [Adolphi 99].

Vor dem Hintergrund einer flussmittelfreien Prozessführung, der erforderlichen Präzision, Zuverlässigkeit und Temperaturstabilität wird in der Arbeit das eutektische System AuSn als Lotlegierung untersucht. Das binäre Phasendiagramm des Systems AuSn ist in Bild 2-4 dargestellt.



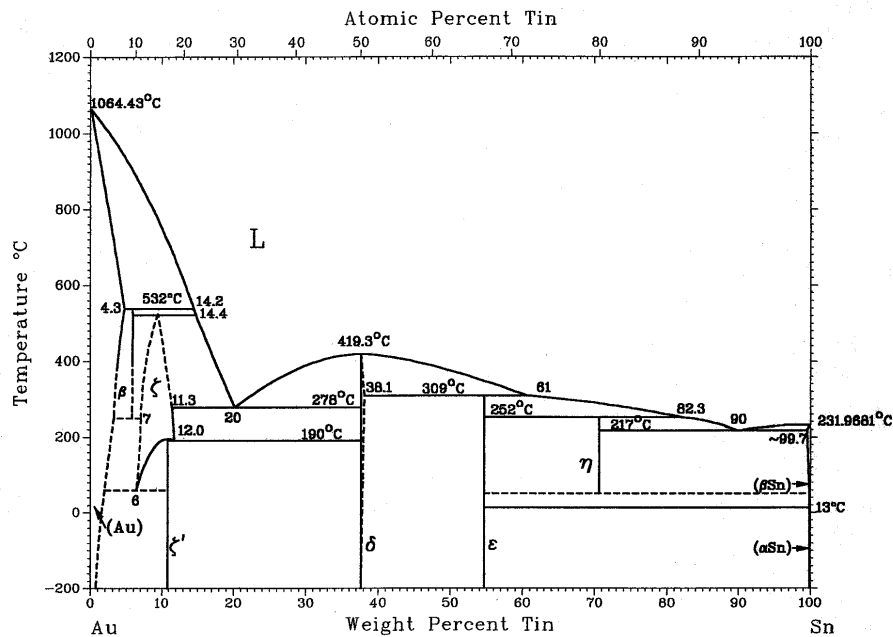


Bild 2-4 Binäres Phasendiagramm des Systems AuSn [Quelle ASM Binary Phase Diagrams]

Das System besitzt zwei eutektische Reaktionen, wobei die mit 20 wt% Sn für die Verbindungstechnik in der Optoelektronik [Pitroff 95], [Klein 97], [Miric 99], [Hutter 03] genutzt wird. Das Eutektikum hat einen Schmelzpunkt von 278 °C und besteht aus den Phasen AuSn ( $\delta$ ) und Au<sub>5</sub>Sn ( $\zeta$ ). Unterhalb von 195 °C bildet sich aus der  $\zeta$ -Phase die  $\zeta'$ -Phase (Au<sub>5</sub>Sn). Durch diese Transformation kommt es bei ca. 190 °C zu einer Volumenexpansion. Charakteristisch für die  $\zeta'$ -Phase ist weiterhin die eutektoide Reaktion  $\zeta' \leftrightarrow [\zeta + \text{AuSn}]$  bei 190 °C und 18,5 at% Sn [Matijasevic 91]. Auf Grund des hohen Au-Gehaltes der Legierung kommt es nur zu einer äußerst geringen Oxidschichtbildung und eine flussmittelfreier Lötprozess ist möglich, welcher Kontaminationen der optischen Bauelemente durch Flussmittelrückstände während der Montage ausschließt. Die hohe Schmelztemperatur ermöglicht gleichzeitig, bei sequentieller Montage, nachfolgende Fügeprozesse mit geringeren Schmelztemperaturen der Lote.

Weitere Vorteile des Lotes bestehen vor allem in der hohen Festigkeit, der Korrosionsbeständigkeit und der Kompatibilität zu verschiedenen Dünn- und Dickfilmmetallisierungen wie Au, Pt, Pd, Pd/Ag, Ni/Au. Das langsame Wachstum intermetallischer Phasen bildet die Voraussetzung für eine hervorragende Hochtemperaturstabilität [Scheel 02]. Die Materialdaten der Legierung 80Au20Sn sind in Tabelle 2-7 zusammengefasst.

Das zweite Sn-reiche Eutektikum bildet sich bei 217 °C mit 90 wt% Sn und wird aus den Phasen Sn und dem spröden  $\text{AuSn}_4$  ( $\eta$ ) geformt. Das Sn-reiche Eutektikum entsteht bei zu niedrigen Umschmelztemperaturen oder bei überschüssigem Sn-Angebot, wenn die Lotlegierung aus getrennt/alternierend applizierten Einzelelementen Au und Sn umgeschmolzen wird. Die Reaktion ist weiterhin bekannt vom Löten mit Sn-reichen Loten auf dickeren Au-Oberflächen, die zur Versprödung der Lötverbindungen führen. Das Sn-reiche Eutektikum wird daher generell für die Verbindungstechnik vermieden [Scheel 02]. Ausnahmen beschreibt [Chuang 04] in Form einer Verbindungstechnologie, welche an normaler Atmosphäre Sn-reiche AuSn-Lötverbindungen realisiert. Diese basieren auf einem nichteutektischen AuSn-Multilayersystem.

Eine Abweichungen vom Eutektikum in Richtung Erhöhung des Au-Gehalts der Legierung, verursacht durch Diffusionsprozesse/Phasenbildung mit Metallisierungsschichten bzw. durch den Applikationsprozess, führt nach dem Phasendiagramm zu einem wesentlich höheren Schmelzpunkt (ca. 1 % Abweichung führt zu einer Erhöhung der Schmelztemperatur von ca. 30 °C) [Ivey 97]. Daraus folgt ein erhöhter Wärmeeintrag während des Lötprozesses und geänderte thermomechanische Legierungseigenschaften. Die höheren thermischen Belastungen der optischen Materialien und Bauteile können zu einer Beeinträchtigung der Funktion der optischen Baugruppe oder zur Rissbildung und Zerstörung der optischen Komponenten führen. Eine erhöhte Duktilität der Au-reichen Lotlegierung verbunden mit der verringerten Mikrohärtigkeit der enthaltenen  $\zeta'$ -Phase kann zur Beeinflussung der auf Grund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten entstehenden Spannungen genutzt werden [Pittroff 01], [Baerwolff 99].

Eine weitere sehr ausführliche Beschreibung des Phasendiagramms mit daraus resultierenden Eigenschaften der AuSn-Legierung als Verbindungsmaterial findet sich in [Matijasevic 91].

Es wird deutlich, dass die eutektische Zusammensetzung des Lotes von signifikanter Bedeutung ist. Bei Einstellung der Legierungszusammensetzung aus alternierenden Multilayersystemen durch einen dem Lötprozess vorgelagerten Reflowprozess handelt es sich um einen sehr komplexen Prozess. Ein solcher Reflowschritt relativiert weiterhin den Vorteile der lokal begrenzten Erwärmung der optischen Bauteile im Laserstrahl-lötprozess. Im Rahmen der Untersuchungen wird daher der neue Ansatz verfolgt, die Lotlegierung bereits in der eutektischen 80/20 wt% Au/Sn-Zusammensetzung zu sputtern. Dadurch können zusätzliche Reflowprozes-

se vor dem Lötprozess vermieden werden. Gleichzeitig wird eine einstellbare, homogene Zusammensetzung der Lotlegierung über den gesamten zu metallisierenden Bereich realisiert.

In der eutektischen Zusammensetzung kann das Lot auf Grund seiner hohen Fließgrenze und Härte thermomechanische Spannungen nur geringfügig ausgleichen [TU Berlin 03]. Daher ist beim Fügen von optischen Materialien die Ausbildung von thermomechanischen Spannungen durch Methoden der FEM-Simulation theoretisch abzuschätzen (Kap. 3.2.3). Eine Möglichkeit Spannungen zu minimieren besteht in der Verwendung alternativer flussmittelfreier Weichlote, wie SnAg (vgl. Tabelle 2-8). Die veränderten thermomechanischen Eigenschaften der Legierung führen aber auch zu veränderten Stabilitäts- und Zuverlässigkeitseigenschaften der Lötverbindung, was insbesondere bezüglich der Langzeitstabilität zu berücksichtigen ist.

Tab. 2-8 Materialdaten der eutektischen AuSn- und AgSn-Legierungen

<b>Eigenschaft</b>	<b>80Au20Sn</b>	<b>96Sn4Ag</b>
Schmelzpunkt	278 °C	221 °C
E-Modul	59 GPa - 68 GPa	26,2 GPa
Fließgrenze bei 20 °C	275 MPa	24 MPa
Wärmeleitfähigkeit	57 W/mK	33 W/mK
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	$16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Dichte	14,51 g/cm <sup>3</sup>	7,36 g/cm <sup>3</sup>
Spezifische Wärme	0,015 J/g °C	
Querkontraktion	0,405	0,37

### 3 Grundlagen der Technologieentwicklung

#### 3.1 Applikation durch den Sputterprozess

Grundvoraussetzung für das Laserstrahllöten optischer Komponenten ist die lokal begrenzte, reproduzierbare Applikation lötfähiger Metallisierungen auf den zu fügenden Bauteilen. Um hochpräzise, stabile Lötverbindungen herstellen zu können, sind sehr dünne, extrem haftfeste und homogene Schichten erforderlich. Eine sehr geringe Schichtdicke vermindert weiterhin die thermische Belastung der Komponenten im Lötprozess. Unter diesen Gesichtspunkten stellt die Applikation der Metallisierung durch den Sputterprozess ein geeignetes Verfahren dar.

Der Sputterprozess beruht auf dem Prinzip der Kathodenzerstäubung. Treffen Ionen mit hinreichender Energie auf eine Festkörperoberfläche, so kommt es neben anderen Wechselwirkungen zur Emission von Atomen, Atomclustern oder Molekülen des beschossenen Materials. Dieses Zerstäuben ist die Grundlage des Sputterbeschichtungsverfahrens.

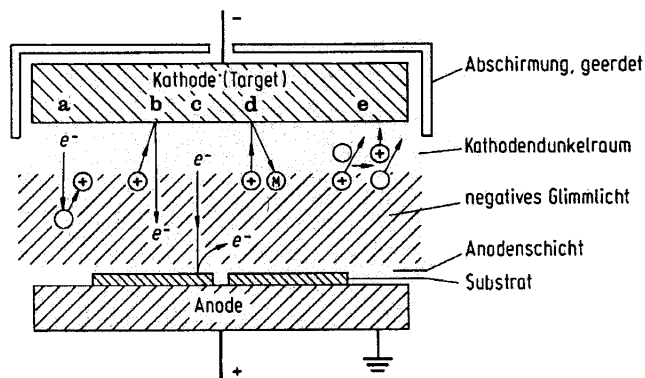


Bild 3-1 Schematische Darstellung des Sputter-Prozesses in Planargeometrie [Bergauer 02]

- a Ionisation
- b Elektronenemission vom Target
- c Elektronenemission von der Anode
- d Neutralteilchenemission vom Target
- e Umladung

Ein Target (Quelle des gewünschten Beschichtungsmaterials) wird zusammen mit den Substraten in einer geeigneten Hochvakuumkammer evakuiert. Die einfachste Methode ein Ionenbombardement zu erzeugen besteht darin, eine anomale Glimmentladung zwischen dem Target als Kathode und dem Substrat als Anode aufrechtzuerhalten (Bild 3-1). Eine Eigenschaft des Sputterprozesses ist die universelle Anwendbarkeit. Da das Material durch Impuls-

übertrag und nicht thermisch in die Gasphase übergeführt wird, kann nahezu jede Substanz zerstäubt werden.

Die Sputterausbeute  $Y$ , die mittlere Anzahl der Targetatome, die pro auftreffendem Ion emittiert werden, hängt vom Targetmaterial, von der Art und Energie der bombardierenden Ionen sowie deren Einfallswinkel ab.

Trägt man die Sputterausbeute bei gegebener Art und Energie der Ionen als Funktion der Ordnungszahl der Targetelemente auf (Bild 3-2), so erhält man einen periodischen Verlauf, der den Gruppen der Übergangsmetalle entspricht. Eine analoge Periodizität lässt sich finden, wenn man statt der Sputterausbeute  $Y$  den Kehrwert der Sublimationsenthalpie  $E_0$  der Targetmaterialien aufträgt [Bergauer 02].

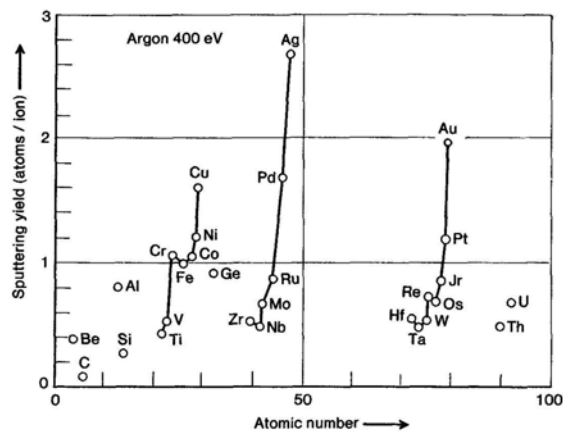


Bild 3-2 Sputterausbeute  $Y$  in Abhängigkeit vom Targetmaterial (Ordnungszahl  $Z$ ) [Bergauer 02]

Die Sputterausbeuten von Au (2,5 Au-Atome bei einer Ar-Ionenenergie an der Targetoberfläche von 500 eV) und Sn (1,2 Sn-Atome bei einer Ar-Ionenenergie an der Targetoberfläche von 500 eV) [Matsunami 84] unterscheiden sich hier um ca. Faktor 2. Das bedeutet, dass bei gleichen Sputterparametern die doppelte Anzahl Au-Atome im Sputterprozess der Einzelelemente abgeschieden wird.

Zerstäubungsmessungen an Legierungen und Verbindungen haben ergeben, dass der Ionenbeschuss die Zusammensetzung der Oberfläche verändert. Dieser Effekt wird unterschiedlichen Zerstäubungsausbeuten der Targetkomponenten zugeschrieben und als partielle oder selektive Zerstäubung bezeichnet. Die totale Sputterausbeute  $Y_{\text{tot}}$  einer Legierung (oder Materialkombination) ist im Allgemeinen kleiner als die Summe  $\sum a_i Y_i$ , die sich aus den Ausbeuten  $Y_i$  der reinen Komponenten und dem Molenbruch  $a_i$  (dem Stoffmengenanteil) ergibt. Die schwächer

zerstäubende Komponente, die die höhere Bindungsenergie besitzt, wird an der Oberfläche angereichert. Dadurch erhöht sich der Mittelwert der Sublimationsenthalpie  $E_0$ , was wiederum die Ausbeute  $Y$  herabsetzt. Unterscheiden sich die  $Y_i$ -Werte der Legierungskomponenten stark, kann die totale Ausbeute  $Y_{\text{tot}}$  sogar beträchtlich kleiner sein als der Summenwert [Bergauer 02].

Leichtere Komponenten zeigen im Allgemeinen die größere Zerstäubungsausbeute. Es sind aber auch gegensätzliche Ergebnisse bekannt, vor allem bei binären Legierungen von Edelmetallen. Es wird angenommen, dass der selektiven Zerstäubung ein Stoßkaskadenmechanismus zu Grunde liegt, jedoch auch weitere Einflüsse zu berücksichtigen sind. So wird vermutet, dass eine laufende Umordnung des Materials durch strahlungsinduzierte Diffusion stattfindet, ein Effekt der für monoatomare Materialien ohne Bedeutung ist, in Legierungen und Verbindungen aber Einfluss auf die Zerstäubungsausbeute einer Komponente haben kann [Frey 95].

## 3.2 Laserstrahl-Technologie

### 3.2.1 Energieeinkopplung

Die Lasermaterialbearbeitung beruht auf der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie. Die auftreffende elektromagnetische Energie der Laserstrahlung wird in Wärme umgesetzt.

Für die Effizienz des Verfahrens ist von Interesse, welcher prozentuale Anteil absorbiert wird, da beim Auftreffen der Laserstrahlung ein Teil reflektiert, der verbleibende Anteil absorbiert wird bzw. hindurchtritt. Die einzelnen Anteile addieren sich nach der Leistungsbilanz zu eins.

$$\frac{P_R}{P_o} + \frac{P_A}{P_o} + \frac{P_T}{P_o} = 1 \quad (1)$$

Die Ausbreitung der Laserstrahlung als elektromagnetische Welle in einem absorbierenden Medium wird durch das Lambertsche Gesetz beschrieben,

$$I = I_0 \left(1 - \frac{P_R}{P_o}\right) e^{-\alpha z} \quad (2)$$

mit  $\alpha$  dem linearen Absorptionskoeffizient. Bei Beschreibung der optischen Eigenschaften durch den komplexen Brechungsindex wird die Absorption durch  $K$ , die Abschwächungskonstante bzw.  $\kappa$ , den Absorptionsindex, charakterisiert.

$$n^* = n + iK = n(1 + i\kappa) \quad (3)$$

Dabei gilt

$$K = n \cdot \kappa \quad (4)$$

sowie

$$n \cdot \kappa = \frac{\lambda_0 \cdot \alpha}{4\pi} \quad (5)$$

mit  $\lambda_0$  als betrachtete Wellenlänge im Vakuum.

Die Änderung der Intensität beim Durchgang durch ein kleines Volumen der Dicke  $dz$  entspricht der pro Zeiteinheit im Volumen freigesetzten Wärmemenge und erzeugt eine Temperaturerhöhung im Volumenelement.

$$\left| \frac{dI}{dz} \right| = \frac{\dot{Q}}{dV} = \alpha \cdot \left(1 - \frac{P_R}{P_o}\right) I_0 e^{\alpha \cdot z} \quad (6)$$

Als Absorptionslänge  $l_\alpha$  wird die Eindringtiefe nach der die Intensität der einfallenden Laserstrahlung auf den Bruchteil  $1/e$  abgefallen ist bezeichnet.

$$l_\alpha = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda_0}{4\pi n\kappa} \quad (7)$$

Der Absorptionskoeffizient und damit die Eindringtiefe hängen somit von der Wellenlänge der Laserstrahlung und den optischen Eigenschaften des Materials ab. Die Größe von  $l_\alpha$  bestimmt den Wechselwirkungstyp. Das primäre Wechselwirkungsvolumen  $V_A$ , der Bereich in dem die Laserstrahlung direkt mit dem Material wechselwirkt und Sekundärprozesse wie Wärmeleitung, Wärmestrahlung oder Konvektion vernachlässigt werden können, kann als Produkt aus absorbierender Fläche  $A_F$  und Absorptionslänge  $l_\alpha$  dargestellt werden.

$$V_A = A_F \cdot l_\alpha \quad (8)$$

Je nach Relation zwischen der charakteristischen Linearabmessung  $d_F$  als Funktion von  $A_F$  und  $l_\alpha$  lassen sich zwei Bereiche unterscheiden:

$l_\alpha \ll d_F$  Oberflächenabsorption

$l_\alpha \geq d_F$  Volumenabsorption.

Eine etwas gröbere Einteilung liefert:

$l_\alpha \ll d$  Oberflächenabsorption

$l_\alpha \geq d$  Volumenabsorption

[Staupendahl 95].

Für Wellenlängen im Bereich zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $10 \mu\text{m}$  liegen die Werte der Eindringtiefe für Metalle im Bereich einiger nm bis weniger  $\mu\text{m}$ . Die Laserstrahlung wird somit innerhalb kürzester Wegstrecken absorbiert, die kleiner als die Wellenlänge selbst und vernachlässigbar gegenüber den Werkstückabmessungen sind. Die Wirkung der Laserstrahlung wird deshalb als Oberflächenwärmequelle beschrieben [Brandner 03]. Die modellmäßige Strahlungswechselwirkung mit der Oberfläche für diesen Fall ist in Bild 3-3 dargestellt.

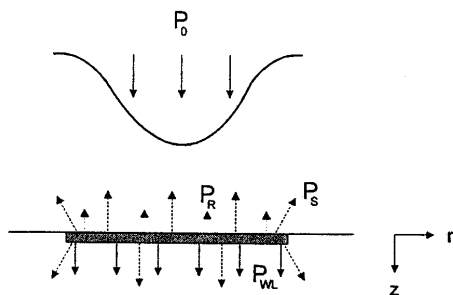


Bild 3-3 Absorption und Verlustprozesse an ebenen hochabsorbierenden Oberflächen [Staupendahl 95]

Die auftreffende Strahlung  $P_0$  wird absorbiert und heizt die Oberflächenschicht auf. Ein Teil der auftreffenden Strahlung  $P_R$  wird an der Oberfläche reflektiert. Ein merklicher Anteil der absorbierten Energie wird von der erwärmten Schicht als Temperaturstrahlung  $P_S$  in den oberen Halbraum und in das Material abgegeben. Dieser Anteil wird durch das Stefan Boltzmann Gesetz (Kap. 3.2.4) beschrieben. Im Werkstoff selbst trägt diese Temperaturstrahlung über eine Reabsorption zur Lasermaterialbearbeitung bei. Dabei findet eine Wellenlängenkonversion  $\lambda_{\text{Laser}} \rightarrow \lambda_{\text{Wärmestrahlung}}$  statt. Daraus resultieren unterschiedliche Wirkungen dieses Effekts für z. B. Metalle und Gläser. Während für Metalle die Reabsorption praktisch der gesamten Wärmestrahlung in dünnen Schichten erfolgt, sind Gläser für Wellenlängen  $\lambda \leq 1,5 \mu\text{m}$  wei-



testgehend transparent (Bild 3-4) und der Energietransport erfolgt in die Materialtiefe. Verluste durch Wärmeleitung  $P_{WL}$  sind zunächst eindimensional in z-Richtung bei entsprechend langer Bestrahlung auch dreidimensional zu betrachten [Staupendahl 95]. Im Fall des untersuchten Laserstrahl­lötens optischer Komponenten wird somit bei einer Wellenlänge des Löt­lasers von 808 nm auch während der indirekten Bestrahlung nur die Bauteilm­etallisierung direkt erwärmt.

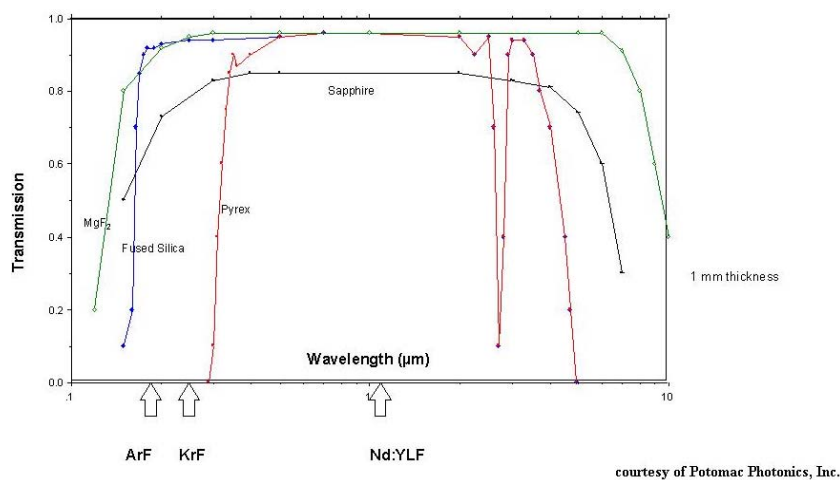


Bild 3-4 Transmission optischer Materialien

### 3.2.2 Wärmeausbreitung

Da es sich beim Laserstrahl­löt­en um ein thermisches Verfahren handelt, wird der Fügeprozess im Wesentlichen durch die Wärmeleitung und die sich im Bauteil ein­st­ellenden Temperaturfelder beeinflusst. Die Prozesseffizienz hängt damit sehr stark von der Energieeinkopplung und dem daraus resultierenden Auf­heizverhalten der Füge­stelle ab.

Weiterhin beeinflussen die Temperaturfelder im Zusammenhang mit den thermo­mechanischen Bauteil- und Loteigenschaften die Ausbildung von insbesondere für optische Materialien kritischen Spannungen im Bereich der Füge­stelle. Eine Betrachtung des Auf­heiz­verhaltens in Zusammenhang mit einer strukturmechanischen Analyse führt daher zu Erkenntnissen, die zur Gestaltung und Optimierung des Prozesses verwendet werden können.

Ausgehend vom Modell der dünnen Oberflächenschicht erfolgt der Wärmetransport nach dem Fourierschen Gesetz ins Materialinnere.

$$\dot{q} = -\lambda_w \frac{\partial T}{\partial z} \quad (9)$$

Es lässt sich über die Betrachtung eines entsprechend kleinen Volumens die allgemeine Wärmeleitungsgleichung ableiten [Staupendahl 95].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\zeta \cdot c_m}{\lambda_w} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{k_w} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Sind im Kontrollvolumen Wärmequellen mit der Leistungsdichte  $W$  vorhanden, sind diese auf der rechten Seite der Gleichung 10 zu addieren. Bei temperaturabhängigem  $\lambda$  entsteht mit  $\Delta$  als dem Laplace Operator der Ausdruck nach Gleichung 11 [Grigull 90].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k_w \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{W}{\zeta \cdot c_m} = k_w \Delta \vartheta + \frac{W}{\zeta \cdot c_m} \quad (11)$$

Die mathematische Beschreibung der Temperaturfelder, die sich auf Grund der Wechselwirkung mit der Laserstrahlung einstellen, beruht auf einer zeit- und ortsabhängigen Lösung der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung für einen isotropen, inkompressibelen Körper mit temperaturabhängigen Stoffwerten.

Lösungen für die allgemeine partielle Differentialgleichung für instationäre Wärmeleitungsprobleme können durch eine geschlossene, analytische Lösung unter Erfüllung der Randbedingungen oder durch eine numerische Lösung der Differentialgleichung mit Randbedingungen unter Verwendung der Methode der Finiten Elemente (FEM) gefunden werden. Bei temperaturabhängigen Stoffwerten ist eine analytische Lösung in geschlossener Form im Allgemeinen nicht möglich [Baehr 03]. Um die komplexen Bedingungen des Laserstrahlötprozesses möglichst realitätsnah modellieren zu können, wird im Rahmen der Arbeit die Methode der FEM angewendet.

### 3.2.3 Thermomechanische Simulationen - Modellbildung

Bei der Methode der FEM handelt es sich um ein bereichsweise angewandtes numerisches Näherungsverfahren. Es werden Ansatzfunktionen gewählt, die nur Teilgebiete überdecken. Diese schließen kontinuierlich an die jeweiligen Nachbargebiete an. Die Näherungsfunktion für das Gesamtgebiet setzt sich aus den Lösungsansätzen der Teilgebiete zusammen. Die

Teilgebiete werden als Elemente bezeichnet, die über Knoten mit den Nachbarelementen verbunden sind. Als Koeffizienten werden physikalische Größen, wie z. B. die Temperatur, eingeführt. Bei der FEM wird von der Integralform ausgegangen, das heißt ein Integralausdruck wird minimiert. Meist wird das Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie verwendet. Setzt man die Näherungsfunktion in den Energieausdruck  $\Pi$  ein, so ist die potentielle Energie am Beispiel der thermischen Simulation eine Funktion der Knotentemperaturen  $\{T\}$ , d. h. der unbekanntenen Freiheitsgrade:  $\Pi = \Pi\{T\}$ .

Die Extremalbedingung

$$\frac{\partial \Pi\{T\}}{\partial \{T\}} = 0 \quad (12)$$

liefert das Gleichungssystem zur Berechnung der unbekanntenen Knotentemperaturen. In Matrixschreibweise ergibt sich

$$[K] \cdot \{T\} = -\{q\} \quad (13)$$

mit  $\{T\}$  dem Knotentemperaturvektor,  $\{q\}$  dem Lastvektor aus der äußeren Wärmezu- und Abfuhr sowie  $[k]$  als Koeffizientenmatrix des Gleichungssystems, die sich im Wesentlichen aus den Geometrie- und Materialdaten errechnet und im Falle der thermischen Simulation als Leitfähigkeitsmatrix bezeichnet wird. Aus der Lösung dieses Gleichungssystems ergibt sich der gesuchte Freiheitsgrad, in diesem Fall die Knotentemperatur  $\{T\}$  [Groth 95].

$$\{T\} = -[K]^{-1} \cdot \{q\} \quad (14)$$

Die Auswahl der Ansatzfunktionen sowie die Lösung des Gleichungssystems wird in der Praxis von Softwareprogrammen übernommen. Die vorliegenden Betrachtungen basieren auf dem Simulationsprogramm ANSYS.

Ein Großteil der aus der Literatur bekannten Simulationsmodelle beinhaltet die Kontaktierung und Befestigung von Bauelementen durch Löten der Kontaktfahnen bzw. die Montage und die Stabilität von Laserdioden auf Wärmesenken [Flanagan 96], [Musijovski 01], [Liu 02], [Labudovic 03], [Sheen 02], [Brockman 03]. Im Unterschied dazu wird in dieser Arbeit ein grundlegendes zweidimensionales Modell des indirekten Laserstrahlrötprozesses mit stationären Laserspot und sehr dünnen Lotschichten entwickelt. Das Modell bildet unter Verwendung

der dritten Raumkoordinate sowie zeitabhängiger Koordinaten des Strahlschwerpunktes die Grundlage komplexerer 3D-Simulationen mit bewegtem Laserspot.

Angenommen wird ein Lötprozesses zum Verbinden von zylinderförmigen Körpern mit planaren, vollständig metallisierten Fügeflächen. Das auf den Fügeflächen gesputterte Lotschichtsystem wird als jeweils 3  $\mu\text{m}$  dicke Schicht der eutektischen Legierung 80Au20Sn betrachtet, Haft- und Barrierschicht werden vernachlässigt. Die verwendeten Materialdaten sind in den Tabellen 2-7 und 5-1 enthalten.

Unter Berücksichtigung der Axialsymmetrie dieser Körper wird zur Minimierung des Modellierungsaufwandes und der Rechenzeit ein 2D-Modell für die Simulation verwendet (Bilder 3-5 und 3-6). Die Lotschichten sind durch eine örtliche Diskretisierung von jeweils fünf Elementen modelliert. Die extrem feine Vernetzung ist erforderlich, um die zu untersuchenden Freiheitsgrade räumlich auflösen zu können. Der ideale thermische Kontakt zwischen den Lotschichten nach dem Aufschmelzen wird durch eine zusätzliche, bei Überschreiten der Schmelztemperatur zu aktivierende, 0,2  $\mu\text{m}$  dicke Schicht realisiert. Der Lötprozess ist durch einen einzelnen Laserpunkt mit definierter Bestrahlungsdauer (HFLU) dargestellt.

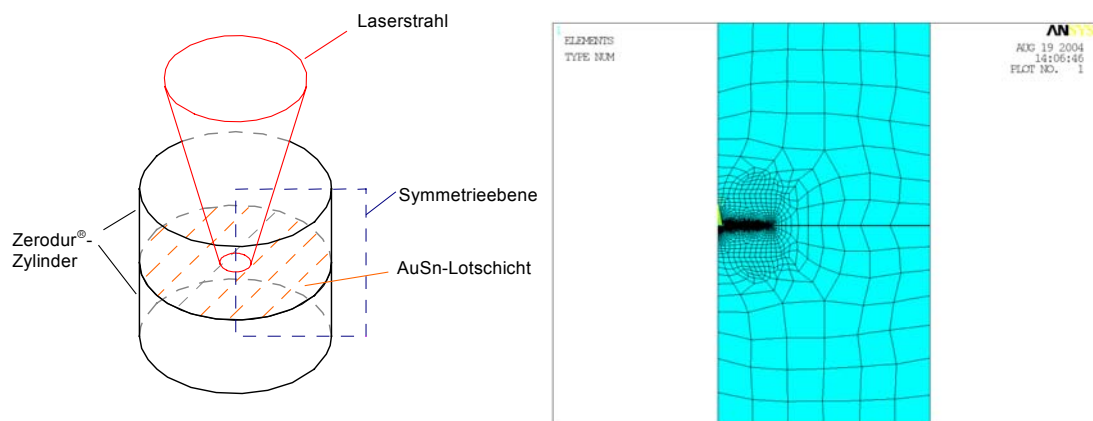
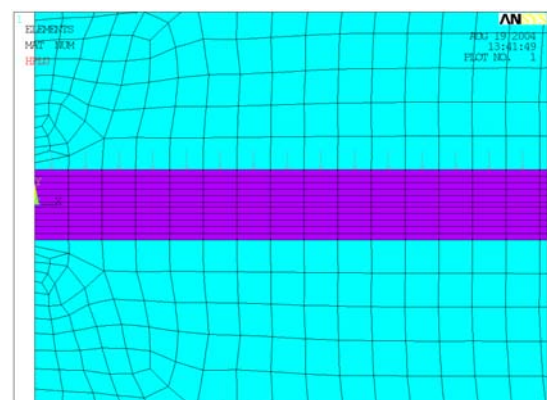


Bild 3-5 Modell des Laserstrahl-lötprozesses (3D-Modell und vernetzte 2D-Symmetrieebene)

Bild 3-6 Ausschnitt der vernetzten Symmetrieebene im Bereich des Strahlzentrums mit Lastvektor Oberflächenwärmequelle (HFLU)



Folgende Vereinfachungen werden getroffen und damit in Zusammenhang stehende Randbedingungen festgelegt:

- Zu Prozessbeginn herrscht eine definierte Temperatur von 20 °C.
- Der Wärmetransport beruht auf reiner Wärmeleitung, bei idealem thermischen Kontakt zwischen den Schichten nach Erreichen der Schmelztemperatur sowie einem abgeschätzten Wärmeübergangswert nicht verbundener Bereiche.
- Es liegen adiabate Randbedingungen vor, d. h. Verluste durch Konvektion und Wärmestrahlung werden vernachlässigt.
- Die Laserstrahlung wird als Oberflächenwärmequelle mit gaussförmiger Intensitätsverteilung nach [Beyer 98] betrachtet.

Für die Berechnung des Phasenüberganges (Schmelzen des Lotes) wird die Enthalpie zur Ermittlung der Wärmekapazität genutzt.

### **3.2.4 Pyrometrische Temperaturmessung**

Die Temperaturmessung und -kontrolle in der Fügezone ist von fundamentaler Bedeutung, da der Fügeprozess neben den Laserparametern und Umgebungseinflüssen auch von den thermophysikalischen Werkstoffeigenschaften, wie z. B. Absorptionsvermögen, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, beeinflusst wird. Die erforderliche kontaktlose Temperaturmessung mit möglichst schneller Regelung der Laserleistung ist durch die online Pyrometrie, meist zusätzlich gekoppelt mit einem System zur Prozessvisualisierung, gegeben. Das Pyrometer misst dabei kontaktlos die Strahlungsintensität der IR-Strahlung. Die Nutzung des Potentials der Pyrometerregelung zur Kontrolle von Laserstrahlötprozessen ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen [Schrottmayer 94], [Musijovski 98], [Pucher 98], [Bosse 02]. Da es sich um die Basis der Prozessregelung handelt, soll auf die Grundlagen der pyrometrische Temperaturmessung detaillierter eingegangen werden.

Die Intensität elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich gilt als Maß für die absolute Temperatur des strahlenden Körpers. Ausgehend vom idealen schwarzen Strahler, einem Körper, der für alle Wellenlängen und Temperaturen die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert und dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz, wonach der Absorptionsgrad gleich dem

Emissionsgrad  $\varepsilon$  ist, entspricht der von einem beliebigen Körper ausgehende Strahlungsfluss (Leistung) dem des idealen schwarzen Körpers multipliziert mit dem Emissionsfaktor. Nach dem Stefan Boltzmann Gesetz ergibt sich die Leistung des sogenannten "grauen" Körpers als:

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4 \quad (\sigma / \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}) \quad (15)$$

Nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz wächst bei höheren Temperaturen die abgestrahlte Leistung und verschiebt das Maximum zu kürzeren Wellenlängen.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (b = 2,898 \text{exp-3 mK}) \quad (16)$$

Die Formel nach Gleichung (15) beschreibt die gesamte abgestrahlte Leistung, aufsummiert über alle Wellenlängen. Die Leistung für einzelne Wellenlängenbereiche lässt sich nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz bestimmen (Gleichung 17) [Dobrinski 96].

$$P = \frac{4\pi \cdot hc_0^2}{\lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{hc_0}{kT\lambda}\right) - 1} Ad\lambda \quad (17)$$

Zur Messung absoluter Temperaturen eignet sich das Pyrometer nur bei Kenntnis des speziellen Emissionskoeffizienten der entsprechenden Oberfläche bei der Pyrometermesswellenlänge bzw. dem Messwellenlängenbereich. Da dieser in der Regel nicht bekannt ist bzw. sich temperaturabhängig ändert, muss das Pyrometer auf die entsprechende Messsituation kalibriert werden. Neben dem temperaturabhängigen Absorptionskoeffizienten können Temperaturmessfehler auf Grund von Grenzflächenreflektionen und Veränderungen des Messsignals bei der Transmission durch die optischen Materialien (indirekte Erwärmung der Fügestelle) in den Grenzen der Messgenauigkeit der zur Kalibrierung verwendeten Temperaturmessmethode kompensiert werden.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass das Pyrometer die durchschnittliche Temperatur über den gesamten Pyrometermessfleck ( $A_{\text{pyrometer}}$ ) durch Integration nach Gleichung (18) ermittelt, wobei  $r$  den Abstand zum Strahlzentrum beschreibt.

$$T = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R rT(r) dr d\varphi}{A_{\text{Pyrometer}}} \quad (18)$$

Der zeitabhängige Verlauf der Wärmestrahlung der Lötverbindung während des Fügeprozesses zeigt charakteristische Haltepunkte und lokale Maxima mit entsprechenden Änderungen des Anstiegs. Dadurch ist eine Klassifizierung des Lötprozesses in die Phasen Aufschmelzen des Lotes, Benetzung der Fügepartner und Abkühlen der Lötverbindung möglich. Diese Phasen können über verschiedene Steigungen des Pyrometersignals charakterisiert werden, welche die Grundlage für eine Prozessregelung bilden, da sich über den Temperaturgradienten die Gefügestruktur beeinflussen lässt. So haben z. B. die Körnigkeit und die Bildung und Verteilung intermetallischer Phasen Einfluss auf die Haltbarkeit und Zuverlässigkeit der Lötverbindung [Pucher 98].

Zur Regelung von Laserstrahl­lötprozessen werden adaptive Regler (Bild 3-7) eingesetzt. Dadurch ist es möglich, flexibel auf sich ändernde Versuchsparmeter, wie z. B. Absorptionskoeffizienten, reagieren zu können. In jedem Regelschritt während des Prozesses werden hier die Regelparameter nach einem Identifikationsschritt angepasst. So kann ein wesentlich stabileres Regelverhalten realisiert werden [Herrmann 02].

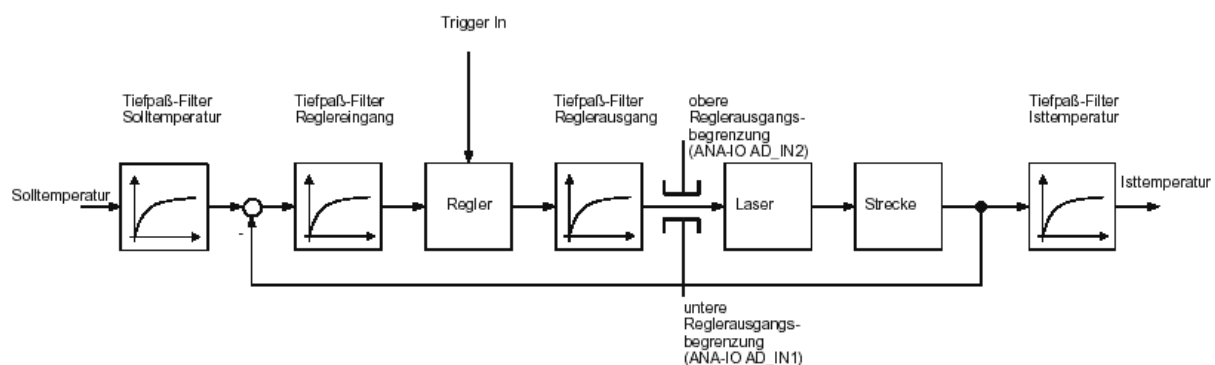


Bild 3-7 Blockschaltbild des aktiven Regelkreises der eingesetzten Laserstrahl­lötanlage [Quelle DILAS]

Bei sehr kurzen Prozesszeiten ( $< 10$  ms) kann der Lötprozess teilweise nicht mehr mit Hilfe der Pyrometrie geregelt werden, da der für den Aufbau der Lötverbindung wichtige Benetzungsvorgang erst nach Ende des Laserpulses einsetzt [Fleckenstein 99].

## 4 Systemtechnik

### 4.1 Vakuumbeschichtung

Zum Abscheiden einer lötfähigen Metallisierung wird eine DC-Magnetronspalteranlage vom Typ MRC 903 eingesetzt.

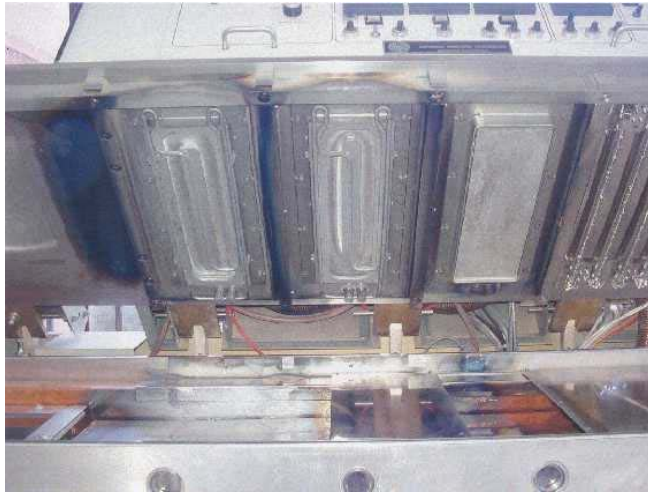


Bild 4-1 Targetstationen der Sputteranlage MRC 903

Durch die in der Anlage vorhandenen drei Targetstationen (Bild 4-1) ist die Beschichtung von Komponenten und Substraten mit komplexen Schichtsystemen, einschließlich Lotapplikation in einer Vakuumfolge möglich. Magnetron-Sputtersysteme ermöglichen hohe Beschichtungs-raten im niedrigen Druckbereich (bis unter 0,1 Pa) bei geringer Substraterwärmung. Über der Kathode (Target) wird dazu ein zum elektrischen Feld transversales Magnetfeld erzeugt. Planare Magnetrons sind zur Zeit neben Sputter-Gun-Magnetrons die am meisten verwendeten Sputterquellen, wobei auch zylindrische Formen zur Anwendung kommen. Es können Beschichtungs-raten  $> 1 \mu\text{m}/\text{min}$  mit einer Gleichmäßigkeit besser  $\pm 5\%$  erreicht werden [Bergauer 02].

Die technischen Parameter der MRC 903 sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1 Technische Parameter MRC 903

Typ	DC- Magnetron, hochfrequenzfähig
Basisdruck	$1,7 \cdot 10^{-7}$ mbar
Kathoden	3 Kathoden 378 mm x 120 mm



Palettengröße	310 mm x 310mm, 1,5 % Schichtdickenabweichung
Substrat – Targetabstand	ca. 60 mm nicht variabel
Ätzstation	Hochfrequenzfähig, 1 kW
	Gekrümmte Proben können nicht in ausreichender Qualität beschichtet werden
	Linearbewegung des Substrates unter den Kathoden, keine Drehbewegung möglich

## 4.2 Laserstrahlötanlage

Infolge schlechter Absorptionsraten des CO<sub>2</sub>-Lasers für bestimmte Materialien, wie z. B. Silizium, haben der cw-Nd:YAG-Laser und der Hochleistungsdiodenlaser zunehmend an Bedeutung für das Laserstrahlöten gewonnen [Haag 00].

Besonders der Hochleistungsdiodenlaser zeichnet sich als ein flexibles Werkzeug mit einem hohen Wirkungsgrad, vergleichsweise geringen Anschaffungs- und Betriebskosten sowie einer kompakten Bauform aus. Vorteile bestehen weiterhin in der hohen Lebensdauer bei geringem Wartungsaufwand und der einfachen Puls- und Modulationsfähigkeit, auf Grund der direkten Abhängigkeit der ausgesandten Lichtleistung vom Vorwärtsstrom der Laserdiode [Li 00].

Die Strahlqualität des Diodenlasers ist um ein bis zwei Größenordnungen schlechter als im Vergleich zu Nd:YAG und CO<sub>2</sub>-Lasern. Das Strahlprofil ist senkrecht zur Emitterlinie gaussförmig, weist in der senkrecht dazu stehenden Achse jedoch ein Top-Hat ähnliches Profil auf. Eine Folge davon ist eine vergleichsweise schlechtere Fokussierbarkeit und somit eine geringere erzielbare Intensität auf der Materialoberfläche. Andererseits bewirkt die Kombination vieler Einzelstrahlen eine Ausmittelung von individuellen Emissionsschwankungen, was sich positiv auf die zeitliche und räumliche Stabilität des Gesamtstrahles auswirkt [Haag 00]. Trotz dieser Strahleigenschaften stellt der Diodenlaser insbesondere durch seine Kompaktheit und Effizienz eine hervorragende Strahlungsquelle für den Lötprozess dar [Bachmann 03]. Strukturgrößen von 300 µm bis 500 µm sind bei einem ausreichend großen Arbeitsabstand fokussierbar. Bei höheren Anforderungen an die Strahlqualität bietet sich der diodengepumpte Nd:YAG-Laser an, der die Vorteile beider Lasersysteme vereint. In diesem Fall können Strukturen bis 50 µm fokussiert werden.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde die Laserstrahl­lötanlage LSS 104 / DF x 03 der Firma Rabe Lasertechnik ausgewählt (Bild 4-2). Diese bietet die Möglichkeit ein auf spezifische Prozesse abstimmbares Laserwerkzeug für den selektiven Lötprozess einzusetzen. Der Hochleistungsdiodenlaser der Laserlötanlage arbeitet bei einer Wellenlänge von 808 nm im nahen Infrarotbereich und somit für das menschliche Auge nicht sichtbar. Die im Laserkopf integrierte und in den Strahlengang eingekoppelte CCD-Kamera ermöglicht die visuelle Positionierung der zu lötenden Bauteile und die Prozessbeobachtung. Eine Relativbewegung zwischen Laserspot und zu bestrahlendem Bauteil wird durch die in den Systemaufbau integrierten Linearachsen realisiert. Die Temperaturregelung erfolgt über das ebenfalls in den Bearbeitungskopf integrierte Einfarbenpyrometer. Der Temperaturbereich, die Empfindlichkeit und die Abtastrate können an den jeweiligen Prozess angepasst werden. Der Adaptivregler regelt die Isttemperatur der Regelstrecke nach der einstellbaren Solltemperatur. Diese lässt sich sowohl als Rampe wie auch als stufenförmiger Verlauf festlegen.



Bild 4-2 Laserstrahl­lötanlage LSS 104/DFx03

Um einen effizienten Einsatz der Anlage zu gewährleisten, sind für die jeweiligen Laserstrahl­lötprozesse spezielle Justageaufbauten bzw. Fügehilfsvorrichtungen demonstrator-spezifisch zu entwickeln und in die Steuerung des Systems zu integrieren.

Die Spezifikation der Laserstrahl­lötanlage ist in Tabelle 4-2 aufgelistet.

Tabelle 4-2 Spezifikation Laserstrahl­lötanlage LSS 104/DFx03

Systemparameter	Spezifikation
Laserart	Hochleistungsdiodenlaser (fasergekoppelt)
Wellenlänge	808 nm $\pm$ 10 nm
Leistungsbereich / Betriebsart	0 bis 30 Watt am Faserausgang / cw
Arbeitsabstand / StrahlØ im Arbeitspunkt	95 mm / 0.65 mm; 54 mm / 0.45 mm 38 mm / 0.33 mm; 25 mm / 0.29 mm
Temperaturmessung	Einfarbenpyrometer 150 °C bis 700 °C $\pm$ 1 K
Prozessvisualisierung	Kamerabeobachtung mit Monitor zur Visualisierung und Positionierung
Systemaufbau	Strahlwerkzeug im Gesamtaufbau integriert Grundgerüst mit schwingungsgedämpfter Granitarbeitsplatte x-y-Positioniersystem 250 mm x 250 mm $\pm$ 0,01 mm Portalaufbau mit z-Achse 200 mm $\pm$ 0,01 mm
Laserschutz	Sicherheitshausung, im Betriebszustand Laserklasse 1

Die verfügbaren Strahlformungsoptiken sind in Bezug auf minimal erreichbaren Fokusbereich bzw. erreichbare Leistungsdichten sowie ggf. erforderliche spezielle Fokusgeometrien von signifikanter Bedeutung für die Lötprozessführung. Standardmäßig stehen für den eingesetzten fasergekoppelten Diodenlaser zwei Optiken mit Brennweiten von 60 mm und 100 mm zur Verfügung. Gekoppelt mit einer Vorsatzlinse ergeben sich zusätzlich die Brennweiten 34 mm und 42 mm. Im fokussierten Zustand (Lage der Fügefläche in der Fokusebene) ergeben sich verfügbare Strahldurchmesser mit 0,62 mm, 0,37 mm, 0,33 mm und 0,29 mm.

Zur Charakterisierung des Laserstrahl­lötprozesses ist die Kenntnis der Strahlkaustik der eingesetzten Strahlformungsoptik erforderlich, um die durch Toleranzen der Fokusslage entstehende Veränderungen des Fokusbereichs (resp. Leistungsdichte im Laserstrahl­lötprozess) abschätzen zu können. Die Messung der Strahlradien erfolgte durch die Herstellerfirma DILAS. Das Messprinzip beruht auf einer rotierenden Hohl­nadel, die den Strahl abfährt und in Verbindung mit einer Photodiode die von der Messnadel abgeführte Laserleistung detektiert. In Bild 4-3 sind die Kaustikkurven der Optiken mit 60 mm und 100 mm Brennweite in einem Bereich von  $\pm$  5 mm der z-Achse (entspricht der Strahlachse) dargestellt. Die charakte-

ristische Rayleighlänge, als Abstand von der Strahltaile bei dem sich die Strahlquerschnittsfläche verdoppelt hat, lässt sich mit 2,5 mm entnehmen.

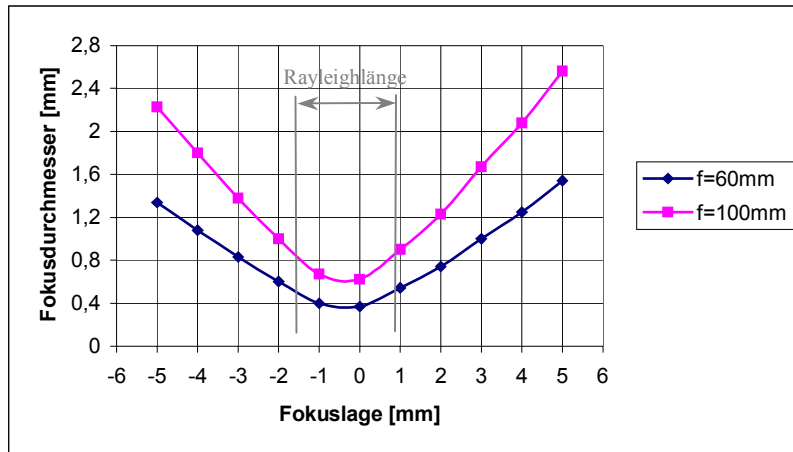


Bild 4-3 Kaustikkurven der 60 mm und 100 mm Optiken

Das Einstellen der Fokusalage erfolgt in der Regel manuell über das Bild der in den Bearbeitungskopf integrierten CCD-Kamera. Diese Methode wird durch den jeweiligen Bearbeiter subjektiv durch den Materialkontrast bzw. die Oberflächenrauheit sowie die Brennweite der verwendeten Optik beeinflusst.

Für die 60 mm Optik wurde beim Fokussieren auf kontrastreichem Untergrund eine Standardabweichung der Fokusalage von 0,44 mm sowie für die 100 mm Optik von 0,86 mm ermittelt. Für die 100 mm Standardoptik ergibt sich damit gemäß der Kaustikkurve ein Spotdurchmesser (in Fokusalage) von 0,62 mm bis 0,67 mm. Diese Toleranzen sind insbesondere bei der Charakterisierung der Strahlparameter des Lötprozesses zu berücksichtigen.

Die Leistungsdichteverteilung in Fokusalage nach den Messprotokollen der Firma DILAS ist in Bild 4-4 dargestellt.

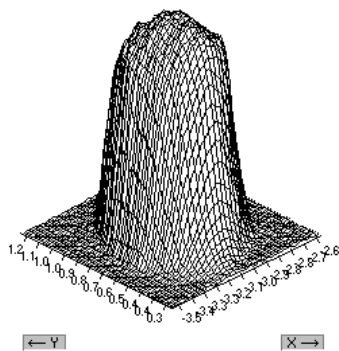


Bild 4-4 3D-Ansicht des Intensitätsprofils der 100 mm Optik in Fokusslage (86 % der Laserleistung)  
[Quelle DILAS]

Als zusätzliche Strahlformungsoptiken für das Laserstrahllöten extrem justageempfindlicher Bauelemente wurden unterschiedliche Ringstrahlformer berechnet und gefertigt (Bild 4-5). Der Strahlformer ermöglicht sowohl die eigentliche Ringformung als auch eine teilweise Aberrationskorrektur der Fokussieroptik und somit einen eng begrenzten Lötspot.

Die Ringdurchmesser (mittlere Durchmesser) der Foki sind in den Abstufungen 1 mm, 2 mm, 5 mm und 10 mm verfügbar. Durch Defokussierung sind eingeschränkt auch Zwischengrößen einstellbar.

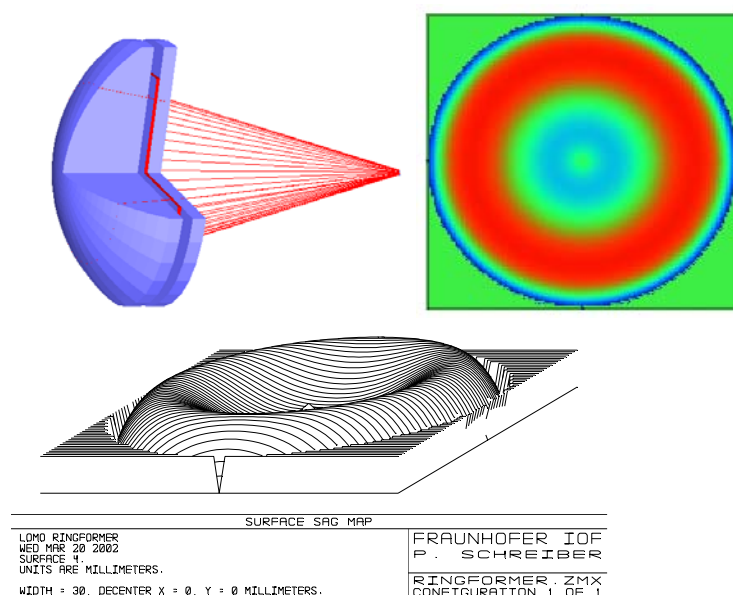


Bild 4-5 Ringformer Modell und Leistungsdichteverteilung [Quelle P. Schreiber Fraunhofer IOF]

Durch den Einsatz dieser Optiken ist es möglich, kreisförmige Relativbewegungen zwischen Laserstrahl und Bauelement zu vermeiden und somit simultan größere Flächen bei einer deutlich verbesserten Temperaturhomogenität zu bestrahlen.

### 4.3 Geräte und Methoden der Charakterisierung

Die Bewertung und Charakterisierung laserstrahlgelöteter Baugruppen hinsichtlich relevanter Struktur- und Gefügeeigenschaften erfolgt mittels Licht- und Elektronenmikroskopie.

Lichtmikroskopische Untersuchungen ermöglichen eine qualitative Gefügeanalyse bezüglich Homogenität und Fehlstellenausbildung sowie zu Reaktions- und Difusionszonen. Detaillierte Analysen der einzelnen Lotphasen und Zusammensetzungen der gelöteten Bereiche erfolgen mittels Rasterelektronenmikroskop. Für den analytischen Nachweis von Elementen wird die Methode der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDS/EDX) eingesetzt. Die charakteristische Strahlung kann Elementen ab einer Ordnungszahl 5 zugeordnet werden. Zu berücksichtigen ist die Eindringtiefe der Elektronenstrahlung, da das emittierte Spektrum insbesondere bei sehr dünnen Schichten auch Informationen des Substratmaterials enthalten kann. Kritisch ist weiterhin die Messung des Sauerstoffgehalts, da die Genauigkeit des Messverfahrens bei leichten Elementen vergleichsweise gering ist [Schmidt 94].

Da die direkte Identifikation diskreter Phasen mittels REM nicht möglich ist, kann zur Phasendetektion die Röntgendiffraktometrie eingesetzt werden. Die Zuordnung der in den Diffraktogrammen entstehenden Intensitätspeaks erfolgt über entsprechende Tabellenwerte. Die Nachweisgrenze liegt bei 5 Vol% der zu bestimmenden Phase. Bei sehr dünnen Schichten wird die Methode des streifenden Einfalls gewählt, was zu einer geringen Eindringtiefe der Röntgenstrahlung in das Material führt und eine Verfälschung der Messergebnisse durch das Substratmaterial verhindert [Neff 62], [Kämpfe 83].

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurden an einem REM Leica S 440 i mit energiedispersiver Röntgenanalyse Oxford Link ISIS System Series 300, an einer Mikrosonde JXA 8800 L der Firma JEOL mit Röntgenspektrometer (energiedispersiver Si(Li)-Detektor mit ultradünmem Eintrittsfenster) sowie an einem Röntgendiffraktometer Modell "XPRT" der Firma PHILIPS durchgeführt.

Zur Messung der Änderung der Winkellage von Spiegelflächen (Kippung) wurde ein Autokollimationsfernrohr (AKF) Elcomat 2000 der Firma Möller Wedel verwendet (Anzeigegenauigkeit  $\pm 0,05''$ , Fluktuation  $\pm 0,1''$ ).

Zur Detektion von Formabweichungen der Ebene der optischer Flächen wurde ein Interferometer der Firma Fisba Optik FST50HP genutzt (Fertigungsgenauigkeit der Referenzplatte  $\lambda / 10$  Referenzwellenlänge 632,8 nm).

Die Abscherversuche wurden an einem Zug-Druck-Prüfstand (INSTRON) mit 2 kN/100 N Kraftmessdose (Genauigkeit 0,5 % des Messwertes) durchgeführt. Die Baugruppen nach Abschnitt 5.4.2 wurden mittels einer speziellen Vorrichtung durch einen angepassten Vakuumschalter derart fixiert, dass die Einleitung der Kraft parallel zu den planaren Fügeflächen der Lötverbindung im Bereich des Lotes erfolgte. An den Baugruppen nach Abschnitt 6.2 wurde die Kraft parallel zur Lötverbindung in einem Abstand von ca. 0,3 mm über dem Substrat (Bild 4-12) eingeleitet. Bei allen Versuchen wurde eine Verfahrgeschwindigkeit von 0,2 mm/min verwendet.

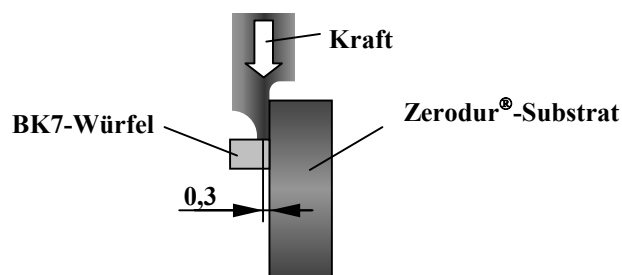


Bild 4-12 Prinzip der Krafteinleitung an der Baugruppe nach Abschnitt 6.2

Die Messungen zur Bestimmung der wellenlängenabhängigen Transmission bzw. Reflektion der verwendeten Bauteile und Materialien wurden an einem Spektralfotometer Lambda 900 der Fa. Perkin Elmer durchgeführt.

## **5 Technologieentwicklung**

### **5.1 Optische Bauelemente**

Optische Bauelemente werden nach [Haferkorn 94] definiert als reale technische Struktur, die als Ganzes in einer bestimmten Umgebung vorgegebene Eingangsgrößen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in vorgegebene Ausgangsgrößen überführt. Das Modell des Bauelements ist das Funktionselement, mit dem die wesentlichen Eigenschaften des Bauelements theoretisch erfasst werden. Die Unterteilung dieser Funktionselemente erfolgt nach ihrer Elementarfunktion wie Abbilden, Bündelbegrenzen, Ablenken, Dispergieren, Filtern, Lichtleiten, Polarisieren und Energiewandeln.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit betreffen vordergründig nichtabbildende optische Funktionselemente (ablenkende Funktionselemente) wie Spiegel oder Prismen. Diese Bauelemente weisen zumindest eine planare, als Fügefläche nutzbare Fläche auf, welche in einer polierten Oberflächenqualität ausgeführt ist. Bei indirekten Laserstrahlötprozessen ist weiterhin an dem zu durchstrahlenden Bauelement eine der Fügefläche gegenüberliegende Fläche poliert, um Streuverluste der Laserstrahlung beim Eintritt in das optische Material zu vermeiden.

Glas ist das wichtigste Material für optische Bauelemente, weil es neben ausgezeichneten thermischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften eine große Varianz der optischen Eigenschaften zulässt. Im Rahmen der Untersuchungen wird Glas in Form des gebräuchlichen optischen Massenglases BK7 sowie als SQ1 (Kieselglas) eingesetzt. SQ1 zeichnet sich durch einen weit ins UV-reichenden Transmissionsbereich sowie eine sehr niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aus und wird daher für unterschiedlichste optische Anwendungen verwendet. Zur Charakterisierung spezieller Eigenschaften der Lötverbindungen wurden einfache, den Prüfbedingungen angepasste Bauelemente aus BK7 und SQ1 verwendet. Die durch den Lötprozess entstehenden Lagetoleranzen von bezüglich des Wärmeausdehnungskoeffizienten signifikant unterschiedlichen Bauteilen, wurden anhand der Applikation eines hybriden optischen Moduls der Materialpaarung BK7/Zerodur<sup>®</sup> untersucht.

Oberflächenspiegel ergeben durch eine achromatische Abbildung und Vermeidung anderer mit dem Durchgang durch brechende Medien verbundener Fehler viele Vorteile vor refraktiven Systemen. An den Spiegelträger werden höchste Anforderungen bezüglich der Formge-



nauigkeit und Mikrogestalt sowie mechanischer und thermischer Stabilität, z. B. in Anwendungen als EUV-(Extrem Ultra Violett) Spiegeloptiken, gestellt. Zerodur<sup>®</sup> eignet sich hervorragend als Material für hochpräzise Spiegelträger, da es sich um eine anorganische porenfreie Glaskeramik mit extrem niedrigen Ausdehnungskoeffizient handelt. Chemische Eigenschaften und Härte ähneln denen optischer Gläser und ermöglichen folglich eine analoge Bearbeitung (Schleifen, Polieren, etc.). Das Verbinden solcher Bauelemente mit Substraten oder Spiegelträgern stellt somit auch höchste Anforderungen an die Füge­technologie, die sowohl die erforderliche Präzision realisieren als auch in den Verbindungseigenschaften den extremen Einsatzbedingungen (z. B. Hochvakuum) entsprechen muss.

Vor diesem Hintergrund wurden in der Arbeit optische Bauelemente aus Zerodur<sup>®</sup> untersucht. Eine Zusammenstellung der Materialdaten von BK7, Zerodur<sup>®</sup> und SQ1 ist in Tabelle 5-1 enthalten.

Tabelle 5-1 Eigenschaften der verwendeten optischen Materialien

	<b>BK7</b>	<b>Zerodur<sup>®</sup></b>	<b>SQ1</b>
Brechungsindex (800 nm)	1,51	1,535	1,45
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	7,1 10 <sup>-6</sup> /K (-30 °C – 70 °C) 8,3 10 <sup>-6</sup> /K (20 °C – 300 °C)	0,2 – 1 10 <sup>-7</sup> /K (0 °C – 50 °C)	0,55 10 <sup>-6</sup> /K
Wärmeleitfähigkeit	1,114 W/mK	1,46 W/mK	1,38 W/mK
Spezifische Wärme	0,858 J/gK	0,80 J/gK	0,703 J/gK
E-Modul	82 GPa	90,3 GPa	73 GPa
Querkontraktion	0,206	0,243	0,17
Dichte	2,51 g/cm <sup>3</sup>	2,53 g/cm <sup>3</sup>	2,2 g/cm <sup>3</sup>
Transmissionsbereich	400 nm – 2,3 µm	400 nm – 3 µm	160 nm – 3 µm

## 5.2 Thermomechanische Simulationen

Ausgehend von dem unter 3.2.3 beschriebenen Modell wird der Lötprozess der Materialpaarung Zerodur<sup>®</sup>/Zerodur<sup>®</sup> analysiert. Die Wechselwirkung mit der Laserstrahlung erfolgt durch einen Laserpunkt mit dem Fokusdurchmesser 0,65 mm, einer Bestrahlungsdauer von 450 ms und einer absorbierten Leistungsdichte von 6,5 W/mm<sup>2</sup>. Diese Parameter entsprechen einem für

die Materialpaarung Zerodur<sup>®</sup>/Zerodur<sup>®</sup> optimierten Lötprozess mit temperaturgeregelten Prozessführung (Solltemperatur 320 °C). Da von einer lokal eng begrenzten Beeinflussung der Bauteile ausgegangen wird, haben die einzelnen Zylinder einen Durchmesser von 4 mm und eine Höhe von 2 mm. Im Ergebnis der thermischen Simulation des Lötprozesses ergibt sich am Ende des Laserpulses das Temperaturfeld nach Bild 5-1 (Ausschnitt der Symmetrieebene). Die Maximaltemperatur im Strahlzentrum beträgt 438 °C.

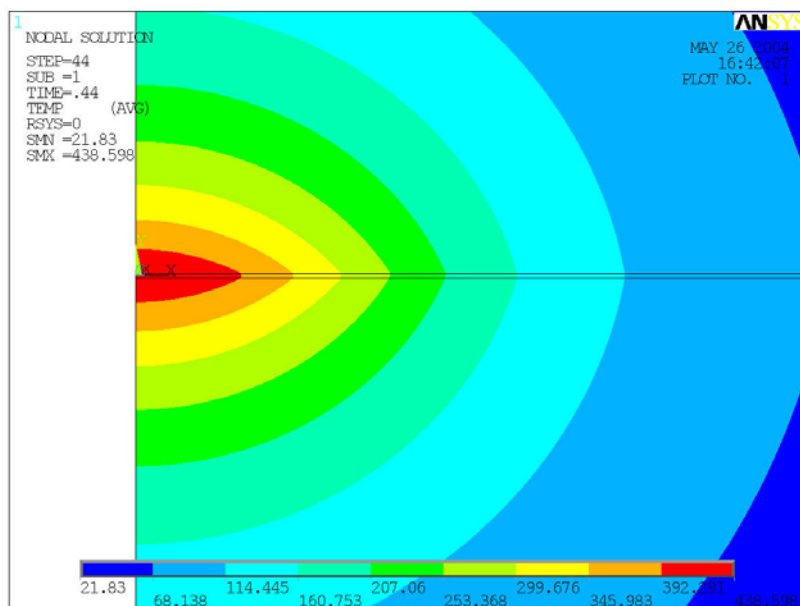


Bild 5-1 Temperaturfeld der gelöteten Zerodur<sup>®</sup> Körper nach 0,44 s,  $T_{max} = 438 \text{ °C}$

Bei Integration über die Pyrometermessfläche ( $\varnothing 0,61 \text{ mm}$ ) ergibt sich eine Temperatur von ca. 325 °C. Das entspricht relativ gut dem experimentellen Wert von 320 °C (Bild 5-2).

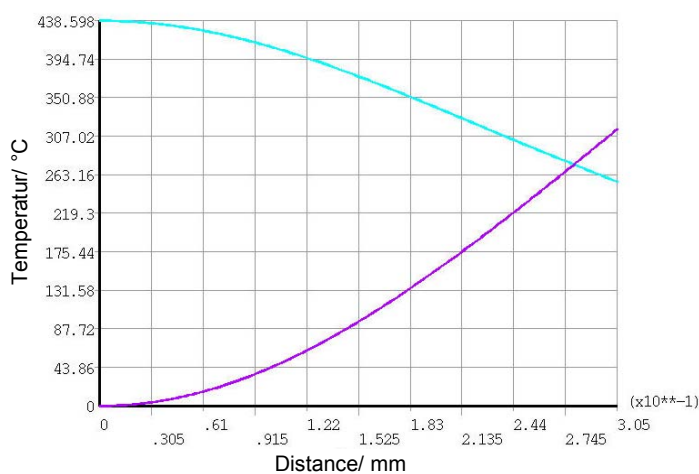


Bild 5-2 Temperaturverlauf über Pyrometermeßfläche (oberer Kurve Temperatur / untere Kurve über die Fläche integrierte Temperatur)

Gleichzeitig wird im Ergebnis der Simulation die geringe thermische Beeinflussung der Lötstellenumgebung deutlich. Der Bereich der Maximaltemperatur erstreckt sich bezogen auf den Strahlmittelpunkt in der x-Koordinate auf ca. 0,35 mm und in der y-Koordinate auf ca. 0,1 mm. Nach einem Zeitraum von 3 s nach Prozessbeginn liegt im Bereich der Lötstelle bei adiabaten Randbedingungen eine Maximaltemperatur von ca. 29 °C vor (Bild 5-3).

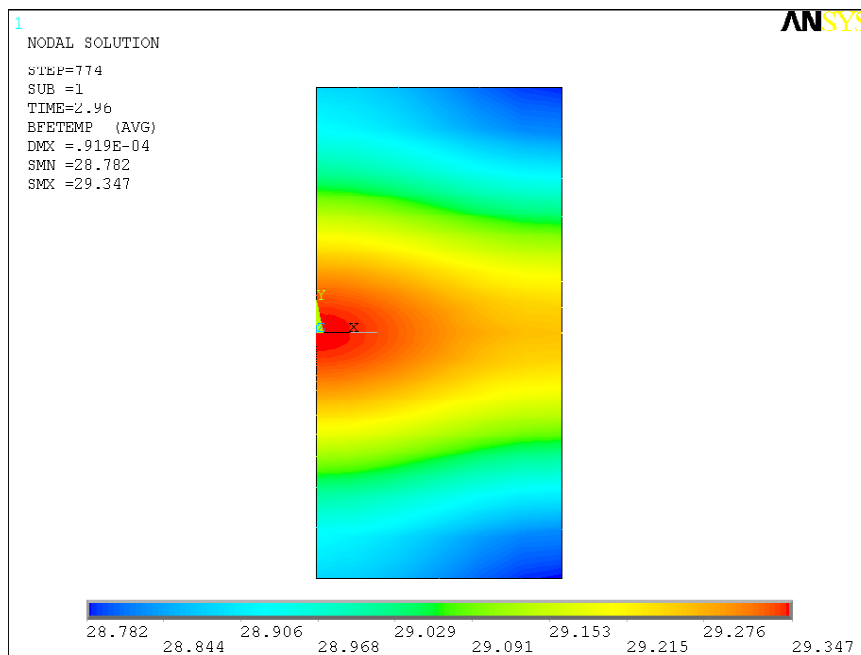


Bild 5-3 Temperaturfeld der gelöteten Zerodur<sup>®</sup> Körper nach 3 s,  $T_{\max} = 29\text{ °C}$

Damit wird das theoretisch aufgestellte thermische Modell des Laserstrahlweldprozesses experimentell bestätigt. Basierend auf diesem Ergebnis ist es möglich, Auswirkungen veränderter Prozessparameter, wie z. B. der Fokusgeometrie, zu berechnen, auf deren Darstellung nicht näher eingegangen werden soll.

Die Anwendung eines solchen Temperaturfeldes als Lastvektor für eine strukturmechanische Simulation ermöglicht die Charakterisierung der im Bereich der Lötstelle entstehenden mechanischen Belastungen. Das beschriebene Modell wird dazu durch Veränderung der Elementtypen verwendet. Grundlage bildet ein bilinear kinematisches Materialverhalten des Lotes mit plastischer Dehnung nach Überschreiten der Fließgrenze. Die Spannungs-Dehnungskurve vor und nach der Fließgrenze ist in diesem Materialmodell temperaturabhängig linear approximiert. Der Bauschinger Effekt wird berücksichtigt, d. h. die plastische Verformung des Materials in eine Richtung mit anschließender entgegengesetzter Verformung

setzt die Elastizitätsgrenze herab. Gleichzeitig werden, so weit bekannt, temperaturabhängige Materialdaten für die Wärmeausdehnung und den E-Modul verwendet und eine zusätzliche Drucklast aufgebracht. Die Fügezone Bild 5-4 zeigt die Spannung  $S_1$  3,5 s nach Prozessbeginn im Zerodur<sup>®</sup>. Diese stellt für Gläser und Glaskeramiken als betragsmäßig größte Hauptspannungskomponente in Form der Zugspannung das Versagenkriterium dar.

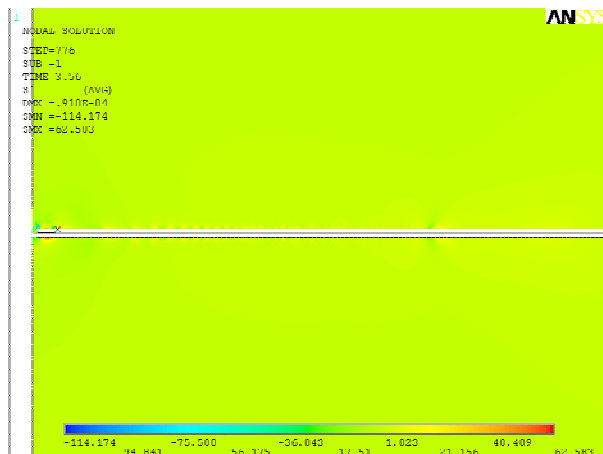


Bild 5-4 Spannungskomponente  $S_1$  im Zerodur<sup>®</sup> (Fügezone) nach 3,5 s,  $S_{1\max} = 62 \text{ MPa}$

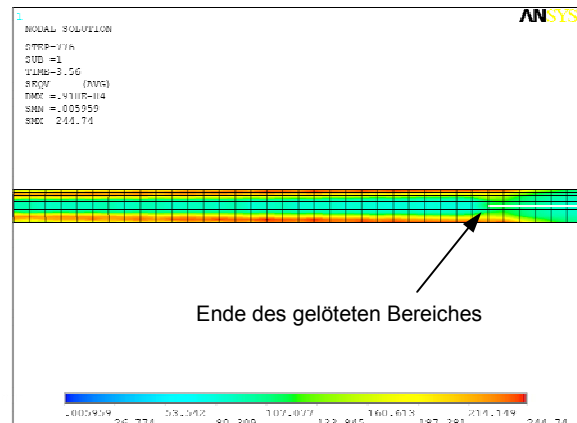


Bild 5-5 Vergleichsspannung in der Lotschicht im Randbereich der Fügezone nach 3,5 s,  $SEQV_{\max} = 244 \text{ MPa}$

Die Maximalspannungen von 62 MPa treten sehr lokal im Strahlzentrum auf. Diese Belastung ist für das Material ertragbar. Zur Beurteilung der Beanspruchung von Metallen wird die von-Mises Vergleichsspannung verwendet. Im Randbereich der Fügezone treten in der Lotschicht Maximalwerte von 244 MPa direkt am Übergang zum Zerodur<sup>®</sup> auf (Bild 5-5). Das Lot wird somit bis in den Bereich der Fließgrenze belastet.

Das Ergebnis der mechanischen Simulation verdeutlicht die geringe, lokal begrenzte mechanische Belastung der gelöteten Baugruppe. Verbindungen gleichartiger Zerodur<sup>®</sup>-Bauteile durch dünne AuSn-Lotschichten können somit durch einen Laserstrahlötprozess hergestellt werden. Eine experimentelle Verifikation der Simulationsergebnisse findet sich in stabilen, rissfreien Lötverbindungen von Zerodur<sup>®</sup>-Bauteilen auf deren Anwendung in Kapitel 6.1 genauer eingegangen wird.

Im Folgenden wurde die Eignung der vorgestellten Modelle zur Simulation von Lötprozessen ungleichartiger Materialpaarungen untersucht. Gleichzeitig sollen die Auswirkungen von signifikant unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Materialien

auf das Belastungsverhalten der Lötverbindung analysiert werden. Ausgewählt wurde, auch in Bezug auf die Applikation in Kapitel 6.2, die Paarung Zerodur<sup>®</sup>/BK7. Um eine Vergleichbarkeit zur Simulation Zerodur<sup>®</sup>/Zerodur<sup>®</sup> zu erhalten, wurden Wärmequelle und Randbedingungen beibehalten. Ergebnisse der thermischen Simulation zeigen die Bilder 5-6 und 5-7.

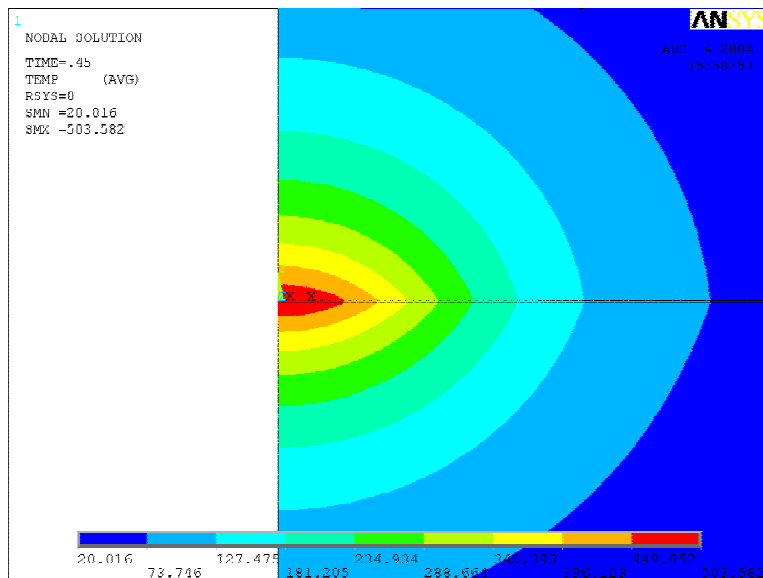


Bild 5-6 Temperaturfeld der gelöteten Zerodur<sup>®</sup>/BK7 Körper (Fügezone) nach 0,44 s,  $T_{\max} = 503 \text{ °C}$

Erkennbar ist eine erhöhte Maximaltemperatur im Fokus von  $503 \text{ °C}$  sowie eine geringfügig asymmetrische Geometrie des Temperaturfeldes, was auf die schlechtere Wärmeleitfähigkeit von BK7 gegenüber Zerodur<sup>®</sup> zurückzuführen ist. Die Integration über die Pyrometermeßfläche ergibt  $380 \text{ °C}$ . Nach 3 s hat sich eine ebenfalls asymmetrische Temperaturverteilung von  $27 \text{ °C}$  bis  $29 \text{ °C}$  eingestellt.

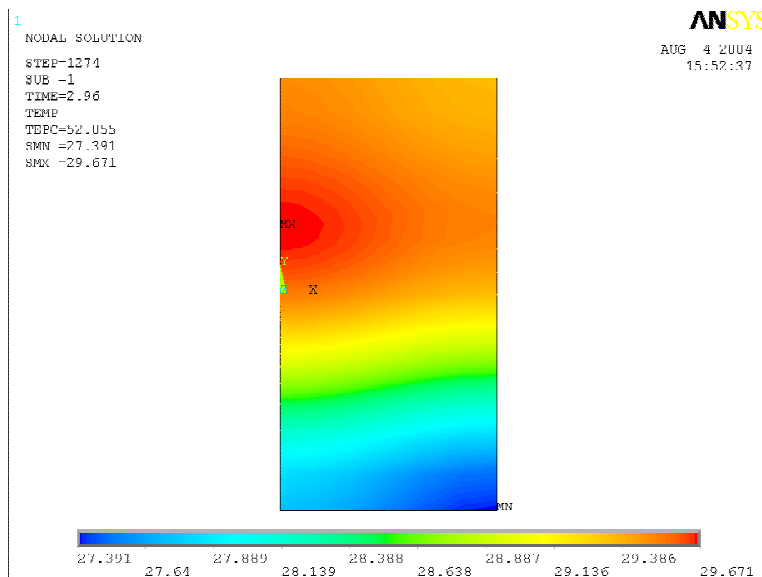


Bild 5-7 Temperaturfeld der gelöteten Zerodur® / BK7-Körper nach 3 s,  $T_{\max} = 29^{\circ}\text{C}$

Die strukturmechanische Simulation des Lötprozesses erfordert vor allem für den Zeitraum nach Ende der Laserbestrahlung/Abkühlung eine sehr viel feinere zeitliche Auflösung als im beschriebenen Beispiel der gleichartigen Materialpaarung. Im Ergebnis werden nachfolgende Sachverhalte deutlich.

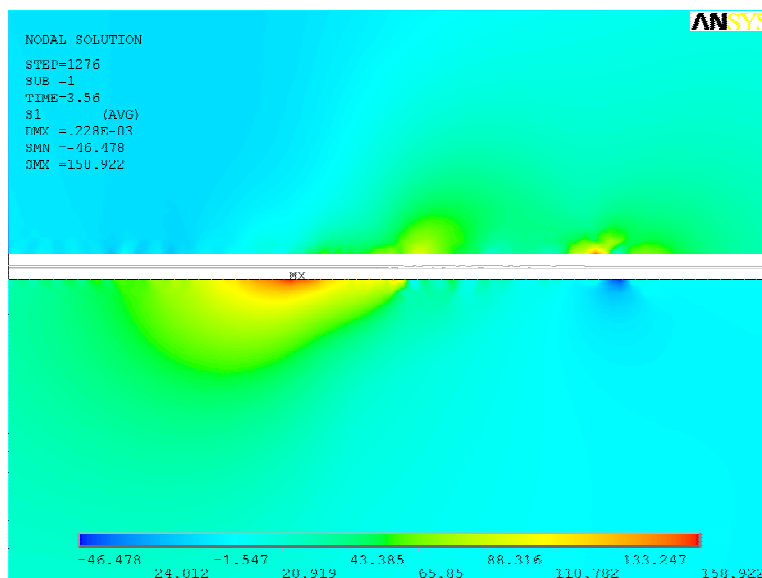


Bild 5-8 Spannungskomponente S1 in den optischen Materialien nach 3,5 s,  $S1_{\max} = 159\text{ MPa}$ ,  
 Randbereich der Fügezone

Aus Sicht der Spannungsbelastung befindet sich der kritische Bereich der Lötverbindung am Übergang zwischen gelötetem und nicht verbundenem Bereich (Bild 5-8). Dort werden lokal

bis zu 159 MPa Zugspannungen in beiden optischen Materialien aufgebaut. Das hat eine hohe Wahrscheinlichkeit der Rissbildung oder Zerstörung des Materials zur Folge und erfordert eine den realen Prozessparametern exakt angepasste Simulation (die Parameter dieser Simulation entstammen dem Lötprozess Zerodur<sup>®</sup>/Zerodur<sup>®</sup>). Die Lotschicht wird in diesem Bereich ähnlich dem vorherigen Modell bis in den Bereich der Fließgrenze belastet (Bild 5-9). Es treten maximale Vergleichsspannungen von 270 MPa auf. Lötverbindungen von Materialien mit derart unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten sind deshalb im Vorfeld sehr genau bezüglich der Realisierbarkeit zu prüfen.

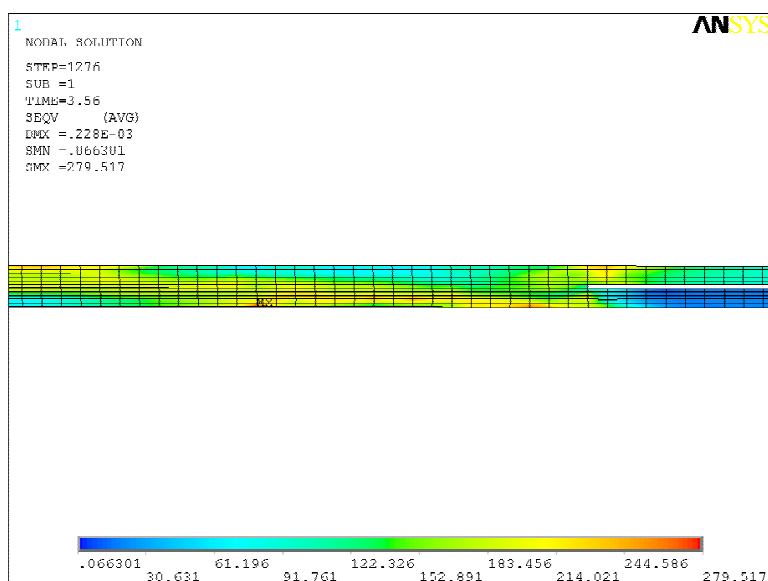


Bild 5-9 Vergleichsspannung in der Lotschicht nach 3,5 s,  $SEQV_{\max} = 244 \text{ MPa}$

### 5.3 Metallisierung - Lotapplikation

Die Lotaufbringung auf unterschiedliche optische Trägermaterialien wie Glas, Glaskeramik oder Kristalle erfordert die Herstellung extrem haftfester Metallisierungen. Diese dienen als Lothilfsschichten, auf welche das eigentliche Lot aufgebracht wird. Ausgangspunkt der Untersuchungen bildete ein aus der Literatur bekanntes Unterschichtsystem, bestehend aus Ti/Pt/Au [Wada 91], [Lee 92], [Ivey 97], [Pitroff 99]. Ti fungiert als Haftschicht, Pt als Diffusionsbarriere und Au als Benetzungsschicht für das zu applizierende Lot.

Diese Untermetallisierung wurde im Rahmen der Arbeit in Verbindung mit ebenfalls gesputterten AuSn-Lotschichten angewendet. Versuche zur Optimierung des gesamten Schichtsystems (Untermetallisierung + Lotschicht) während der Untersuchungen zeigten, dass mechanisch stabile Lötverbindungen auch ohne die Au-Benetzungsschicht hergestellt werden kön-

nen. Dadurch entsteht eine Kostenreduktion des Verfahrens sowie die Möglichkeit die Lot-schicht und die Untermetallisierung in Vakuumfolge zu sputtern. Weiterhin wurde im Verlauf der Untersuchungen aus Gründen der Stöchiometrie der Lotlegierung die Pt-Diffusionsbarriere durch eine Cr-Diffusionsbarriere ersetzt. Die Zusammenhänge werden im Kap. 5.3.1 genauer erläutert. Das neu entwickelte Schichtsystem ist in Bild 5-10 rechts dargestellt.

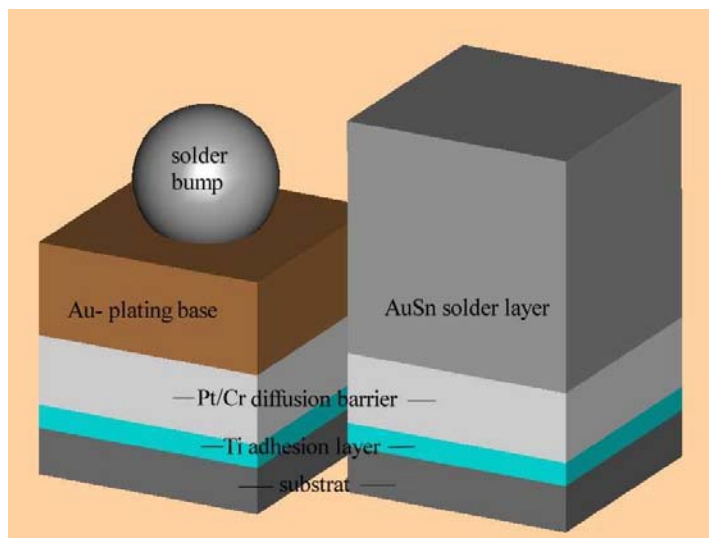


Bild 5-10 Metallisierungssysteme (nicht maßstäblich)

Die erforderliche Dicke der zu applizierenden Lotschicht wurde experimentell mit 2  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$  ermittelt. Geringere Lotschichtdicken verhindern die Ausbildung stabiler Lötverbindungen, größere Dicken führen zu uneffektiven Parametern des Sputterprozesses verbunden mit erhöhten Kosten. Das Gesamtschichtsystem weist deshalb eine Dicke von ca. 3,5  $\mu\text{m}$  auf.

Die Untermetallisierung mit einer Au-Benetzungsschicht (Bild 5-10 links) wird in Abhängigkeit des Substratmaterials und dessen Oberflächenrauigkeit in Bereichen von 300 nm bis 500 nm Dicke gesputtert. Dieses System kann für Lötuntersuchungen mit extern zugeführten AuSn-Loten mit höheren Lotdicken sowie zum Einsatz alternativer niedrigschmelzenderer Weichlote wie SnAg verwendet werden (vgl. Kapitel 6.3). Das Masseverhältnis der einzelnen Elemente sowie Diffusionsprozesse und Phasenbildungen ist in diesen Fällen speziell zu analysieren, um das bereits erwähnte spröde Sn-reiche Eutektikum  $\text{AuSn}_4$  zu vermeiden [Scheel 02].

Die Charakterisierung der Schichtsysteme bezüglich Haftung erfolgte mittels Tapetest nach ISO 9211-02-03-01. Trotz der sehr hohen für Sputterprozesse üblichen Schichtdicken,



insbesondere der AuSn-Lotschicht, konnte ein sehr haftfestes Gesamtsystem nachgewiesen werden.

### 5.3.1 Einstellen der Legierungszusammensetzung gesputterter Lotschichten

Auf kritische Veränderungen thermomechanischer Eigenschaften der eutektischen AuSn-Legierung bei Abweichungen von der 80/20 wt% Au/Sn-Zusammensetzung wurde in Kap. 2.2.3 bereits eingegangen. Um diese Verschiebungen zu vermeiden, wurde angestrebt das AuSn-Eutektikum bereits als Legierung aus einem ebenfalls eutektischen 80Au20Sn-Target zu sputtern. Eine gemessene Legierungszusammensetzung der applizierten Lotschicht von etwa 90/10 wt% Au/Sn auf dem Substrat führte zu einer genaueren Untersuchung des Sputterprozesses.

Das Sputtern von Legierungen beginnt mit dem Herauslösen von Atomen mit der höchsten Sputterausbeute bis zum Einstellen eines Gleichgewichtszustandes auf der aktiven Sputteroberfläche (im Sputtergraben). Das Gleichgewicht wird nach ca. 100 bis 200 Atomlagen erreicht. Das Masseverhältnis der gesputterten Atome entspricht dem Masseverhältnis im Target, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Das Target liegt als Legierung vor, nicht als Mischung.
- Der Gleichgewichtszustand ist erreicht.
- Im Target finden keine Diffusionsprozesse statt.

Während die ersten beiden Voraussetzungen beim verwendeten AuSn-Target erfüllt sind, ist der Ausschluss von Diffusionsprozessen nicht ohne weiteres möglich [Feigl 02].

An REM-Aufnahmen gesputterter Schichten wurde eine Veränderung der Gefügestruktur über einen Zeitraum von ca. einem Jahr (Bilder 5-11 und 5-12) beobachtet. Die ältere Probe zeigt ein deutlich gröberes Gefüge mit Entmischungserscheinungen. Durch EDX-Analysen wurde die Zusammensetzung der AuSn-Lotschichten im Verhältnis 89/11 wt% Au/Sn festgestellt (Messfleck ca. 0,3 mm x 0,3 mm). Die in den Bildern größeren, hellere Bereiche lassen auf eine Au-reiche Phase sowie in den dunkleren Bereichen auf eine Sn-reichere Phase schließen.

Bei einer gemessenen Targetzusammensetzung von 80/20 wt% Au/Sn erfolgt somit während des Beschichtungsprozesses eine Verarmung an Sn.

Bei einer Sputterausbeute von 2,5 Au-Atomen und nur 1,2 Sn-Atomen pro Ar-Atom (vgl. Kapitel 3.1) müsste ein bevorzugter Abtrag von Au jedoch zu einer Verarmung dieses Elementes und damit einer Anreicherung von Sn an der Targetoberfläche führen.

Die visuell beobachtete Au-Färbung des Sputtergrabens könnte hier eine Ursache für starke ioneninduzierte Diffusionsprozesse innerhalb des AuSn-Targets sein und diesen Widerspruch erklären.

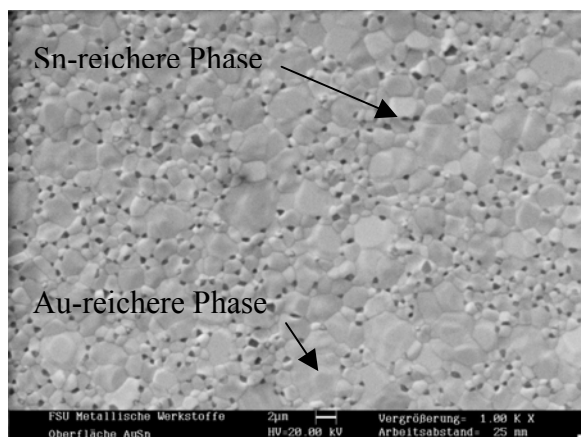


Bild 5-11 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht 90/10 wt%, gröberes Gefüge, ältere Charge

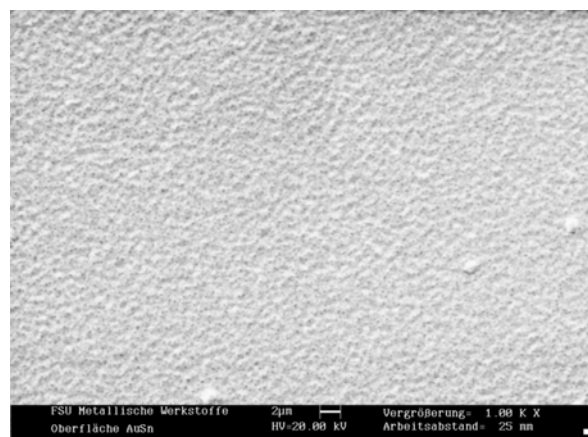


Bild 5-12 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht 90/10 wt%, jüngere Charge

Zusammensetzung

	wt %	s %	Atomic %
Gesamte Fläche			
Sn L	<b>11.04</b>	0.39	17.07
Au M	<b>88.96</b>	0.39	82.93

	wt %	s %	Atomic %
Gesamte Fläche			
Sn L	<b>11.64</b>	0.40	17.93
Au M	<b>88.36</b>	0.40	82.07

Zur Stützung dieser Annahme wurden Beschichtungsversuche unter gezielter Variation relevanter Sputterparameter durchgeführt und die Zusammensetzung der Schicht mittels EDX analysiert.

## Einfluss von niedrigerem Sputtergasdruck

Eine Veränderung des Sputtergasdruckes führt zu einer geringfügigen Änderung der Zusammensetzung der aufgesputterten Schicht in Richtung einer Sn-reicheren Legierung (87/13 wt% Au/Sn, Bild 5-13 und 5-14). Die Gefügestruktur ist unverändert feinkörnig ausgebildet (vgl. Bild 5-12).

Sputtergasdruck  $9 \cdot 10^{-4}$  mbar

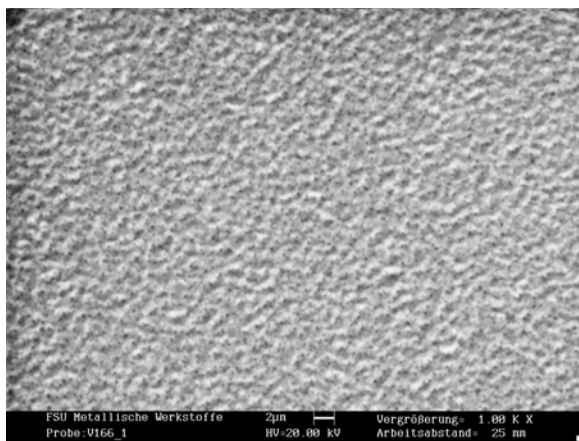


Bild 5-13 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht

Sputtergasdruck  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar

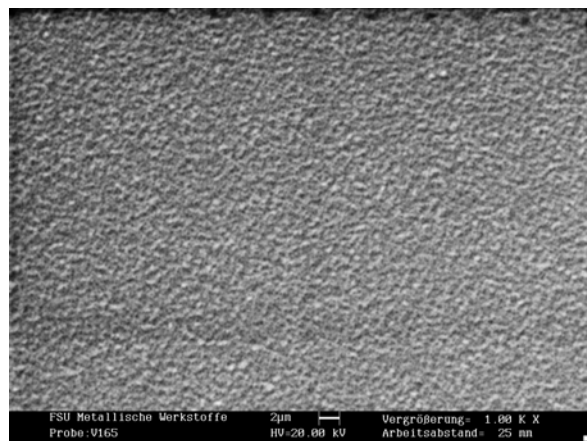


Bild 5-14 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht

### Zusammensetzung

	wt %	s %	Atomic %		wt %	s %	Atomic %
Gesamte Fläche				Gesamte Fläche			
Sn L	<b>13.21</b>	0.31	20.16	Sn	<b>11.29</b>	0.30	17.44
Au	<b>86.79</b>	0.31	79.84	Au M	<b>88.71</b>	0.30	82.56

## Variation der Sputterleistung

Die Variation der Sputterleistung führt zu einem deutlich größeren Gefüge der aufgesputterten Lotschicht sowie mit zunehmender Spannung zur Verschiebung der Legierungszusammensetzung in den Au-reicheren Bereich mit 92/8 wt% Au/Sn (Bilder 5-15 und 5-16).

Sputterleistung 300 W

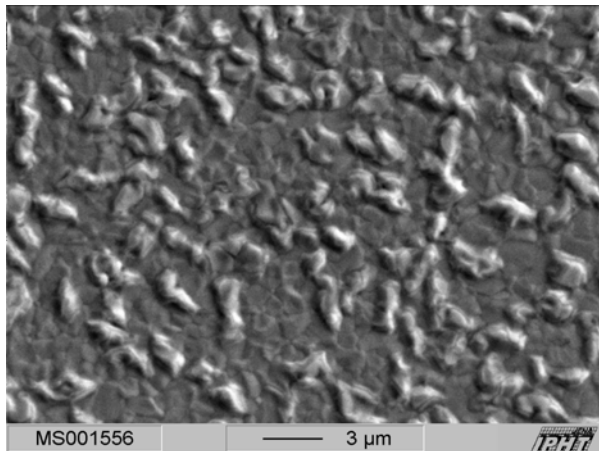


Bild 5-15 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht

Sputterleistung 800 W

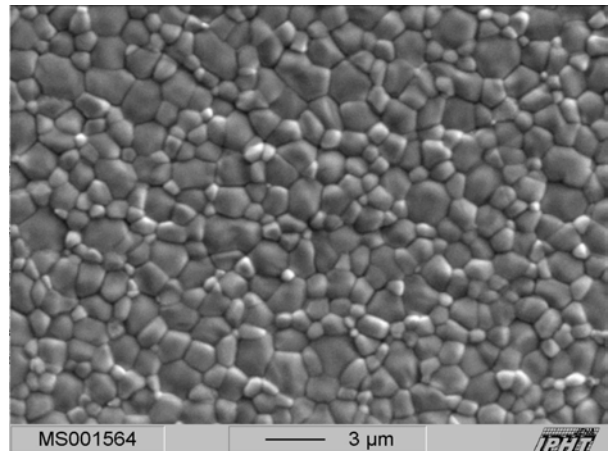


Bild 5-16 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht

## Zusammensetzung

	wt %	s %	Atomic %
Gesamte Fläche			
Sn L	<b>11.51</b>	0.20	17.75
Au M	<b>88.49</b>	0.20	82.25

	wt %	s %	Atomic %
Gesamte Fläche			
Sn L	<b>7.73</b>	0.18	12.21
Au M	<b>92.27</b>	0.18	87.79

## Sputterleistung 500 W (ohne Bild)

## Zusammensetzung

	wt %	s %	Atomic %
Gesamte Fläche			
Sn L	<b>9.40</b>	0.19	14.69
Au M	<b>90.60</b>	0.19	85.31

Durch eine Variation der Sputterparameter konnte die eutektische Zusammensetzung nicht realisiert werden. Deshalb wurden weitere Beschichtungsversuche durchgeführt, in denen die angestrebte Zusammensetzung 80/20 wt% Au/Sn durch Vorhalten der Targetzusammensetzung eingestellt werden sollte.

### Sputtern von AuSn-Lotschichten mit einem Target veränderter Legierungszusammensetzung (Erhöhung des Sn-Gehalts)

Die Zusammensetzung der mit diesem Target aufgesputterten Lotschicht wurde mit 65/35 wt% Au/Sn gemessen und liegt damit im Sn-reicheren Gebiet neben der angestrebten eutektischen Zusammensetzung (Bild 5-17). Das Gefüge ist relativ feinkörnig ausgebildet und unterscheidet sich nicht signifikant von der Struktur des „Ausgangsgefüges“ (vgl. Bild 5-12) bzw. der Gefüge aufgesputterter Schichten bei variiertem Sputtergasdruck. Eine Veränderung der

gesputterten Legierungszusammensetzung durch Variation der Sputterparameter Druck und Sputterleistung war bei diesem Sputtertarget nicht nachweisbar. Der vorgehaltene Sn-Gehalt der Targetlegierung wurde darauf hin reduziert.

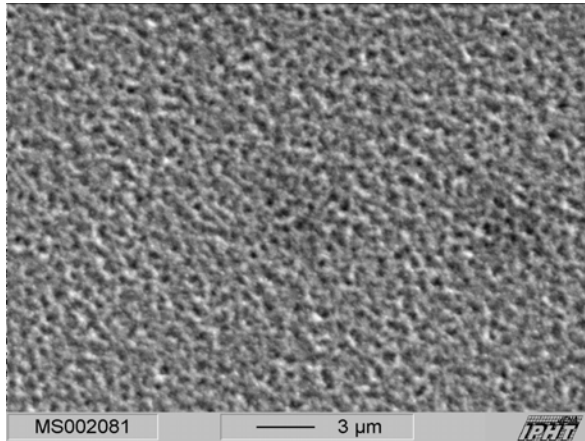


Bild 5-17 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht bei erhöhtem Sn-Gehalt des Targets

Zusammensetzung	wt %	s %	Atomic %
gesamte Fläche			
Sn L	<b>34.57</b>	0.22	46.72
Au M	<b>65.43</b>	0.22	53.28

### **Sputtern von AuSn-Lotschichten mit einem Target veränderter Legierungszusammensetzung (geringfügige Erhöhung des Sn-Gehalts)**

Die Zusammensetzung der mit diesem Target aufgesputterten Lotschicht wurde bei einer Sputterleistung von 1000 W mit 20.5/79.5 wt% Au/Sn gemessen und entspricht damit im Rahmen der Messgenauigkeit der angestrebten eutektischen Zusammensetzung. Das Gefüge ist sehr feinkörnig ausgebildet und homogen verteilt. Die REM Aufnahmen (Bilder 5-18 und 5-19) lassen auf ein zweiphasiges Gefüge schließen mit der Sn-reicheren Phase in den dunkleren sowie der Au-reichen Phase in den helleren Gebieten.

Sputterleistung 800 W

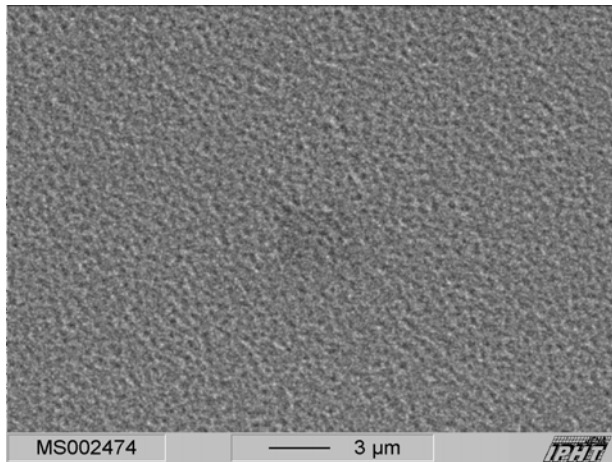


Bild 5-18 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht

Sputterleistung 1000 W

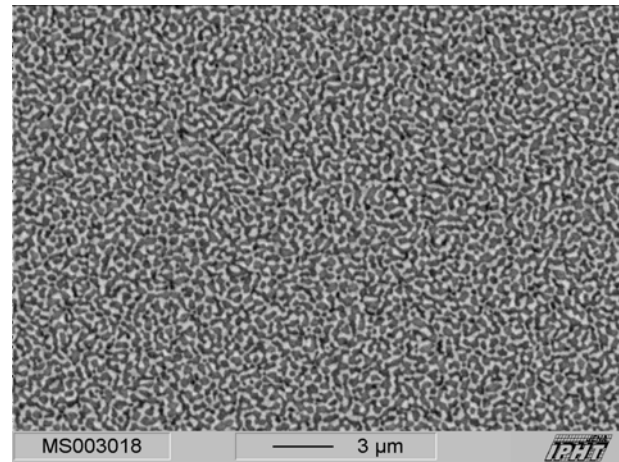


Bild 5-19 REM-Aufnahme AuSn-Lotschicht

## Zusammensetzung

	wt %	s %	Atomic %
gesamte Fläche			
Sn L	<b>21.4</b>	0.4	32.9
Au M	<b>78.6</b>	0.4	67.1

	wt %	s %	Atomic %
gesamte Fläche			
Sn L	<b>20.5</b>	0.4	31.5
Au M	<b>79.5</b>	0.4	68.5

In den vorgestellten Untersuchungen wurde die AuSn-Lotschicht aus Kostengründen zunächst auf Glaswafer gesputtert. Der Einsatz als Lotschicht im Laserstrahl­lötp­rozess erfordert die Applikation auf ein sehr haftfestes Untermetallisierungssystem (vgl. 5.2.2). Das Sputtern der AuSn-Lotschicht mit den ermittelten Parametern führte beim Applizieren auf die aus Ti und Pt bestehende Untermetallisierung erneut zu einer Verschiebung der Legierungszusammensetzung (Bild 5-20).

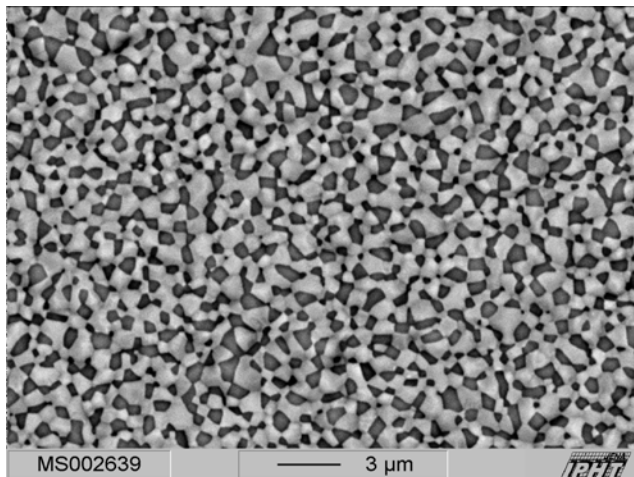


Bild 5-20 AuSn-Lotschicht auf Ti/Pt-Untermetallisierung

## Zusammensetzung

	wt %	s %
gesamte Fläche		
Sn L	<b>15.81</b>	0.5
Au M	<b>84.22</b>	0.5

Ursache ist das Auflösen von Pt im AuSn auf Grund der ähnlichen Gitterstruktur von AuSn sowie der PtSn-Phase. Die Funktion der Diffusionsbarriere übernimmt im Wesentlichen Ti. Eine Erklärung dieses Sachverhalts lässt sich in verschiedenen Literaturstellen finden [Ivey 97][Lee 94][Tjong 00] u. a.. So detektiert [Ivey 97] nach dem Lötprozess eines Systems Ti/Pt/Au/AuSn lediglich eine intakte Haftschiicht aus Ti, während das AuSn signifikante Anteile des Pt enthielt.

Analoge Reaktionen finden bei der Applikation der AuSn-Lotschicht auf einer Pt-Diffusionsbarriere statt. Auf Grund relativ hoher Temperaturen auf dem Substrat während des Sputterprozesses (150 °C bis 200 °C) steigt das Diffusionsvermögen der Schicht und es kommt im Übergangsbereich zwischen Pt und AuSn zur Bildung einer Mischphase bestehend aus Pt, Sn und Au. Diese Phase entzieht der eigentlichen Lotlegierung Sn und es kommt zur detektierten Verschiebung der Legierungszusammensetzung. Diese Erklärung wird in Kapitel 5.4.1 bewiesen. Eine Substitution der Pt- durch eine Cr-Diffusionsbarriere führte zu einer haftfesten Metallisierung mit eutektischer Zusammensetzung der AuSn-Lotschicht (20.5/79.5 wt% Au/Sn). Ein analoges Ergebnis wird in der Literatur [Tjong 01] beschrieben. Die Phasen AuSn ( $\delta$ ) und Au<sub>5</sub>Sn ( $\zeta'$ ) der eutektischen Legierung konnten durch Analyse mittels Röntgendiffraktometer bestätigt werden (Bild 5-21).

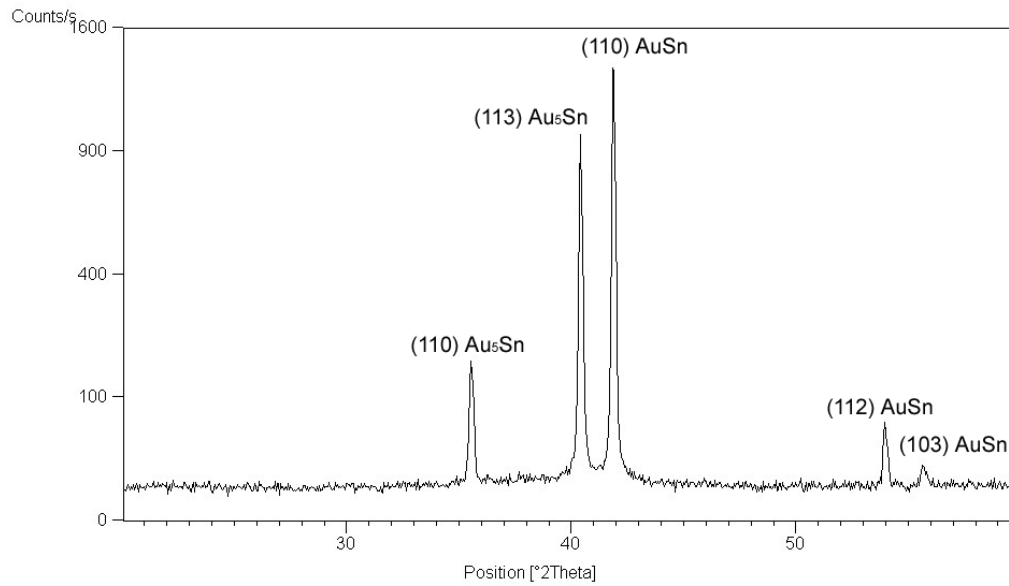


Bild 5-21 Röntgendiffraktogramm der eutektischen Lotschicht

Für die nachfolgenden Lötversuche wurden die entwickelten Schichtsysteme nach Tabelle 5-2 verwendet.

Tab. 5-2 Bezeichnung der Lotschichtsysteme

	System A	System N	System C
Bestandteile	Ti/Pt/AuSn	Ti/Pt/AuSn	Ti/Cr/AuSn
Zusammensetzung der Lotschicht/ wt% Au/Sn	89,0/11,0 (s = 0,4)	84,2/15,8 (s = 0,5)	79,2/20, (s = 0,5)

Zusammenfassend wird festgestellt, dass im Rahmen der Untersuchungen ein neuartiger Sputterprozess entwickelt wurde, durch den ein haftfestes Abscheiden einer eutektischen 80Au20Sn-Lotlegierung in Vakuumfolge mit der erforderlichen Haft- und Barrierschicht realisiert werden kann.


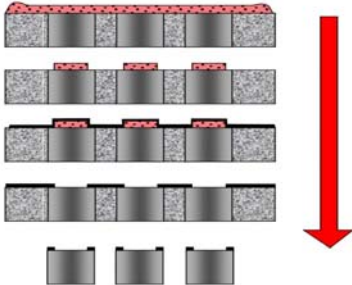
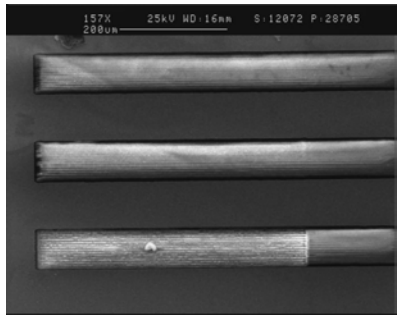
### 5.3.2 Strukturierung

Für die lokale Applikation der Schichtsysteme können unterschiedliche Maskierungsverfahren entsprechend den Anforderungen an den Übergangsbereich von Substratoberfläche und Schicht eingesetzt werden (Tabelle 5-3). Anwendung finden vor allem Maskierungsvorrich-



tungen mit Dampfschattenmasken. Die relativ kostengünstig zu fertigenden Masken ermöglichen einen kontinuierlichen Substrat-Schichtübergang, bedingen aber einseitig begrenzte Strukturen. Bei höheren Anforderungen an den Substrat-Schichtübergang sowie bei komplexeren Strukturen mit geringeren Strukturgrößen (< 1 mm) sind photolithographische Prozesse oder auch Verfahren der Laserablation einzusetzen [Lugscheider 02].

Tabelle 5-3 Vergleich von Strukturierungsverfahren

Dampfschattenmasken	Photolithographie	Laserablation
 <p data-bbox="188 1093 451 1126">Maskierungsvorrichtung</p>	 <p data-bbox="611 1093 887 1126">Photolithographieprozess</p>	 <p data-bbox="1015 1081 1366 1137">Strukturiertes Schichtsystem auf BK7 [Quelle IAP Jena]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- kontinuierlicher Substrat-Schichtübergang</li> <li>- kostengünstige Masken</li> <li>- nur einseitig begrenzte Strukturen möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diskontinuierlicher Substrat-Schichtübergang</li> <li>- komplexer, teurer Prozess</li> <li>- Beeinflussung der Schichten bei Lift-off/ Vereinzeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Femtosekunden- Laser</li> <li>- hochgenaue Strukturen</li> <li>- sehr kleine Flächen</li> </ul>

Um Linsen oder Fasern in entsprechende Fassungen zu fixieren, ist es erforderlich zylinderförmige Proben, wie z. B. Glasfasern, auf der Zylinderfläche zu beschichten. Durch eine speziell entwickelte, vakuumtaugliche Drehvorrichtung wurden dafür die Voraussetzung geschaffen.

### 5.4 Strahl- und Prozessparameter

Nach 2.2.1 werden die Parameter des Laserstrahl- und Laserstrahlprozesses in Werkstoff-, Bauteil- sowie Strahl- und Prozessparameter unterschieden. Ein großer Teil dieser Parameter wird bereits durch die zu untersuchende Applikation festgelegt.

Die Werkstoffparameter ergeben sich aus den thermophysikalischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe Zerodur<sup>®</sup>, BK7 Glas, SQ1 (vgl. Tab 5-1) sowie dem AuSn-Lot in Ver-

bindung mit den verwendeten Untermetallisierungen. Die beim Durchgang der Laserstrahlung durch das optische Material entstehenden Transmissionsverluste, die wellenlängenabhängige Reflexion bei nahezu senkrechtem Einfall am AuSn-Lotschichtsystem bzw. an der Ti-Untermetallisierung wurden experimentell ermittelt (Diagramme 5-1 und 5-2).

Aus den Messungen folgt, dass bei einer direkten Bestrahlung und Verwendung des gesputterten Lotschichtsystems (polierte Oberflächenqualität des Substrates) bei der Wellenlänge des Lötlasers (808 nm) ca. 25 % bis 30 % Absorption zu erwarten ist, während bei indirekter Bestrahlung und gleichen Ausgangsbedingungen der Anteil absorbiertes Laserstrahlung bei ca. 50 % bis 55 % liegt (Diagramm 5-1).

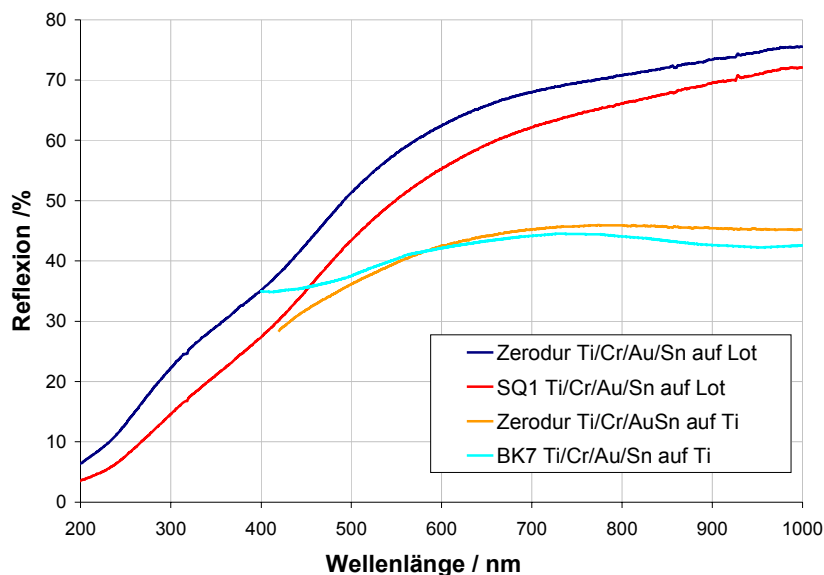


Diagramm 5-1 Wellenlängenabhängige Reflexion am Lotschichtsystem

Weiterhin ist beim Durchstrahlen von Zerodur<sup>®</sup>-Bauteilen mit einem absorbierten Anteil der einfallenden Strahlung von ca. 2 % pro 5 mm Materialdicke zu rechnen. Im Diagramm 5-2 sind die Transmissionsverluste bei Durchstrahlung von 5 mm und 30 mm Zerodur<sup>®</sup> im Vergleich zu SQ1 dargestellt. SQ1 wie auch BK7 sind in diesem Wellenlängenbereich vollständig transparent. Die Verluste durch Grenzflächenreflexionen (4 %) beim Eintritt der Laserstrahlung in das optische Material sind in den betreffenden Fällen berücksichtigt.

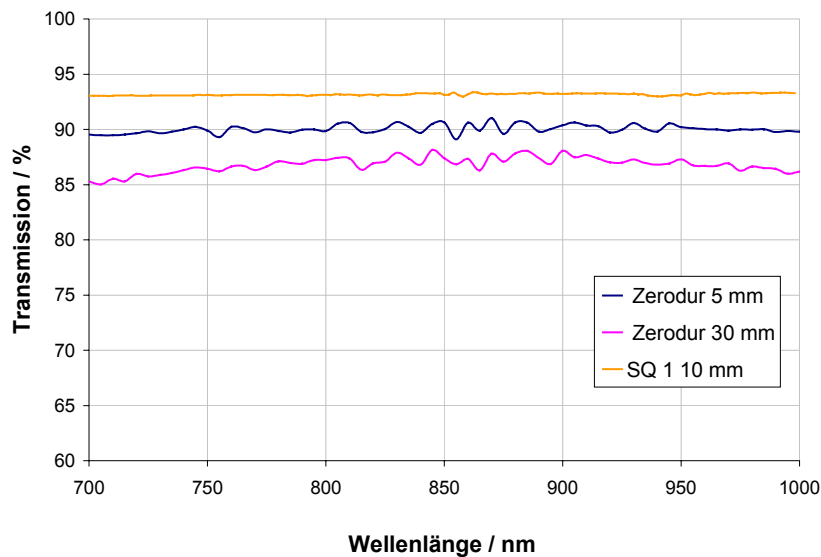


Diagramm 5-2 Wellenlängenabhängige Transmissionsverluste bei Durchstrahlung von SQ1 und Zerodur®

Neben der Absorption ist eine Beeinflussung der Werkstoffparameter durch eine Variation der meist applikationsgebundenen Werkstoffpaarung der zu verbindenden Bauteile sowie über eine Veränderung der Legierungszusammensetzung des Lotes (vgl. Kapitel 5.3.1) möglich. Die nachfolgenden Untersuchungen unterscheiden sich in Lötprozesse gleichartiger und ungleichartiger Materialpaarungen mit eutektischem oder nichteutektischem Lot.

Die Bauteilparameter resultieren aus den optischen und mechanischen Anforderungen der zu realisierenden mikrooptischen Systeme durch eine entsprechende Geometrie, Form- und Oberflächengenauigkeit der einzelnen Elemente. Die Verschiebung der Fokusslage  $\Delta d$  ist bei der Durchstrahlung von Bauteilen dicker als 2 mm zu berücksichtigen (Bild 5-22).

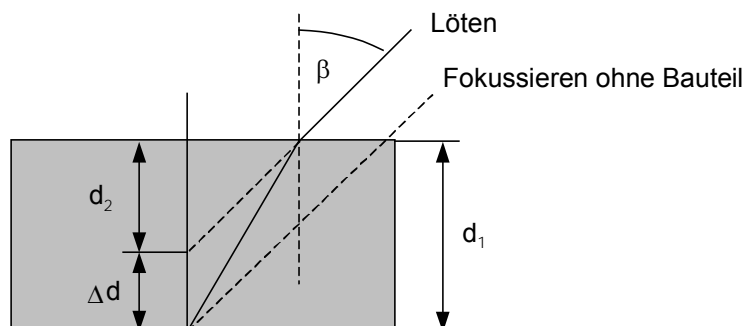


Bild 5-22 Fokusverschiebung beim Durchstrahlen optischer Bauteile

In Abhängigkeit der Brechzahl  $n$  des optischen Materials ist ggf. eine Korrektur nach Gleichung (19) und (20) erforderlich.

$$d_1 = d_2 \frac{\sqrt{1 - (\sin \beta)^2}}{\sqrt{n^2 - (\sin \beta)^2}} \quad (19)$$

$$\Delta d = d_1 - d_2 \quad (20)$$

Die Dicke der applizierten Lotschicht ist aus Gründen der Effektivität des Sputterprozesses sowie aus experimentellen Erfahrungen auf einen Bereich von ca. 2  $\mu\text{m}$  bis 4  $\mu\text{m}$  beschränkt (vgl. Kapitel 5.3). Die Lotapplikation mittels des Sputterprozesses erfordert polierte Fügeflächen, da bei  $R_a$ -Werten der Fügefläche, die größer als die Lotschichtdicken sind, die reale Kontaktfläche zwischen den Fügepartnern stark reduziert und die Verbindungsbildung nachteilig beeinflusst wird. Aus dem gleichen Grund ist während des Lötprozesses eine ausreichende Parallelität der Fügefläche ggf. unter Verwendung spezieller Fügehilfsvorrichtungen erforderlich.

Die zu variierenden Prozessgrößen des Laserstrahlötprozesses ergeben sich folglich aus den Strahl- und Prozessparametern:

- Laserleistung (resp. Temperatur an der Fügestelle) pro Fokusfläche und
- Bestrahlungsdauer.

Insbesondere bei der Verwendung dünner Lotschichten beeinflussen diese Parameter signifikant die Temperaturfeldausbildung und damit die Qualität und Reproduzierbarkeit der Lötverbindung [Nicolics 92].

Untersucht wurden Lötprozesse in denen die Verbindungsbildung über Lötunkte unterschiedlichen Durchmessers und Fokusslage bei unterschiedlicher Bestrahlungsdauer erfolgt, sowie Lötprozesse in denen durch eine Relativbewegung zwischen Laserbearbeitungskopf und zu fügender Baugruppe hauptsächlich ringförmige Konturen bestrahlt werden. In letzteren Prozessen erfolgt die Variation der Bestrahlungsdauer über unterschiedliche Verfahrensgeschwindigkeiten.

Um vergleichbare Prozessfenster zu ermitteln, werden die Parameter Zeit (Bestrahlungsdauer) sowie Leistungsdichte (absorbierte Laserleistung pro bestrahlte Fläche) ausgewertet. Die Pro-

zessfenster werden durch Ausloten der Prozessgrenzen, d. h. dem Übergang zwischen guter und schlechter Lötqualität bestimmt. Die Beurteilung der Lötstellen erfolgt zunächst nach einer optischen Beurteilung der Lötstelle anhand der Kriterien Stabilität, Beeinflussung der Untermetallisierung und Rissbildung im optischen Material sowie nachfolgend durch die unter 5.5 erläuterten Kriterien. Gleichzeitig erfolgt die Optimierung der Prozessparameter unter Berücksichtigung der Ergebnisse der thermomechanischen Simulation.

Die Prozessparameter der Untersuchungen unterscheiden sich applikationsspezifisch, es lassen sich jedoch folgende Grenzen angeben:

- Punktpot Leistungsdichte:  $2,5 \text{ W/mm}^2$  bis  $5 \text{ W/mm}^2$   
Zeit: 0,4 s bis 0,8 s
- Kontur Leistungsdichte:  $2,5 \text{ W/mm}^2$  bis  $5 \text{ W/mm}^2$   
Geschwindigkeit: 1 mm/s bis 10 mm/s.

Die Darstellung eines speziellen Parameterfeldes ist unter 6.2 am Beispiel des Lötprozesses der ungleichartigen Werkstoffpaarung BK7//Zerodur<sup>®</sup> aufgeführt. Für alle vorgestellten Lötprozesse werden die optimierten signifikanten Parameter angegeben.

## 5.5 Charakterisierung von Lötverbindungen

Nach der ersten optischen Beurteilung werden die Lötverbindungen anhand ausgewählter Verbunde durch Methoden der zerstörenden oder zerstörungsfreien Werkstoffprüfung nach Kriterien wie:

- Gefügebau der Lötverbindung/Schliffbilder
- Zug- und Scherfestigkeit der Lötverbindung
- Vakuumdichtheit,
- Transmission
- Spannungen in der Lötverbindung
- Zuverlässigkeit bei thermischer und mechanischer Wechselbeanspruchung

charakterisiert. Die Ergebnisse verdeutlichen gleichzeitig das Potential der entwickelten Verbindungstechnologie.

### 5.5.1 Gefüge

Zur Charakterisierung des Gefügebau von Lötverbindung der Schichtsysteme A, N und C wurden von gelöteten BK7-Proben (Bild 5-28) metallographische Schliffe angefertigt und mittels REM und EDX-Analyse ausgewertet. Bild 5-23 zeigt das System A.

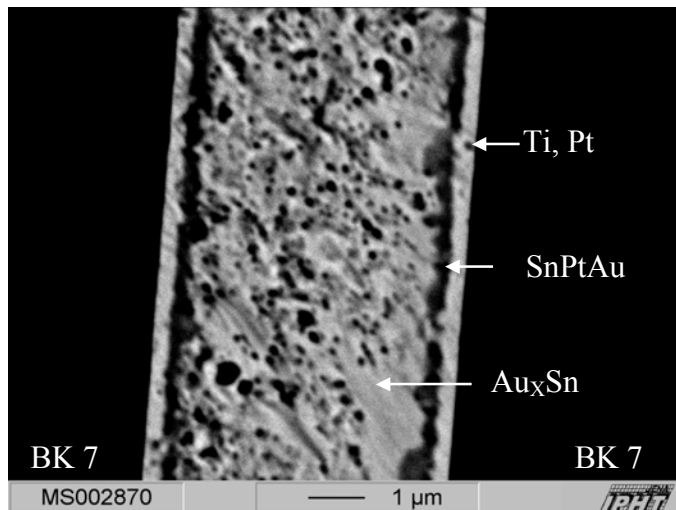


Bild 5-23 Gefügebau einer Lötverbindung Schichtsystem A, FokusØ = 0,65 mm, T = 400 °C;  
t = 0,5 s

Erkennbar ist eine helle Randschicht mit einer Dicke von ca. 300 nm bis 400 nm, die aus Ti und Pt besteht und in der kein Au nachzuweisen ist. Daran an schließt sich eine dunklere, Sn-reiche Phase, die durchgehend ausgebildet ist und aus Sn, Pt und Au besteht, wobei mehr Pt als Au vorhanden ist. In der Mitte findet sich eine vorwiegend helle porige Phase, die aus einer Legierung von ca. 91/9 wt% Au/Sn besteht.

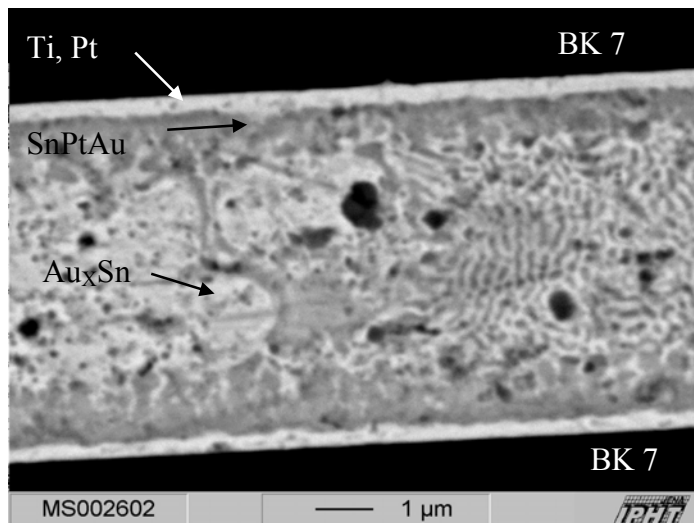


Bild 5-24 Lötverbindung Schichtsystem N, Fokus $\varnothing$  = 0,65 mm, T = 350 °C; t = 0,5 s

Im Gefüge der Lötverbindung des Systems N (Bild 5-24) ist eine gleichmäßige Randschicht von ca. 200 nm Ti und Pt zu erkennen. Es folgt ein dunklerer Bereich mit einer an Au verarmten Sn-reichen Phase und nachweisbarem Pt. Der Pt-Gehalt nimmt in Richtung Schichtmitte ab. In der Mitte der Verbindungszone lässt sich nur AuSn mit teilweise lamellarer Struktur als eutektisches 80Au20Sn sowie in den hellen Bereichen eine Au-reiche Phase und in den dunkleren Bereichen eine Sn-reiche Phase nachweisen.

Im System C (Bild 5-25) sind Ti-Haftsicht und Cr-Diffusionsbarriere nur bei speziellem Kontrast (Bild 5-26) in einer Dicke von ca. 300 nm erkennbar. Daran schließt sich direkt die Lotlegierung mit einer ermittelten Zusammensetzung in der hellen Phase von 88/12 wt% Au/Sn sowie 65/34 wt% Au/Sn in der dunkleren Phase an, was auf eine eutektische Legierungszusammensetzung schließen lässt. Das Gefüge ist gleichmäßig und teilweise lamellar ausgebildet. Im Bereich der Lotlegierung ist kein Cr nachweisbar.

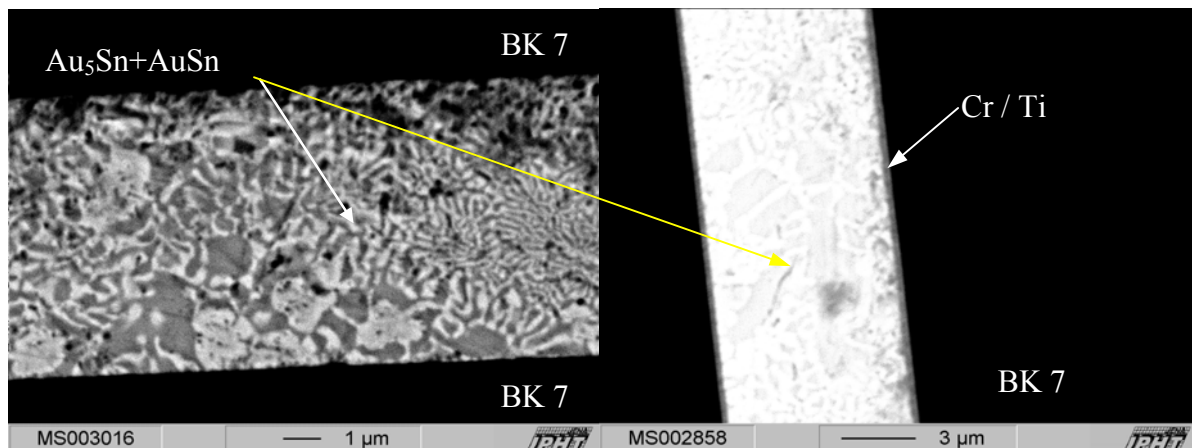


Bild 5-25/26 Lötverbindung Schichtsystem C, FokusØ = 0,65 mm, T = 300 °C; t = 0,5 s bei unterschiedlichem Kontrast

Das Aufbringen einer zusätzlichen Andruckkraft während des Lötprozesses verbessert die Gefügeausbildung signifikant. Eine mögliche Erklärung ist eine extrem dünne Oxidschicht, wie sie beim Löten mit eutektischen Lotpreforms im aufgeschmolzenen Zustand an der Lotoberfläche von [Matijasevic 91] detektiert wurde. Diese beeinträchtigt die Verbindungsbildung oder führt zu Rissen und Einschlüssen. Eine Erhöhung der Qualität der Lötverbindung wird beim beschriebenen Löten mit Lotpreforms durch Applikation von Druck und/oder Variation der Arbeitsatmosphäre erzielt. Ähnliche Vorgänge sind für die hier beschriebenen Lötversuche denkbar. Die relativ gleichmäßige Gefügestruktur der gelöteten Bereiche belegt einen für die Verbindungsbildung günstigen Temperatur - Zeitverlauf in der Fügezone. Deutlich erkennbar sind die in Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung unterschiedlichen Gefügeausbildungen sowie eine Temperaturabhängigkeit der Lötprozesse der einzelnen Lotschichtsysteme. Es lässt sich anhand der Gefügeausbildung eine optimale, pyrometrisch gemessene Löttemperatur festlegen.

Tabelle 5-1 Optimale Löttemperatur der Lotschichtsysteme

System A	System N	System C
400 °C gleichmäßiges Gefüge goldreichere Zusammensetzung	350 °C teilweise eutektisches/lamellares Gefüge Auflösen der Pt- Diffusionsbarriere	300 °C gleichmäßiges, eutektisches/lamellares Gefüge



Die Erhöhung der Löttemperatur bei Verschiebung der Legierungszusammensetzung von der eutektischen zu einer Au-reicheren Zusammensetzung stimmt tendenziell mit den anhand des binären Phasendiagramms zu erwartenden Schmelztemperaturen der einzelnen Legierungen überein. Die in der Fügezone gemessenen Temperaturen liegen mit Ausnahme von System C jedoch niedriger als die zu erwartenden Werte. Als Ursache der Abweichung ist zunächst eine Überhitzung der Fügestelle am Beginn der Wechselwirkung zu berücksichtigen. In Abhängigkeit von der verwendeten Integrationszeit bzw. des Ist-Temperaturfilters des Pyrometers sind Temperaturunterschiede von ca. 200 K zu detektieren. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die gemessene Pyrometertemperatur eine Integration über die Messfläche des Pyrometers darstellt und lokal deutlich höhere Temperaturwerte erreicht werden können. Dadurch ist es möglich, kurzzeitig auch die erhöhten Schmelztemperaturen Au-reicher Legierungen zu erreichen, was das beobachtete Umschmelzen dieser Au-reichen Legierungen zur Folge hat.

Weiterhin besteht die Möglichkeit des chemischen Schmelzens oder Diffusionslötens [TU Berlin 03]. Dabei verschiebt sich durch Diffusionsprozesse die Legierungszusammensetzung in Richtung Flüssigphase und ermöglicht dadurch ein Aufschmelzen. Da aber in den EDX-Messungen in der Verbindungszone insbesondere des Systems A eine sehr Au-reiche Legierung nachgewiesen wurde, ist eine umgekehrte Zusammensetzungsverschiebung während des Erstarrens erforderlich. Derartige isotherme Erstarrungsprozesse sind aus der Literatur [TU Dresden 01] von Bondprozessen mit AuSn-Lot bekannt. Beschrieben wird die Bildung sehr Au-reicher intermetallischer Phasen, wie z.B. der  $\beta$ -Phase im inneren des Fügespalts während das 80Au20Sn Eutektikum nach außen gepresst wird. Da für diese Verbindungsprozesse Lötzeiten von 210 s (im Vergleich zu 0,5 s Bestrahlungsdauer im Laserstrahl-lötprozess) angegeben werden, erscheint diese Erklärung nur bedingt möglich.

Die absolute Temperaturmessung mit Hilfe des verwendeten Einfarbenpyrometers erfordert eine genaue Kalibrierung an annähernd identischen Proben (vgl. 3.2.4). Die zur Kalibrierung verwendete Methode des Erwärmens der Lötproben auf einer Heizplatte mit einer durch ein PT-100 Messfühler gemessenen Proben temperatur führt zu einer maximalen Toleranz der Temperaturmesswerte von  $\pm 20$  K und ist bei der Beurteilung der angegebenen Löttemperaturen zu berücksichtigen.

Eine nominelle Veränderung der abgegebenen mittleren Laserleistung für die Versuche mit optimierter Löttemperatur der unterschiedlichen Lotschichtsysteme über den gesamten Be-

strahlungszeitraum ist mit der Protokollsoftware nicht auflösbar. Die mittleren Leistungsdichten der jeweiligen Lötprozesse aller Lotschichtsysteme werden deshalb als nahezu gleich angesehen.

### 5.5.2 Festigkeit

Zur Charakterisierung der Festigkeit wurden Scherversuche nach 4.3 an Lötverbindungen planarer BK7-Glasproben durch drei oder sechs Lötunkte (Bilder 5-27 und 5-28) sowie durch ringförmige Kontur mit den Lotsystemen A, N und C durchgeführt.

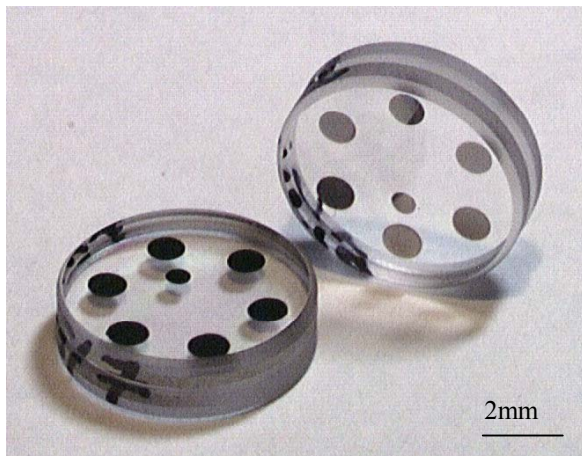


Bild 5-27 Gelötete BK7-Glasproben - Lötunkte

$P_{\text{mittel}} \sim 4,8 \text{ W pro Punkt}$

$t = 500 \text{ ms}$

Fokus  $\varnothing 0,65 \text{ mm}$



Bild 5-28 Gelötete BK7-Glasproben - Kontur

$P_{\text{mittel}} \sim 3,7 \text{ W}$

$v = 1 \text{ mm/s}$

Fokus  $\varnothing 0,65 \text{ mm}$

Die Ergebnisse sind im Diagramm 5-3 dargestellt. In allen Fällen wurden mechanisch stabile Lötverbindungen der metallisierten Glasteile realisiert. Die ermittelten Scherfestigkeiten erreichen in Abhängigkeit der Lotlegierung Werte von bis zu 150 MPa ( $s = 40 \text{ MPa}$ ). Damit werden mit der entwickelten Technologie Festigkeitswerte im Bereich von Hartlötverbindungen erreicht. Gleichzeitig zeigen die Schwankungen der Festigkeitswerte den unter 5.5.1. erläuterten Einfluss des Gefüges der Lotlegierungen. Die mittleren Festigkeitswerte der einzelnen Systeme unterscheiden sich signifikant. System A weist auf Grund des höchsten Au-Gehaltes auch die höchsten mittleren Festigkeitswerte auf, während am System C auf Grund des im Vergleich höheren Anteils der spröderen AuSn-Phase die geringsten Festigkeitswerte gemessen

sen wurden. Mit Werten von ca. 45 MPa liegen diese Festigkeitswerte aber noch deutlich über denen vergleichbarer Klebeverbindungen von ca. 10 MPa bis 35 MPa. In den Systemen A und C treten weiterhin, begründet durch unterschiedliche Zusammensetzung und Verteilung der Legierungsbestandteile, vergleichsweise hohe Streuungen der Festigkeitswerte auf. Das favorisiert zusammen mit bereits erläuterten Einflüssen (vgl. 5.5.1) das System C zur reproduzierbaren Herstellung stabiler Verbindungen, welches die Grundlage für den Aufbau optischer Systeme bildet.

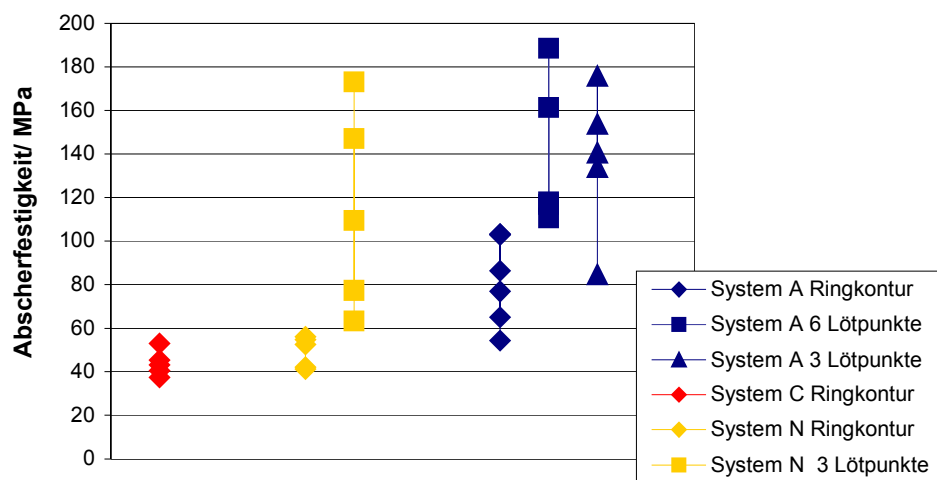


Diagramm 5-3 Abscherfestigkeiten gelöteter BK7-Proben in Abhängigkeit des Lotschichtsystems

### 5.5.3 Vakuumdichtheit

Zur Prüfung der Vakuumdichtheit wurden Lötverbindungen aus einer flächig metallisierten SQ1-Scheibe und einer strukturiert metallisierten SQ1-Platte (Bild 5-29) mit einem Helium Lecktester UL 200 der Fa. Leibold untersucht. Es konnte eine hohe Vakuumdichtheit nachgewiesen werden. Die gemessene Leckrate der durch vier ringförmige Konturen gelöteten SQ1-Proben liegt im Bereich von  $10^{-7}$  mbar l/s bis  $10^{-9}$  mbar l/s.

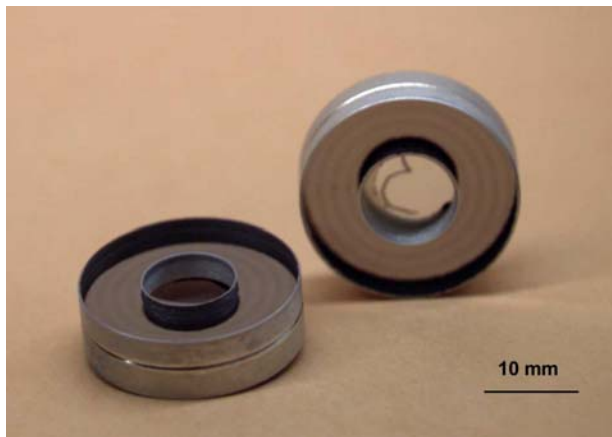


Bild 5-29 Gelötete SQ1-Baugruppen zum Nachweis vakuumdichter Lötverbindungen

$P_{\text{mittel}} \sim 18 \text{ W}$ ,  $v = 10 \text{ mm/s}$ , Fokus  $\varnothing 0,65 \text{ mm}$ , System A

### 5.5.4 Ebenheitsuntersuchungen

Interferometrisch gemessen wurde an der Baugruppe (Bild 5-29) die Abweichung von der Ebenheit des nicht metallisierten Bereiches der SQ1-Platte im Ausgangszustand, nach dem Beschichtungsprozess und nach dem Lötprozess. In Bild 5-30 sind die Messergebnisse vor der Beschichtung und nach dem Lötprozess dargestellt.

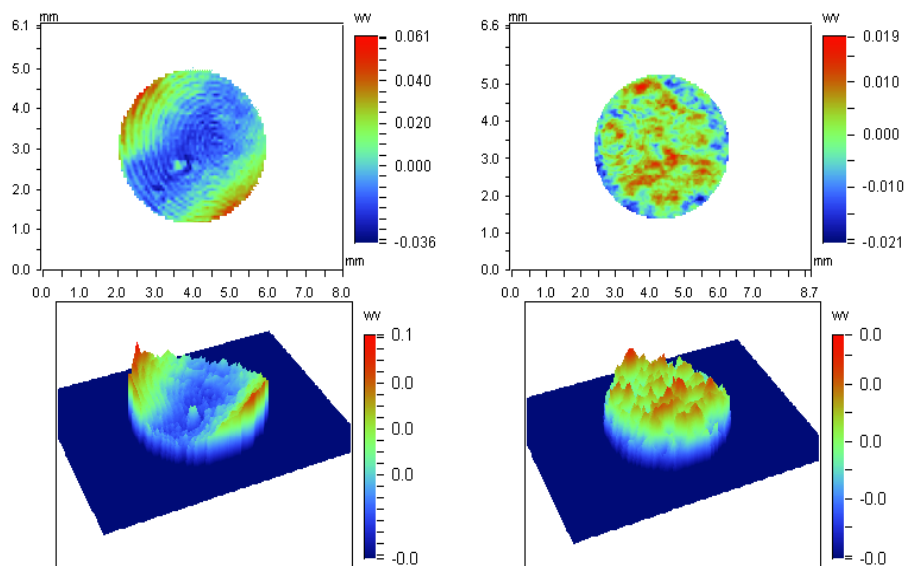


Bild 5-30 Interferogramm des transparenten Bereiches der Quarzglasplatte vor der Metallisierung (links) und nach dem Beschichtungsprozess/ rechts)

Sowohl der Beschichtungsprozess als auch der Lötprozess tragen über die Schichtspannung bzw. über den durch den Lötprozess lokal erzeugten Spannungseintrag zur Abweichung von

der Ebenheit bei. Diese errechnet sich als Produkt von Messwellenlänge  $\lambda$ , (632 nm) dem Peak to Valley Wert  $P_v/wv$  und dem Faktor 0,5. Mit einem Wert von  $< \lambda/20$  der Änderung der Ebenheit der gelöteten Platte wird eine sehr geringe Beeinflussung der Komponente durch die Verbindungstechnologie nachgewiesen.

### 5.5.5 Transmission

Eine weitere Eigenschaft der Lotschicht der Lötverbindung besteht darin, dass sie über einen breiten Wellenlängenbereich die Strahlung fast vollständig absorbiert (Diagramm 5-4).

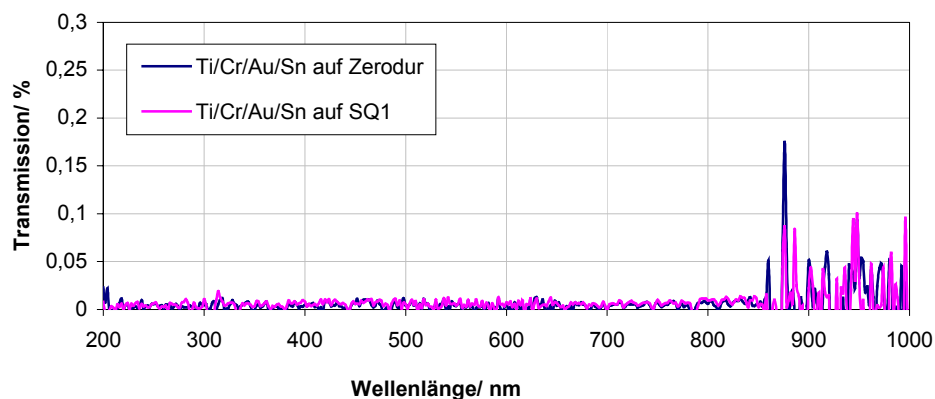


Diagramm 5-4 Transmission des Systems Ti/Cr/Au/Sn auf Zerodur® und SQ1 bei Bestrahlung durch das Substrat

Somit ist es möglich, die Lötverbindung bzw. die metallisierte Fügefläche als optische Maske zu nutzen. Bild 5-31 zeigt ein einfaches Beispiel in Form eines aus zwei SQ1-Teilen bestehenden Abformwerkzeugs. Über die in der schematischen Darstellung markierten planaren Bereiche wird die Lötverbindung hergestellt. Gleichzeitig dienen die Fügeflächen im Endzustand der Baugruppe, nach einer abschließenden feinoptischen Bearbeitung, als Blende für die zum Aushärten des Kontaktlinsenmaterials verwendete UV-Strahlung. Die Lötverbindung ist durch mehrere Kreiskonturen ausgeführt.



Bild 5-31 Abformwerkzeug Modell und gelötete Baugruppe

$P_{\text{mittel}} \sim 18 \text{ W}$ ,  $v = 1 \text{ mm/s}$ ,

Fokus  $\varnothing 0,65 \text{ mm}$ , System C

[Quelle JO L.O.S.]

### 5.5.6 Stabilität bei thermischer und mechanischer Wechselbelastung

Zur Charakterisierung der Langzeitstabilität wurden an einer gelöteten Zerodur<sup>®</sup>-Spiegelbaugruppe (Bild 5-32) umfangreiche klimatische und mechanisch-dynamische Prüfungen durchgeführt.

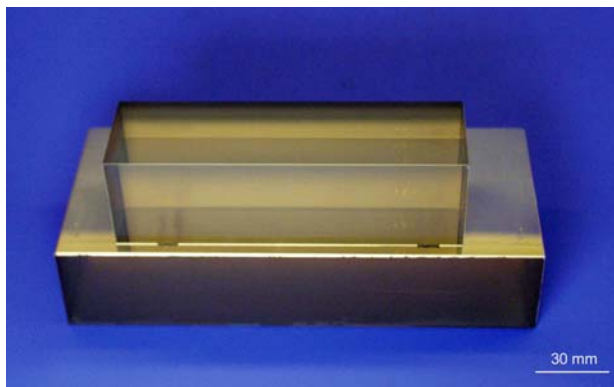


Bild 5-32 Gelötete Spiegelbaugruppe,  $P_{\text{mittel}} \sim 10 \text{ W}$ , Fokus  $\varnothing 0,65 \text{ mm}$ ,

Verfahrgeschwindigkeit  $1 \text{ mm/s}$ , Linienkonturen; [Quelle JO L.O.S., TU Ilmenau]

Im einzelnen wurden die Form- und Lagetoleranzen nach

- dem Lötprozess (Messung 1)
- einer Woche Lagerung bei Raumtemperatur (Messung 2)
- trockener Wärme,  $70 \text{ °C}$  (Messung 3)
- Kälte,  $-25 \text{ °C}$  (Messung 4)

- feuchte Wärme, 40 °C, 95 % relative Luftfeuchte (Messung 5)
- mechanische Prüfung, Schwingungen - sinusförmige Anregung mit gleitender Frequenz, Rauschen - 10 Hz bis 200 Hz, 200 Hz bis 2000 Hz, Schocken - halbsinusförmige Anregung (Messung 6)

gemessen. Im Ergebnis wurden Abweichungen der Lagetoleranzen des Spiegels im Bereich  $< 1''$ , nahe der Auflösungsgrenze des Messverfahrens detektiert (Diagramme 5-5 und 5-6). Eine Beeinflussung durch innere Spannungen konnte nicht nachgewiesen werden. Um gesicherte Aussagen zur Langzeitstabilität zu erhalten, müssen die Charakterisierungen in turnusmäßigen Abständen wiederholt werden.

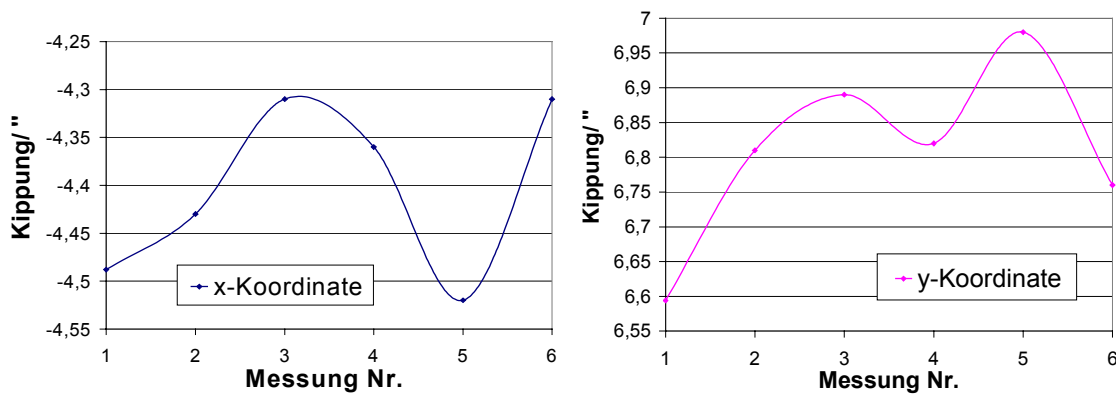


Diagramm 5-5/5-6 Lagetoleranzen der gelöteten Spiegelbaugruppe nach mechanisch-dynamischen Prüfungen

## 6 Applikationen

### 6.1 Spiegelsystem

Zur Herstellung von hochauflösenden Strukturen auf Masken und Wafern mit Lithographie-Anlagen werden immer genauere spiegelbasierende Tischsysteme mit exaktem Metrologieanschluss und thermischer Stabilität gefordert. Unter Einsatz der Glaskeramik Zerodur<sup>®</sup> und Anwendung einer Klebtechnologie werden Spiegelsysteme mit hohen Leistungsparametern aufgebaut. Um den Einsatzbereich dieser Baugruppen unter Berücksichtigung der Anforderungen im EUV-Bereich [ITRS 03] zu erweitern, wurde die entwickelte Verbindungstechnologie auf eine miniaturisierte Zerodur<sup>®</sup>-Spiegelbaugruppe übertragen (Bild 6-1) und die Eigenschaften der Baugruppe charakterisiert.

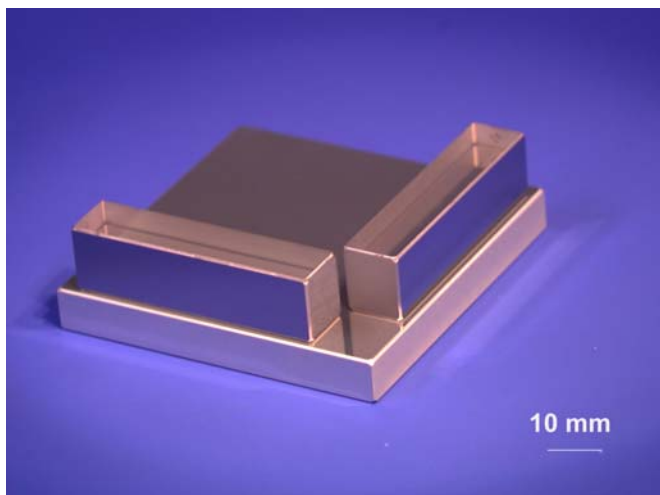


Bild 6-1 Miniaturisierte Spiegelbaugruppe

Die Simulation eines vereinfachten Lötprozesses der Materialpaarung Zerodur<sup>®</sup>/Zerodur<sup>®</sup>-ist unter 5.2 erläutert. Die Ergebnisse werden in erster Näherung auch für den Lötprozess dieser Applikation als gültig angenommen.

Spiegel- und Substratoberflächen der einzelnen Bauteile wurden vor und nach dem Metallisierungsprozess (Applikation des Lotschichtsystem C und der Ti-Spiegelschicht) sowie nach dem Lötprozess interferometrisch vermessen.

Orthogonaler Winkelfehler (Winkel in der Ebene der Basisplattenoberfläche) und pyramidaler Winkelfehler (Winkel zwischen der Spiegelfläche und der Basisplattenoberfläche) wurden mit dem AKF nach dem in Bild 6-2 dargestellten Versuchsaufbau ermittelt. Um reproduzierbare



Bedingungen zu gewährleisten, wurden die Untersuchungen auf einem schwingungsgedämpften Tisch unter Reinraumbedingungen durchgeführt.

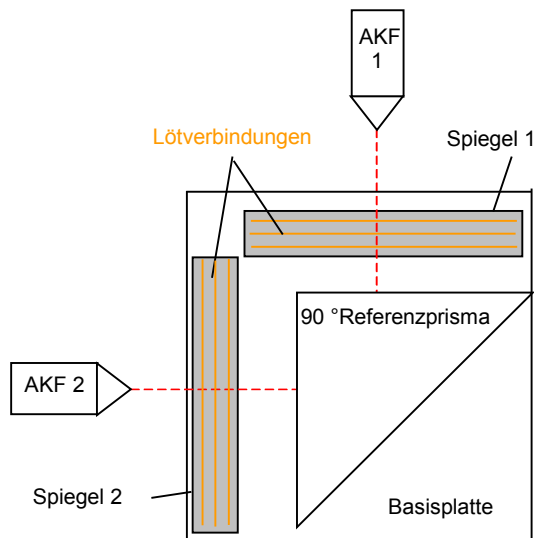


Bild 6-2 Versuchsaufbau zur Montage der Spiegelbaugruppen

Die im folgenden mit Baugruppe 1 und 2 bezeichneten Systeme unterscheiden sich hinsichtlich der Aufbaustrategie.

### Baugruppe 1:

Auf einer flächig aufgestellten Basisplatte werden die zwei Spiegel orthogonal zueinander ausgerichtet und mit Klebstoff fixiert. Die Messung der Lage der Spiegel erfolgt mit Hilfe von zwei AKF's und einem Referenzprisma als 90 ° Maßverkörperung. Der Lötprozess erfolgt im Anschluss. Zur stabilen Fixierung sind die Lötverbindungen durch jeweils drei parallele Linien ( $P_{\text{mittel}} \sim 10 \text{ W}$ , Fokus  $\varnothing 0,65 \text{ mm}$ ,  $v = 1 \text{ mm/s}$ ) ausgeführt (Bild 6-2).

### Baugruppe 2:

Auf einer flächig aufgestellten Basisplatte werden die Spiegel mit einem AKF ausgerichtet. Dabei erfolgt die Ausrichtung des ersten Spiegels parallel zur Basisplatte. Dieser wird anschließend zunächst durch einen zentrischen Lötspunkt ( $P_{\text{mittel}} = 9,5 \text{ W}$ , Fokus  $\varnothing 0,65 \text{ mm}$ ,  $t = 500 \text{ ms}$ ) fixiert und nachfolgend durch drei parallele Linien ( $P_{\text{mittel}} = 7,5 \text{ W}$ , Fokus  $\varnothing 0,65 \text{ mm}$ ,  $v = 1 \text{ mm/s}$ ) gelötet. Das 90 ° Referenzprisma wird im folgenden zur ortho-

gonalen Ausrichtung des zweiten Spiegels verwendet und der Lötprozess in analoger Weise auf den zweiten Spiegel angewendet. Die Montage erfolgt klebstofffrei.

Die Charakterisierung der Lagetoleranzen, als durch den Lötprozess hervorgerufene Abweichungen vom Justagezustand, ist in Tabelle 6-1 aufgeführt. Der pyramidale Winkelfehler der einzelnen Spiegel lässt sich durch das Referenzprisma erfassen, ist aber nicht beeinflussbar da er aus der Oberflächenqualität der Fügeflächen sowie den Herstellungstoleranzen des jeweiligen Spiegels resultiert. Der Messaufbau wurde während des Lötprozesses nicht verändert. Systematische Messfehler werden nicht berücksichtigt, da nur die Änderung der Messwerte ausgewertet wurde.

Tabelle 6-1 Lagetoleranzen der gelöteten Baugruppen

	Baugruppe 1	Baugruppe 2
Spiegel 1 orthogonal pyramidal	0,5" 5"	1" 5"
Spiegel 2 orthogonal pyramidal	1" 1"	5'
Spiegel 1 zu Spiegel 2 orthogonal	0,5"	7"

Die Ergebnisse der Charakterisierung der Lagetoleranzen belegen das Potential der Technologie hochpräzise Verbindungen zu realisieren. Die Aufbaustrategie von Baugruppe 1, einer zusätzlichen Fixierung vor dem eigentlichen Lötprozess, bringt keinen Vorteil durch Verringerung der Lagetoleranzen. Zudem müsste zum Aufbau einer Spiegelbaugruppe für EUV-Anforderungen die Fixierung durch Klebstoff durch eine äquivalente klebstofffreie Verfahren ersetzt werden, was angesichts der angewandten manuellen Justage problematisch erscheint. Die sehr hohen Lagetoleranzen (5') von Spiegel 2 der Baugruppe 2 erklären sich aus der interferometrischen Charakterisierung von Basisplatte 2. Wie bereits unter 5.5.4 beschrieben, resultiert aus dem Metallisierungsprozess eine zu berücksichtigende Verspannung der Fläche und folglich eine Formabweichung der Ebene. Im Fall der Basisplatte 2 führte das zu einer asphärischen Oberflächenform (Bild 6-3). Da die Fügefläche von Spiegel 2 in einem solchen Bereich starker Formschwankungen liegt, führt der Lötprozess verbunden mit den

außerordentlich hohen Festigkeitseigenschaften der AuSn-Lotlegierung zu den ermittelten Lagetoleranzen.

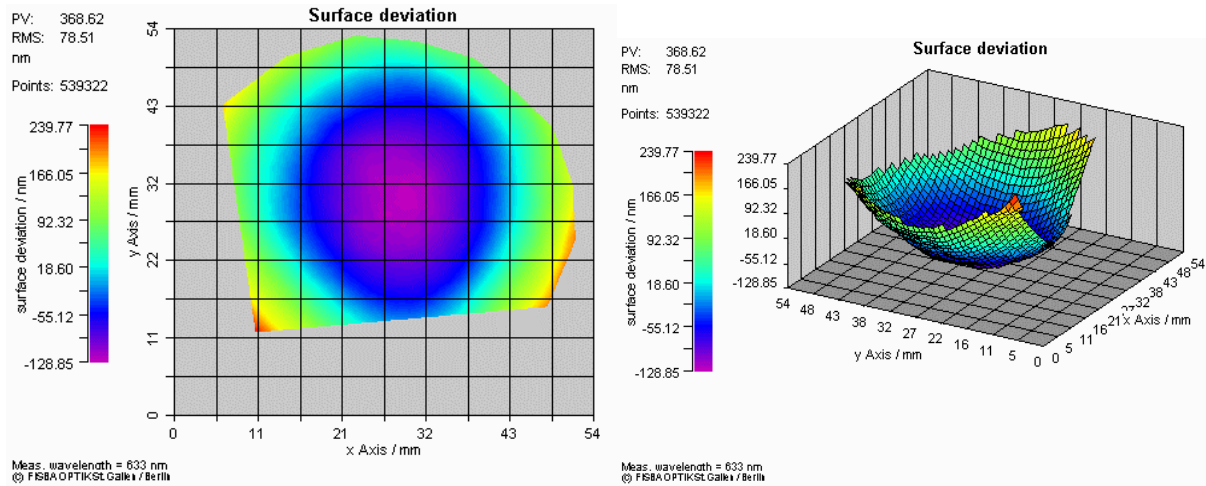


Bild 6-3 Ebenheit der Basisplatte 2 beschichtet

Die Ebenheit der einzelnen Spiegelflächen sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Die durch die Verbindungstechnologie verursachten Veränderungen zwischen Ausgangszustand und gelötetem Zustand liegen, mit Ausnahme des diskutierten Spiegel 2 Baugruppe 2, im Bereich von  $\leq \lambda/20$  bezogen auf 633 nm Messwellenlänge und bestätigen die getroffene Aussage einer geringen mechanischen Beeinflussung der optischen Komponenten. In Bild 6-4 sind exemplarisch die Messergebnisse von Spiegel 1 Baugruppe 2 dargestellt.

Tabelle 6-2 Formabweichungen der Ebene der Primärflächen der Spiegel

	Ausgangszustand	nach dem Beschichtungsprozess	nach dem Lötprozess
Baugruppe 1 Spiegel 1	99 nm	157 nm	132 nm
Baugruppe 1 Spiegel 2	146 nm	185 nm	115 nm
Baugruppe 2 Spiegel 1	151 nm	217 nm	122 nm
Baugruppe 2 Spiegel 2	60 nm	133 nm	105 nm

Gleichzeitig wird anhand der Werte in Tabelle 6-2 der Einfluss des Metallisierungsprozesses deutlich, in diesem Fall bezüglich der Spiegelfläche. Die Möglichkeit, die Ebenheit durch eine

lokal begrenzte Lotschichtapplikation gezielt zu beeinflussen, muss in diesem Zusammenhang zukünftig detaillierter untersucht werden.

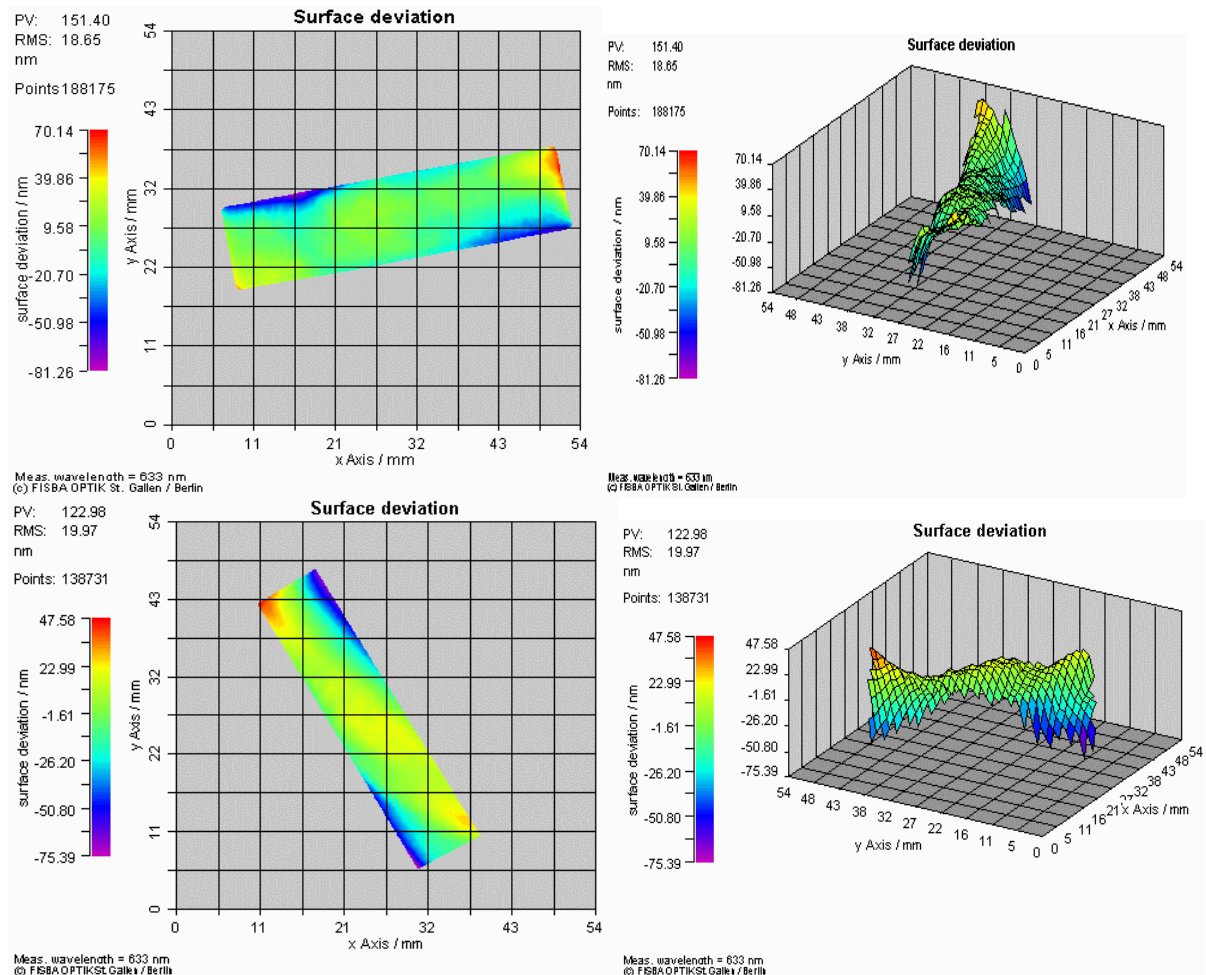


Bild 6-4 Ebenheit der Spiegelfläche Spiegel 1 Baugruppe 2 Ausgangszustand (oben), gelötet (unten)

## 6.2 Ablenkbaustein

Mikrooptische Systeme finden Anwendung in unterschiedlichsten Bereichen, wie Messtechnik, Telekommunikation oder Biochemie. Die sich daraus ergebende Breite der Funktionalität lässt sich durch eine Modularisierung der Komponenten und Systeme kostengünstig herstellen. Ein potenzieller Ansatz zur Modularisierung mikrooptischer Systeme findet sich im Baukastensystem für die MST (MATCH-X) [Stock 01].

Bild 6-5 zeigt den Demonstrator für einen optischen Ablenkbaustein basierend auf den Geometriempfehlungen der MATCH-X-Einheitsblätter. Um die Kombinierbarkeit/Stapelbarkeit

einzelner Bausteine zu verbessern, wurde als Trägermaterial ein Werkstoff mit geringem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Zerodur<sup>®</sup>) gewählt. Die optische Funktion der Strahlteilung und -umlenkung wird durch zwei Strahlteilerwürfel bestehend aus BK7-Glas realisiert.

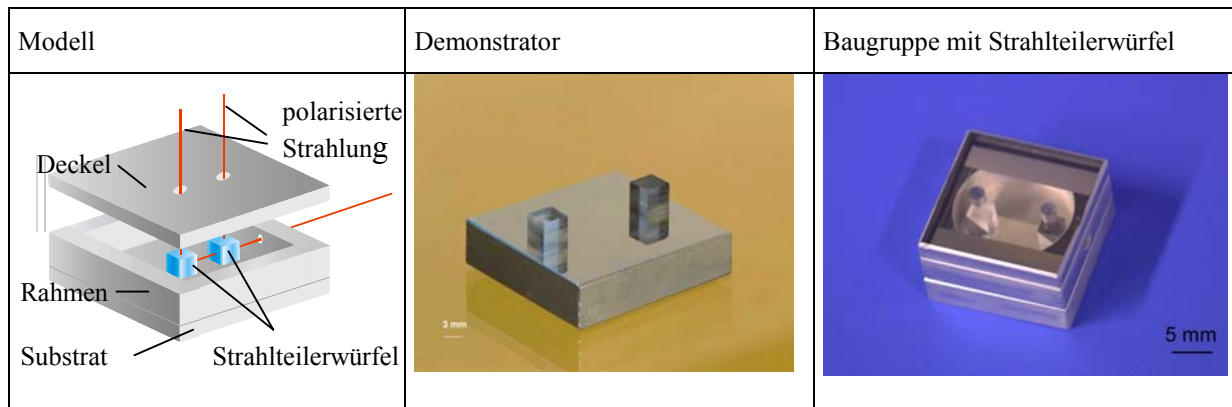


Bild 6-5 Optischer Ablenkbaustein

Neben der mechanischen Stabilität sind für den optischen Ablenkbaustein die Fügetoleranzen der einzelnen Lötverbindungen von signifikanter Bedeutung. Um die Funktionsfähigkeit des Modules zu gewährleisten, sind Lagetoleranzen der austretenden polarisierten Strahlen zueinander in Form einer Abstandstoleranz  $< 0,01$  mm und einer Parallelitätstoleranz  $< 1'$  zu realisieren.

Um das Beanspruchungsverhalten des laserstrahlgelöteten Strahlteilerwürfels abzuschätzen, wurden thermomechanische FEM-Analysen durchgeführt. Die Bilder 6-6 bis 6-11 zeigen die ausgehend von einer berechneten Temperaturverteilung ermittelten Ergebnisse der thermomechanischen Verformungs- und Spannungsanalyse ausgewählter Lötprozesse.

In den Bildern 6-6 und 6-7 sind die maximalen Hauptspannungen nach dem Abkühlen der Baugruppe dargestellt. Mit einer Höhe von  $> 100$  MPa sind Risse im Glas wahrscheinlich, da das AuSn-Lot keine deutliche Spannungsrelaxation im erstarrten Zustand zulässt. Im Substrat sind die Zugbeanspruchungen auf  $< 30$  MPa begrenzt, so dass keine Schädigung zu erwarten ist. Die Druckspannungen von ca. 50 MPa im Substrat sind für eine Schädigung nicht relevant (Bild 6-8). In Bild 6-9 ist die von-Mises-Vergleichsspannung im Lot dargestellt. Das Lot wird bis an die Fließgrenze beansprucht und baut höhere Spannungen durch geringfügige plastische Deformation ab.

Bei einer ringförmigen Fokusgeometrie (vgl. 4.2) werden ähnliche Spannungswerte erreicht. Die Spannungsverteilung wird wesentlich von der Geometrie des Strahlteilerwürfels beeinflusst. Während das Lot noch eine über dem Umfang gleichmäßige Beanspruchung aufweist (Bild 6-11), werden die Zugspannungen im Würfel im Bereich der Klebefuge zwischen den Prismen deutlich bis auf 120 MPa überhöht (Bild 6-10). Damit wird die Gefahr der mechanischen Schädigung des Prismas in diesem Bereich deutlich. Gleichzeitig wird aber die Möglichkeit aufgezeigt, die entstehende Spannungsverteilung über spezielle Strahlformungsoptiken zu beeinflussen.

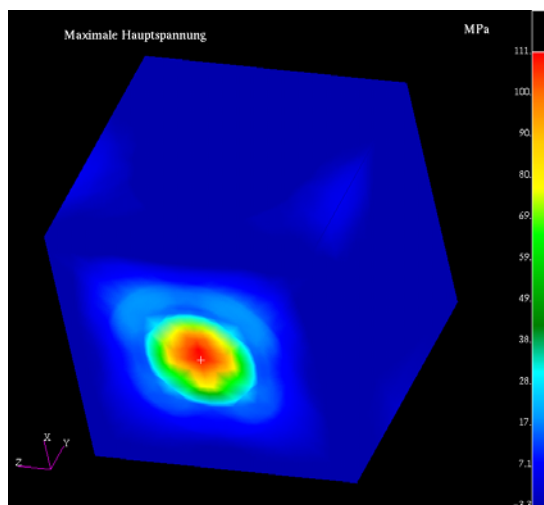


Bild 6-6 Maximale Hauptspannung im BK7 Glaswürfel, punktförmiger Spot

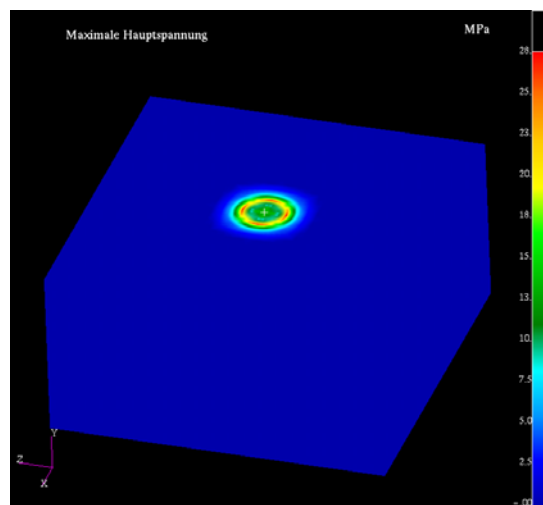


Bild 6-7 Maximale Hauptspannung im Zerodur®-Substrat, punktförmiger Spot

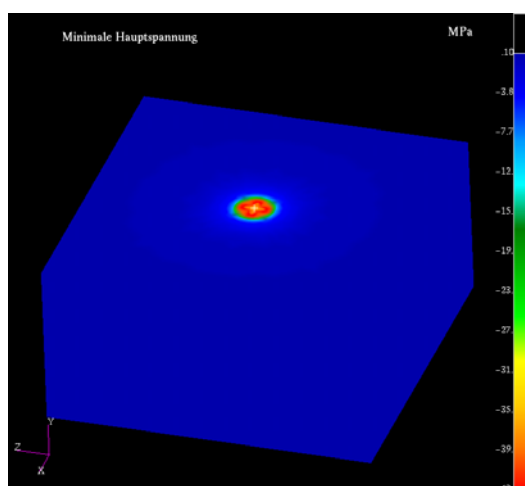


Bild 6-8 Minimale Hauptspannung im Zerodur®-Substrat, punktförmiger Spot

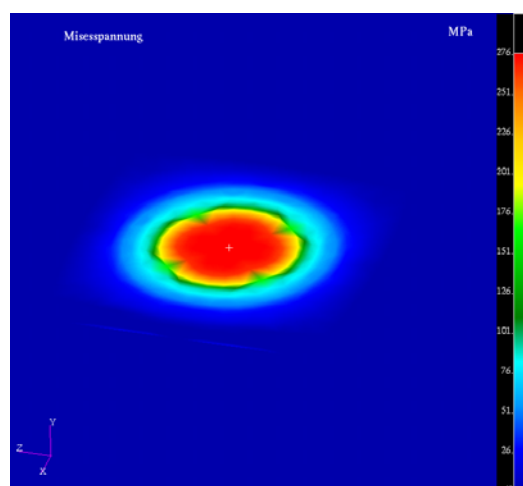


Bild 6-9 Von-Mises-Vergleichsspannung im Lot punktförmiger Spot

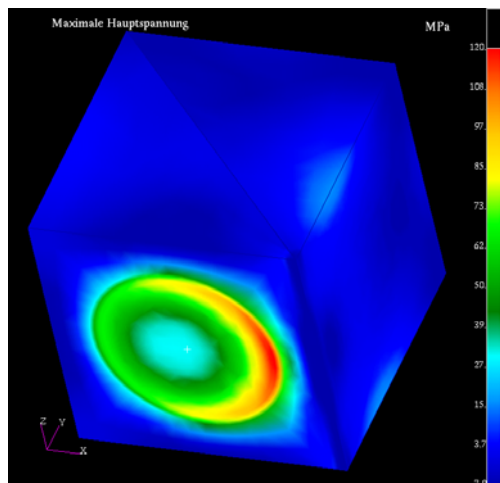


Bild 6-10 Maximale Zugspannung im Würfel, ringförmiger Spot

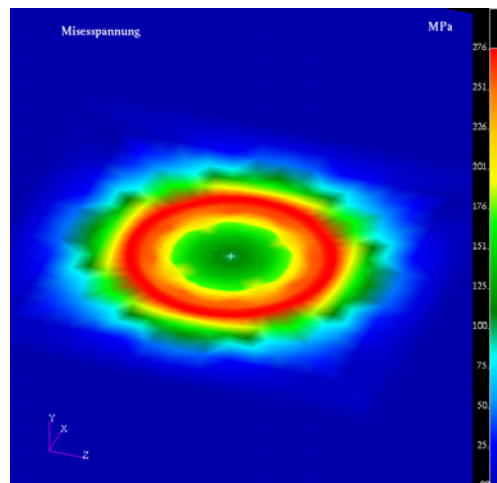


Bild 6-11 Von-Mises-Vergleichsspannung im Lot, ringförmiger Spot

Quelle Bilder (6) [Amic 04]

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die simultan erwärmte Lötfläche für diese hybride Applikation sehr klein gewählt werden muss, um die lokale Spannungsbelastung der Glaswürfel zu minimieren.

Um die Laserstrahlötanlage für den Aufbau des Demonstrators zu nutzen, sind im Hinblick auf die hohen Toleranzforderungen an die Fügeverbindungen sowie die Handhabung der Strahlteilerwürfel zusätzliche Justageaufbauten entwickelt wurden. Eingesetzt wurde hauptsächlich die in Bild 6-12 dargestellte mechanische Fügehilfsvorrichtung. Über eine Referenzierung der Strahlteilerwürfel am Zerodur<sup>®</sup>-Substrat wird eine parallele Ausrichtung der Fügeflächen zueinander sowie eine grobe Abstandspositionierung der Würfel erreicht.

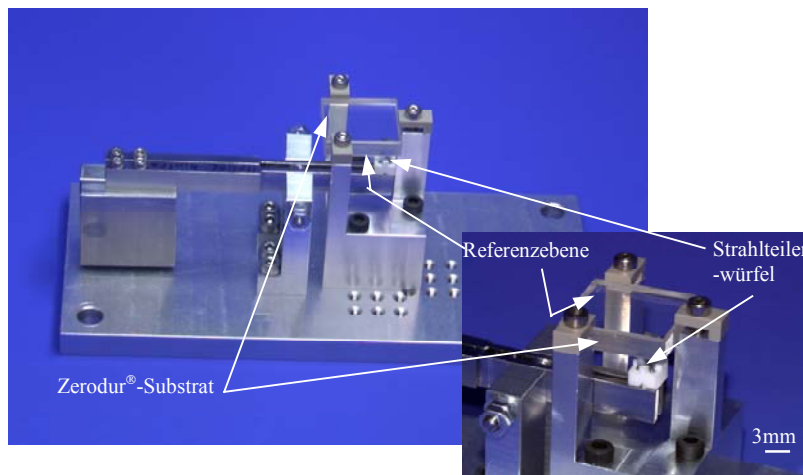


Bild 6-12 Mechanische Fügehilfsvorrichtung zur Referenzierung der Fügeflächen

Im Verlauf der Untersuchungen wurden basierend auf diesem Versuchsaufbau die Parameterfelder der Strahl- und Prozessparameter des Lötprozesses für unterschiedliche Lotschichtsysteme ermittelt (Diagramm 6-1).

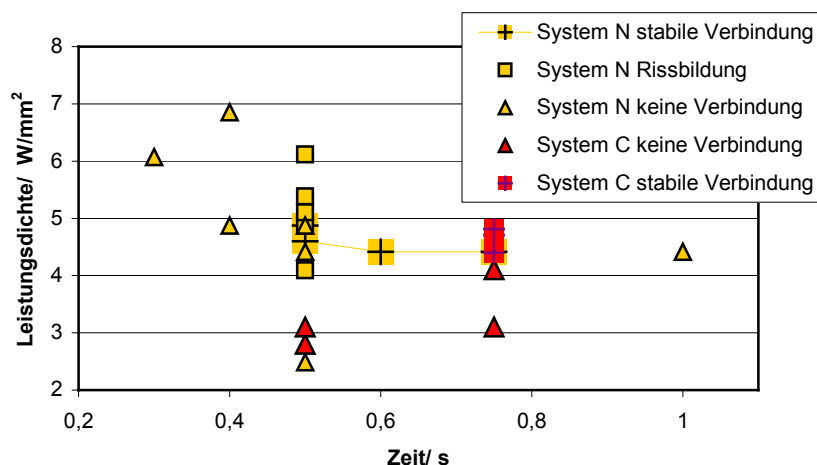


Diagramm 6-1 Prozessfenster Leistungsdichte vs. Bestrahlungsdauer unterschiedlicher Lotschichtsysteme

Bei Anwendungen des Lotschichtsystems C liegen die optimalen Prozessparameter bei einer mittleren Leistungsdichte von  $4,5 \text{ W/mm}^2$  und einer Bestrahlungsdauer von 750 ms.

Mit diesen Lötprozessparametern wurden trotz der großen Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Materialien mechanisch stabile Fügeverbindungen erzielt (Bild 6-5 Mitte).

Wie aus dem Diagramm zu entnehmen ist, sind die Versuchsergebnisse insbesondere im System N nur bedingt reproduzierbar und es kommt teilweise zur Entstehung von Rissen haupt-



sächlich im Glaswürfel. Unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses der verwendeten Glaswürfeldummys (eventuell Entstehung von Mikrorissen durch das Trennverfahren) sowie der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften (zurückzuführen auf den Gefügebau) der Lotlegierungen N und C sind die beschriebenen Spannungsbelastungen als eine Ursache der beobachteten Rissbildungen in den Glaswürfel (bzw. keine Verbindung) zu betrachten. Bei im Vergleich zu System C identischen Prozessparametern werden im System N nur einzelne stabile Lötverbindungen erzielt. Eine Streuung der Prozessparameter stabiler Verbindungen ist im Lotschichtsystem C nicht zu beobachten.

Die ermittelten Abscherfestigkeiten der Lötverbindungen des Lotschichtsystems C (Mittelwert 15,2 MPa,  $s = 7,8$  MPa) liegen weit unter den Festigkeitswerten der mit Lotschichtsystem C gelöteten BK7-Proben (vgl. Diagramm 5-3).

Zur Charakterisierung entstehender Füge toleranzen der Lötverbindungen wurde während des Lötprozesses die Kippung der Flächennormale der Würfelseitenfläche detektiert. Dazu ermittelte eine digitale Bildverarbeitungssoftware die Verschiebung des Strahlschwerpunktes eines an einer Würfelseitenfläche reflektierten Justierlaserstrahls (Diagramm 6-2). Unter der Voraussetzung, dass nur eine Kippung des Strahlteilerwürfels auftritt, bedeutet das eine ebenso große Kippung der austretenden polarisierten Strahles. Im dargestellten Versuch wurden  $0,6'$  Kippung in der x-Koordinate und  $0,1'$  in der y-Koordinate (Koordinaten bezogen auf die Würfelseitenfläche) gemessen. Insgesamt wurden in x-Koordinate  $2,25'$ ,  $s = 3,46'$  und in der y-Koordinate  $2,3'$   $s = 3,7'$  erreicht.

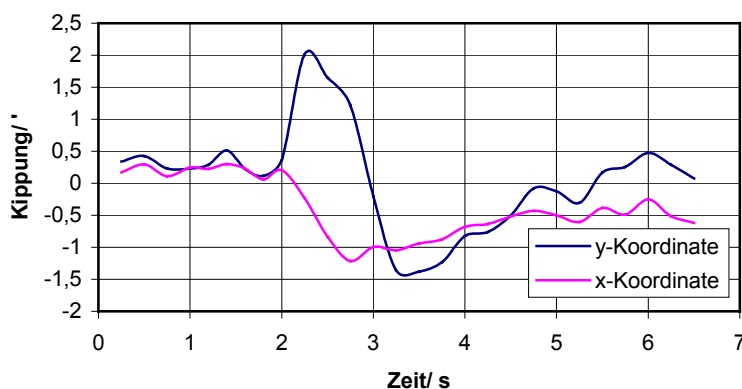


Diagramm 6-2 Kippung des Strahlteilerwürfels im Lötprozess

Real ist die detektierte Kippung eine Kombination von Drehung und Verschiebung der Würfelseitenfläche und lässt nicht direkt auf die Veränderung der Lagekoordinaten des Würfels schließen. Die Lage der austretenden polarisierten Strahlung wird somit zusätzlich beeinflusst, insbesondere bezüglich der Abstandstoleranz, was bei einer Laserstrahltechnologie in der ausgeführten Form die Justage des Strahlteilerwürfels im geschlossenen Regelkreis erfordert.

Für den gesamten Ablenkbaustein treten die beschriebenen Fügetoleranzen an beiden Strahlteilerwürfeln auf. Bei der Justage ist eine Kompensation von Fügetoleranzen des ersten Würfels beim Löten des zweiten Würfels möglich, allerdings unter Berücksichtigung einer ausreichenden Parallelität der Fügeflächen von Würfel zwei und Substrat.

### **6.3 Klebstofffreie Montage**

Der Schwerpunkt der vorgestellten Arbeit lag in der Untersuchung von Lötverbindungen basierend auf einem gesputterten Lotschichtsystem. Die durch das Sputterverfahren erreichbaren Lotschichtdicken von max. 4  $\mu\text{m}$  stellen ein begrenzendes Kriterium der Verbindungstechnologie dar. Insbesondere Bauteile mit relativ großen Oberflächenrauheiten oder Fügeflächen mit einer hohen Formabweichung der Ebene lassen sich nur bedingt löten. Eine Alternative bietet das Laserstrahllöten in Verbindung mit den Ti/Cr/Au- bzw. Ti/Pt/Au-Untermetallisierungssystemen und zusätzlich zugeführten Lotpreforms (vgl. Kap. 5.3). Preforms aus der 80Au20Sn-Legierung sind in Dicken ab 20  $\mu\text{m}$  verfügbar. Eine auf Grund der höheren Lotdicke deutlich erhöhte Spannungsbelastung im Bereich der Fugestelle ist zu berücksichtigen und ggf. durch einen alternativen Lotwerkstoff zu kompensieren.

Bild 6-13 zeigt eine Linse mit laserstrahlgelöteten metallischen Halteelementen. Die Applikation ermöglicht eine stabile Befestigung der Linse verbunden mit der Möglichkeit einer einfachen Justage. Verwendet wurden Ag4Sn-Preforms der Dicke 100  $\mu\text{m}$ .

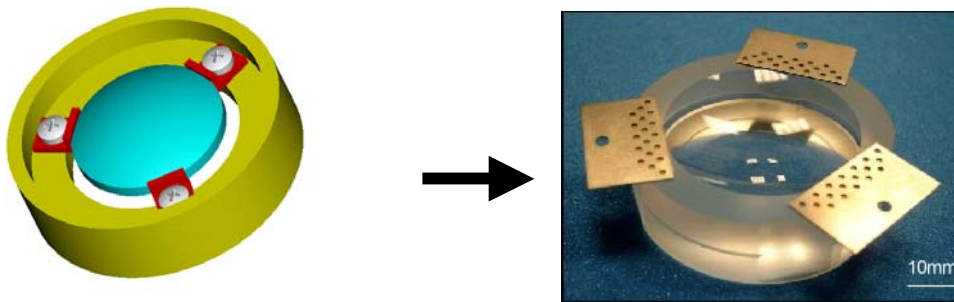


Bild 6-13 Linse mit gelöteten Halteelementen, schematisch Darstellung/ Applikation  
 SQ1 Glas/ Titan, Ti/Pt/Au Metallisierung, sequentielle Laserspots,  
 $\lambda = 950 \text{ nm}$ , Fokus $\varnothing$  1,2 mm,  $P_{\text{mittel}} = 5 \text{ W}$ ,  $t = 1500 \text{ ms}$  [Quelle JO L.O.S.]

Bild 6-14 zeigt einen laserstrahlgelöteten Strahlteilerwürfel. Die Einzelprismen sind aneinander angesprengt und werden mittels seitlicher Verbindungsplatten und Au80Sn20-Lotpreforms durch sequentielle Laserspots fixiert. Der Strahlteilerwürfel kann ohne die übliche Klebstoffschicht aufgebaut werden.

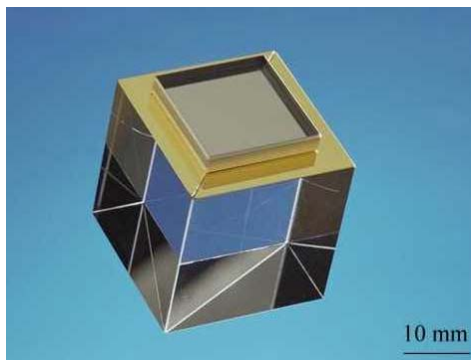


Bild 6-14 Laserstrahlgelöteter Strahlteilerwürfel  
 SQ1/SQ1 Glas, Ti/Pt/Au Metallisierung, sequentielle Laserspots  
 $\lambda = 808 \text{ nm}$ , Fokus $\varnothing$  0,65 mm,  $P_{\text{mittel}} = 3,5 \text{ W}$ ,  $t = 500 \text{ ms}$  [Quelle JO L.O.S.]

Durch die vorgestellten Applikationen werden neue Lösungsansätze für die klebstofffreie Optikmontage aufgezeigt und das in den vorgestellten Untersuchungen beschriebene Potential der Verbindungstechnologie Laserstrahllöten weiter verdeutlicht.

## 7 Zusammenfassung

Das Laserstrahllöten ist in vielen Bereichen der Halbleiterindustrie ein etabliertes selektives Fügeverfahren. Ausgenutzt wird vor allem die Eigenschaft eines räumlich und zeitlich begrenzten Energieeintrags bei gleichzeitig flexibler, verschleißfreier Prozessführung. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass dieses Potential auch zum Aufbau hybrider optischer Systeme eingesetzt werden kann.

Voraussetzung für den Einsatz metallischer Weichlote zum Verbinden von optischen Materialien wie BK7 oder SQ1 ist eine applikationsbezogene Metallisierung der Bauteile auf den zu fügenden Bereichen. Durch den im Rahmen der Untersuchungen entwickelten Sputterprozess ist es möglich, komplette Schichtsysteme, bestehend aus Haftschicht, Diffusionsbarriere und Lotschicht in einer Vakuumfolge zu applizieren. Es werden sehr haftfeste und reproduzierbar homogene Metallisierungen erzielt, die sich mittels Dampfschattenmasken oder lithographischen Verfahren in unterschiedlichen Genauigkeitsklassen strukturieren lassen. Um die bestehenden Verbindungsanforderungen, wie hohe Präzision bei geringer Kriechneigung, Temperatur- und Feuchtebeständigkeit bei gleichzeitiger flussmittelfreier Prozessführung zu erfüllen, wird das eutektische 80Au20Sn wt% Lot verwendet. Durch die entwickelte Sputtertechnologie ist es erstmalig möglich, die Legierung als sehr dünne Lotschicht in der eutektischen Zusammensetzung zu applizieren und somit dem Lötprozess vorgelagerte Reflowprozesse zum Einstellen der Legierungszusammensetzung zu vermeiden.

Bedingt durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der zu fügenden Materialien entstehen nach dem Abkühlen im Bereich der Lötverbindung mechanische Spannungen. Im Ergebnis treten beim Aufbau hybrider Systeme für das optische Material kritische Zugspannungen auf. Aufbauend auf der Wechselwirkung Strahlung-Stoff wird ein thermomechanisches FEM-Modell des Laserstrahllötprozesses optischer Komponenten mit dünnen Lot-schichtsystemen entwickelt. Dadurch ist es möglich, die Spannungsbelastung der Bauteile abzuschätzen. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die auftretenden Spannungen nur im Falle einer gleichartigen Materialpaarung als unkritisch zu bewerten sind und das Lot bis in den Bereich der Fließgrenze belastet wird. Durch bezüglich des thermischen Ausdehnungskoeffizienten angenäherte Materialpaarungen sowie eine angepasste Fokusgeometrie

lässt sich die Belastung der Bauteile verringern. Durch experimentelle Untersuchungen, pyrometrische Temperaturmessung sowie interferometrische Messungen konnten die Ergebnisse der Simulationen bestätigt werden.

Für hybride optische Systeme aus BK7, SQ1 und Zerodur<sup>®</sup> wurde eine neuartige, auf dem Laserstrahlötprozess basierende, flussmittelfreie Verbindungstechnologie in Form einer industrietauglichen Lösung entwickelt. Die spezifischen Lötprozessparameter, insbesondere der Energieeintrag bestimmt durch Absorption und Bestrahlungsdauer sowie die Leistungsdichte, wurden iterativ ermittelt.

Eingesetzt wurde ein fasergekoppelter Hochleistungsdiodenlaser, der eine berührungslose und temperaturgeregelte Prozessführung ermöglicht. Auf Grund einer hohen Kompaktheit und Flexibilität des Lasersystems kann die Löttechnologie auf unterschiedliche Anwendungen adaptiert werden.

Die Lötverbindungen weisen eine hohe mechanische Festigkeit sowie Vakuumdichtheit auf. Der Nachweis erfolgte anhand geeigneter Vergleichsproben.

Unter Voraussetzung einer definierten Rauigkeit und Ebenheit der Fügeflächen wurden sehr geringe Füge toleranzen der Lötverbindungen detektiert. Dadurch können hochwertigen Applikationen basierend auf Materialien mit minimalem thermischen Ausdehnungskoeffizient aufgebaut werden. Im Rahmen der Arbeit wurden die Applikationen optischer Ablenkbaustein und miniaturisierte Spiegelbaugruppe realisiert.

Lösungsansätze für eine klebstofffreie Optikmontage, basierend auf Laserstrahlötprozessen mit zugeführten Lotpreforms wurden aufgezeigt und anhand von Applikationen vorgestellt. Diese bilden zusammen mit der entwickelten Laserstrahlöttechnologie eine neue Fertigungstechnologie für hybride optische Systeme.

Zukünftig müssen insbesondere der Einsatz lithographischer Strukturierungsverfahren, die dadurch mögliche Beeinflussung der Lagetoleranzen durch Ausnutzung des Selbstjustageeffekts sowie der Einfluss von simultanen oder sequentiellen Bestrahlungskonzepten auf Form- und Lagetoleranzen der zu fügenden Bauteile detaillierter untersucht werden, um breite Anwendungsfelder für die entwickelte Technologie zu öffnen.

## 8 Literatur

- [Adolphi 99] Adolphi, B.: Bleifreie Lote was nun?. In: VTE. (1999) H. 5, S. 238-245
- [Agenda 00] Lenkungskreis Optische Technologien für das 21. Jahrhundert: Deutsche Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert. Düsseldorf: Mai 2000
- [Althaus 98] Althaus, H. L. u. a.: Microsystems and wafer processes for volume production of highly reliable fiber optic components for Telecom- and Datacom-application. In: IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology- Part B. (1998) H. 21, Nr. 2, S. 147-156
- [Amic 04] Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt Mikrooptische Bausteine für die modulare MST (MOBMO), Projektnummer 16 SV1340, 2004
- [Bachmann 02] Bachmann, F.: Industrial applications of high power diode lasers in materials processing. In: Applied Surface Science. (2003) S. 125-136
- [Baehr 03] Baehr, H. D.: Wärme- und Stoffübertragung. 4. Aufl., Berlin: Springer Verlag, 2003
- [Bährwolff 99] Bährwolff, A. u. a.: Spectroscopic measurement of mounting-induced strain in optoelectronic devices. In: IEEE Transactions. (1999) H. 23, S. 170-175
- [Beyer 98] Beyer, E.; Wissenbach, K.: Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung. Springer Verlag, 1998
- [Bergauer 02] Bergauer, A.; Eisenmenger-Sittner, C.: Physik und Technologie Dünner Schichten. URL: [www.ifp.tuwien.ac.at/forschung/duenne\\_schichten/](http://www.ifp.tuwien.ac.at/forschung/duenne_schichten/), 2002
- [Berkowitz 97] Berkowitz, H.; Walvoord, J.: Laser Soldering of fine pitch SMT devices. In: Soldering & Surface Mount Technology. (1997) S. 41-43

- 
- [Bosse 02] Bosse, L. u. a.: High Quality Laser beam Soldering. In: *Microsystem Technologies*. (2002) 7, S. 215-219
- [Bosse 03] Bosse, L.: Laser Beam Soldering – An Attractive Alternative to Conventional Soldering Technologies. In: *Photon processing in microelectronics and photonics II*, SPIE 4977, 2003
- [Brandner 03] Brandner, M.: Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und Kleben mit Hochleistungslasern. Utz Verlag München, 2003
- [Brockmann 03] Brockmann, R.: Calculation of laser-induced temperature field on moving thin metal foils in consideration of Stefan problem. In: *Opto& Laser Technology* (2003), S. 115-122
- [Chuang 04] Chuang, R. W.: A Fluxless Process of Producing Tin-Rich Gold-Tin Joints in Air. In: *IEEE Transactions on components and packaging technologies* (2004), Vol. 27
- DIN 8505-1 Löten; Allgemeines, Begriffe, Ausgabe:1979-05
- DIN 8505-3 Löten; Einteilung der Verfahren nach Energieträgern, Verfahrensbeschreibungen, Ausgabe:1983-01
- DIN 8593-8 Fertigungsverfahren Fügen - Teil 8: Kleben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Ausgabe:2003-09
- [Dobrinski 96] Dobrinski, P.: *Physik für Ingenieure*. Stuttgart Teubner, 1996
- [Elger 03] Elger, G., et al: A Fluxfree Soldering Process for Local Hermetic Sealing of Optoelectronic Subassemblies. IGT Workshop Photonische Aufbau und Verbindungstechnik, Wernigerode, Mai 2003
- [Feigl 02] Feigl, T.: Sputtern von Au/Sn-Legierungen zur Abscheidung eutektischer Au/Sn-Lotschichten. Zwischenbericht zum Projekt “Mikrolaserlöten optischer Komponenten“, 12/2002
- [Flanagan 96] Flanagan, A.: Laser Soldering and Inspection of Fine Pitch Electronic Components. In: *Journal of Materials Processing Technology* (1996), S. 532–541

- 
- [Fleckenstein 99] Fleckenstein, M.; u. a.: Innovation beim Laserstrahl­löten. In: Laseropto (1999), H. 31(6), S. 54- 57
- [Frey 95] Frey, H.: Vakuumbeschichtungen 1. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- [Grigull 90] Grigull, U.: Wärmeleitung. Springer Verlag, 1990
- [Groth 95] Groth, C., Müller, G.: FEM-für Praktiker-Temperaturfelder. Renningen Malsheim: Expert Verlag, 1995
- [Grünwald 85] Grünwald, F.: Fertigungsverfahren in der Gerätetechnik. Carl Hanser Verlag München Wien, 1985
- [Haag 00] Haag, M.: Diodenlaser – innovatives Werkzeug für die Produktion. URL: <http://zfs.rus.uni-stuttgart.de/publikationen>
- [Herbert 00] Herbert, F.: Bericht über IBSC 2000 International Brazing & Soldering Conference. In: VTE (2000), H. 4, S. 193- 196
- [Habenicht 90] Habenicht, G.: Kleben Grundlagen, Technologie Anwendungen. Berlin: Springer Verlag, 1990
- [Haferkorn 94] Haferkorn, H.: Optik. Berlin Leipzig: Barth Verlag, 1994
- [Hesse 96] Hesse, S.: Praxiswissen Handhabungstechnik. Renningen-Malsheim: Expert Verlag, 1996
- [Herrmann 02] Hermann, A.: Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weich­löten mit Diodenlasern. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2002
- [Hirt 00] Hirt, W.: Laserstrahl­löten in der industriellen Praxis. Meisenbach Bam­berg: LEF 2000
- [Hoult 02] Hoult, A. P.: Diode Laser Soldering of Metallized Fibers using Gold-Tin Preforms. ICAPS Reno, 2002
- [Hutter 03] Hutter, M.: Betrachtung von galvanisch erzeugten AuSn Bumps unter geometrischen Gesichtspunkten und die Auswirkungen auf den Bum­pingprozess und die FC-Montage. IGT Workshop Photonische Aufbau und Verbindungstechnik, Wernigerode, Mai 2003



- 
- [Hwang 00] Hwang, J.: Solder materials. In: SMT (2000) Vol. 14, H. 3
- [ITRS 03] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), Stand 2003, URL: <http://public.itrs.net/Files/2003ITRS/Home2003.htm>
- [Ivey 97] Ivey, D.G.: Microstructural Characterisation of Au/Sn Solders for Packaging in Optoelectronic Applications. In: Micron (1997) Vol. 29, H. 4, S. 281-287
- [Kämpfe 83] Kämpfe, B., Hunger, H. J.: Röntgenfeinstrukturanalyse. Leipzig: Verlag Technik, 1983
- [Kauffmann 02] Kaufmann, S.: Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik. Meißenbach Bamberg, 2002
- [Klein 97] Klein, A., u. a.: Metallurgical barrier system in Au/Sn solder bump joints. Proceedings DRIP VII (1997), S. 495- 498, Templin
- [Kreutzburg 97] Kreutzburg, K.: Aspekte des Laserstrahl­lö­ten­ von metallisch- kerami- schen Verbindungen. VDI Reihe 2, No. 421, 1997
- [Kufner 99] Kufner, M.; u. a.: Refraktive Mikrooptik für optische Intrachip- Verbindungen. Workshop für Photonische Integration und Aufbauten, Berlin 05/1999
- [Kuhmann 97] Kuhmann, J.: Untersuchungen zu einer flussmittelfreien und selbstjustierenden Flip-Chip Bondtechnologie für photonische Komponenten. Diss. TU Berlin, 1997
- [Labudovic 03] Labudovic, H.: Heat Transfer and Residual Stress Modeling of a Diamond Film Heat Sink for High Power Laser Diodes. In: IEEE Components and Packaging Technologies (2003), Vol. 26, H. 3, S. 575-581
- [Lee 94] Lee, C. H.: Bonding of InP laserdiodes by Au-Sn solder and tungsten-based barrier metallization schemes. In: Semiconductors science and technology (1994), H. 9, S. 379-386

- 
- [Li 00] Li, L.: The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing. In: Optics and Lasers in Engineering (2000), H. 34, S.231-253
- [Liu 02] Liu, D.: Laser reflow with plastic ball grid array. Internat. Symposium on Laser Precision Microfabrication, In: SPIE 4426, 2002
- [Lugscheider 02] Lugscheider, E.: Mikrolöten – Prozeß – und Applikationsentwicklung. URL: [www.rwth-aachen.de](http://www.rwth-aachen.de)
- [Matijasevic 91] Matijasevic, G.: Bonding Technology of Semiconductor Devices and its Characterization using scanning Acoustic Microscopy. Diss. University of California Irvine; 1991
- [Matsunami 84] Matsunami, A.: Data Nucl. Tables 31,1 (1984)
- [Miric 99] Miric, A. Z.: Bleifreie Lotlegierungen In: VTE (1999) H. 5; S. 259-268
- [Musiejovsky 98] Musiejovsky, L. u. a.: Solid solder technology as an alternative to solder paste for laser soldering, DVS-Berichte 192, 1998, S.278- 282,
- [Musiejovski 01] Musiejovsky, L.: Simulationsmethoden zur Untersuchung von thermischen Problemen im Packaging elektronischer Bauelemente, Diss., Wien, Techn. Univ., 2001
- [Naumann 92] Naumann, H.; Schröder, G.: Bauelemente der Optik. Hanser Verlag München, 1992
- [Naveed 03] Naveed, S. M.: Diode Laser Soldering – A Lumped Parameter Mathematical Model and Comparison of Different Optical Soldering Technologies. In: SPIE 4973, S. 142-157, 2003
- [Neff 62] Neff, H.: Grundlagen und Anwendungen der Röntgenfeinstrukturanalyse. München: Oldenburgverlag, 1962
- [Nicolics 92] Nicolics, J. u. a.: Laser-Mikrolöten in der Dünnschichttechnik. DVS - Berichte 141, 1992
- [Pac Tech 03] URL: [www.pactech.de](http://www.pactech.de), Single ball placement and laser reflow of solder balls, 2003

- 
- [Pittroff 95] Pittroff, W.: Au/Sn-solder bumps with tungsten silicide based barrier metallisation. In: Appl. Phys. Lett. (1995), Vol. 67(16), S. 2367- 2369,
- [Pittroff 99] Pittroff, W.: Au/Sn-Bumping von Laserchips, Flip-Chip Technik und Selbstjustagegenauigkeit. Workshop für Photonische Integration und Aufbauten, Berlin 05/1999
- [Pittroff 01] Pittroff, W.: Mounting of high power laser diodes on Boron Nitride heat sinks using an optimised Au/Sn metallurgy. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging (2001), Vol. 24, H. 4
- [Pucher 98] Pucher, H. J.; Fleckenstein, M.: Characterisation and control of the laser micro soldering process for solid solder deposits using pyrometrie. In: SPIE 3509, S. 210- 220, 1998
- [Pulker 96] Pulker, H. K.: Coatings on glass. Thin Films Science and Technology 6, Elsevier Verlag, 1996
- [Rahn 00] Rahn, A.: Soldering with Diode Lasers. In: SMT (2000) Vol. 14, H. 5
- [Scheel 02] Scheel, W.: Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung. Templin:Verlag Markus A. Detert, 2002
- [Schmidt 94] Schmidt, F. u. a.: Praxis der Rasterelektronenmikroskopie und Mikrobereichsanalyse. Renningen Malsheim: Expert Verlag, 1994
- [Schmidt 03] Schmidt; J. P. u.a.: 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
- [Schrottmayer 94] Schrottmayer, D.: Ein neues Verfahren zur Qualitätskontrolle bei schnellen Laserlötvorgängen. DVS-Berichte 158, Düsseldorf, 1994
- [Sheen 02] Sheen, M. T. u. a.: The Influence of thermal aging on joint strength an fracture surface of Pb/Sn and Au/Sn solders in laserdiode packages. In: Journal of Electronic Materials (2002), Vol. 31, H. 8
- [Staupendahl 95] Skripte zum Fernstudiengang Lasertechnik, 1995

- 
- [Stock 01] Stock, A.: Modular Optic Devices and Optic Interfaces. Micro System Technologies, Düsseldorf, 03/2001
- [Tjong 00] Tjong, S. C. u. a.: Metallization of CVD diamond films by ion beam assisted deposition. In: Materials Chemistry and Physics (2000), Vol. 62(3), S. 241-246
- [Tjong 01] Tjong, S. C.; Ho, H. P.; Lee, S. T.: Development of single- and multi-layered metallic films on diamond by ion beam-assisted deposition. In: Diamond and Related Materials (2001), Vol. 10(9-10), S. 1578-1583
- [TU Dresden 01] Abschlussbericht zum AiF Vorhaben 12.077B: Alternatives Löten von Mikrobausteinen. Dresden und Itzehohe, 2001
- [TU Berlin 03] Berlin Center of Advanced Packaging@ Technische Universität Berlin: Skript zur Vorlesung "Technologien der Mikrosysteme II". URL: [www.mst.tu-berlin.de/download/education/714/TMST2-03.pdf](http://www.mst.tu-berlin.de/download/education/714/TMST2-03.pdf)
- [Wada 91] Wada, O.; Kumai, T.: Preferential reaction and stability of the Au-Sn/Pt system: Metallization structure for flip-chip integration. In: Appl. Phys. Lett. (1991) 5 (9), S. 908-910
- [White 99] URL: [www.itri2.org/tta/htc\\_e/report/htc\\_chap6.pdf](http://www.itri2.org/tta/htc_e/report/htc_chap6.pdf)
- [Weiß 98] Weiß, S. u. a.: Design, simulation and technological realization of a reliable packaging concept for high power laser bars. In: Electronic Components and Technology IEEE (1998), S. 1395-1401
- [Würsch 00] Würsch, A.: An innovative micro optical element assembly robot characterized by high accuracy and flexibility. In: IEEE electronic Components and Technology Conference (2000), S. 218-222
- [Yoder 02] Yoder, P. R.: Mounting optics in optical instruments. Bellingham: SPIE Press, 2002

## **Danksagung**

Mein Dank gilt meinem betreuenden Hochschullehrer Herrn Prof. Dr. A. Tünnermann, Herrn Prof. Dr. R. Theska, Herrn Prof. Dr. U. Glatzel sowie Frau Dr. R. Eberhardt für ihre Unterstützung und wertvollen Anregungen.

Besonders erwähnen möchte ich die konstruktive Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Fraunhofer IOF während der Entstehung der vorliegenden Dissertation, insbesondere mit Herrn Dipl.-Ing.(FH) W. Stöckl im Rahmen der Entwicklung der Beschichtungstechnologie, Herrn Dipl.-Ing. G. Leibeling bezüglich der Probenpräparation, Herrn Dr. T. Peschel und Herrn Dipl.-Ing.(FH) C. Schenk zu Fragestellungen der Simulation, Herrn Dipl.-Ing. H. Uhlig und Frau Dipl.-Ing.(FH) S. Müller bei der Durchführung von Transmissions- und interferometrischen Messungen.

Herrn Prof. Dr. M. Wendt vom IPHT-Jena danke ich für die ausführliche Diskussion der Ergebnisse der REM-Untersuchungen, Herrn Dipl.-Ing. J. P. Schmidt von der Jenoptik L.O.S. für die gute Zusammenarbeit und die zahlreichen Anregungen für Applikationen.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Verbundprojekte Löten mikrooptischer und optoelektronischer Komponenten (LOMO), gefördert vom TMWFK und

Mikrooptische Bausteine für die modulare MST (MOBMO), gefördert vom BMBF, Projektträger VDI/VDE-IT.

---

## Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel und Literatur angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich/unentgeltlich geholfen:

1. Dipl.-Ing. J. Hempel, FSU Jena: REM-Untersuchungen
2. Prof. M. Wendt, IPHT Jena: REM-Untersuchungen
3. Dr. J. Vogel, AMIC GmbH: FEM-Simulationen zum Ablenkbaustein

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die geltende Promotionsordnung der Physikalisch-Astronomischen Fakultät ist mir bekannt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Jena, 03.11.2004

Henrik Banse