

FEM-Simulation des Laserstrahl­lötprozesses zum Fügen optischer Bauteile



Henrik Banse



Thomas Peschel



Christoph Schenk

Das Laserstrahl­löten von Optikauteilen wird als eine neue Fügetechnologie im Rahmen der Montage hybrider optischer Systeme eingesetzt, um hochwertige optische Systeme für hohe Anforderungen bezüglich der UV-Beständigkeit und Langzeitstabilität zu qualifizieren. Durch die thermo-mechanischen Bauteil- und Loteigenschaften können während des Lötprozesses für optische Materialien kritische Zugspannungen im Bereich der Füge­stelle entstehen. FEM-Simulationen werden unter diesem Aspekt zur Gestaltung und Optimierung des Lötprozesses verwendet.

Im Rahmen der auf dem Fügeprozess Laserstrahl­löten basierenden Montage einer miniaturisierten Spiegelbaugruppe aus Zerodur® wurde ein grundlegendes Simulationsmodell entwickelt (Abb. 1) /1/. Für die thermische Rechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- zylinderförmige Körper mit planaren, vollständig metallisierten Fügeflächen
- 2-D-Modell entsprechend der Axial­symmetrie der Körper (Abb. 2)
- eutektisches 80Au20Sn Lot, jeweils 3 µm dicke Schicht auf jedem Bauteil
- Laserstrahlung als stationäre Oberflächen­wärmequelle mit gaussförmiger Intensitätsverteilung /2/
- abgeschätzter Wärmeübergangswert für nicht verbundene Bereiche
- idealer thermischer Kontakt zwischen Lotschichten nach dem Aufschmelzen durch zusätzliche, zu aktivierende, 0,2 µm dicke Schicht
- Wärmetransport im Modell als reine Wärmeleitung
- adiabatische äußere Randbedingungen des Modells.

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

Abbildung 3 zeigt die Temperaturverteilung am Pulsende. Es wird ein lokal eng begrenzter Bereich erwärmt. Die Maximaltemperatur beträgt 438 °C.

Die Anwendung des Temperaturfeldes als Lastvektor für eine strukturelle mechanische Simulation ermöglicht die Charakterisierung der entstehenden mechanischen Belastungen. Das beschriebene Modell wird dazu modifiziert:

- Veränderung der Elementtypen
- elastisches und plastisches Materialverhalten des Lotes (bilinear kinematisches Modell)
- temperaturabhängige Materialdaten für Wärmeausdehnung, E-Modul und Fließgrenze
- zusätzliche Drucklast.

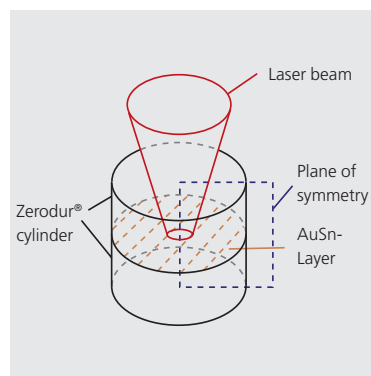
Abbildung 4 zeigt die Zugspannung (S_1) in der Fügezone im Zerodur® 3,5 s nach Prozessbeginn. Diese stellt für Gläser und Glaskeramiken das relevante Versagenskriterium dar. Das Ergebnis verdeutlicht mit 62 MPa maximaler Zugspannung eine ertragbare, lokal begrenzte mechanische Belastung der gelöteten Baugruppe, die durch rissfreie Lötverbindungen von Zerodur®-Bauteilen verifiziert werden konnte. Basierend auf dem vorgestellten Modell ist es möglich, Auswirkungen veränderter Prozessparameter des Laserstrahl­lötprozesses, wie z. B. der Fokusgeometrie, auf die Temperaturfeldverteilung zu berechnen sowie deren Auswirkung auf die Spannungsbelastung der Füge­stelle realitätsnah abzuschätzen.

Literatur:

- /1/ Banse, H.: »Laserstrahl­löten – Technologie zum Aufbau optischer Systeme«, Dissertation, Mensch & Buch Verlag, Berlin 2005.
- /2/ Beyer, E.; Wissenbach, K.: »Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung«, Springer Verlag, 1998

Abb. 1: Modell des Laserstrahl­lötprozesses.

Fig. 1: Model of the laser beam soldering process.



FEM-simulation of the laser beam soldering process for joining optical components

Laser beam soldering of optical components is used as joining technology during the assembly of hybrid optical systems that have to meet the requirements of UV-stability and long term stability for high quality optical systems. Because of the thermo-mechanical properties of the components and the solder, critical tensile stress can built up during the soldering process inside the region being joined. With this aspect in mind, FEM-simulations were applied to analyse and optimise the soldering process.

With regards to the laser beam soldering based assembly of a miniaturized mirror module made of Zerodur®, a basic simulation model was developed (Fig. 1) /1/. For the thermal calculation the following restrictions were assumed:

- cylindrically shaped components with planar, completely metallised joining areas
- 2D-modell according to the axial symmetry of the components (Fig. 2)
- eutectic 80Au20Sn solder, with 3 µm layers on each component
- laser radiation by means of a stationary surface heat flux with Gaussian intensity distribution /2/
- estimated coefficient of heat conduction of regions not to be joined
- ideal thermal contact between layers after melting by means of an additional 0.2 µm thick layer, to be activated after melting temperature
- heat transport within the model by means of pure heat conduction
- adiabatic boundary conditions of the model.

For calculation of the phase transition (melting the solder) enthalpy is used for the estimation of the heat capacity. Figure 3 shows the temperature distribution at the end of the laser pulse. A locally restricted region is heated up. The maximum temperature is 438 °C.

For characterisation of the mechanical stress the temperature distribution is used as a load vector for the mechanical simulation. Consequently, the described model has to be modified as regards:

- change in the element types
- elastic and plastic material properties (bilinear cinematic model)
- temperature dependent material properties in terms of thermal expansion, young's module and yield point
- additional pressure load.

Figure 4 shows the tensile stress S1 in the joining region within the Zerodur® 3.5 s after starting the process. This stress is the most significant failure criteria for glasses and glass ceramics. The results clearly illustrate that at a maximum tensile stress of 62 MPa, the stress load on the soldered assembly is both very low and restricted: a conclusion which is experimentally verified through the persistence stable and crack free joints of Zerodur®-components.

Based on the discussed model it is possible to calculate the impact of changed process parameters of the soldering process, e. g. focus geometry, on the temperature distribution and to estimate its effect on the stress load of the joining region in a realistic way.

References:

- /1/ Banse, H.: »Laserstrahlöten – Technologie zum Aufbau optischer Systeme«, Dissertation, Mensch & Buch Verlag, Berlin 2005.
- /2/ Beyer, E.; Wissenbach, K.: »Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung«, Springer Verlag, 1998

Abb. 4: Spannungskomponente S1 im Zerodur® (Fügezone) nach 3,5 s, $S1_{max} = 62$ MPa.

Fig. 4: Stress S1 in Zerodur® (joining region) after 3.5 s, $S1_{max} = 62$ MPa

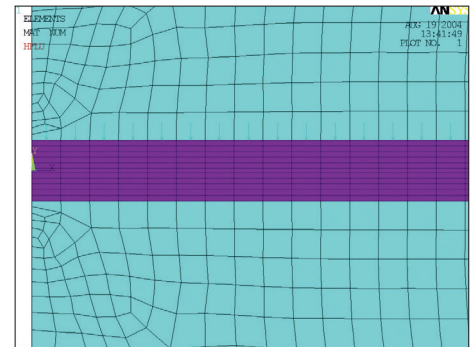


Abb. 2: Ausschnitt der vernetzten 2-D-Symmetrieebene im Bereich des Strahlencentrums mit Lastvektor Oberflächenwärmequelle (HFLU).

Fig. 2: Detail of the meshed plane of symmetry in the region of the beam centre with load vector heat flux (HFLU).

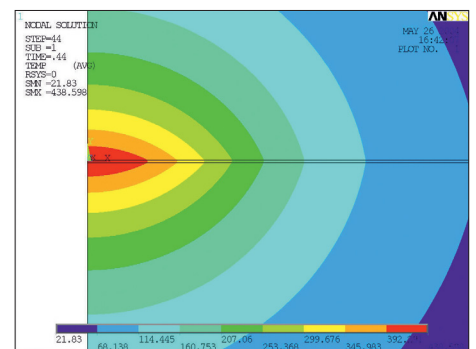


Abb. 3: Temperaturfeld der gelöteten Zerodur® Körper nach 0,44 s, $T_{max} = 438$ °C, Ausschnitt der Symmetrieebene.

Fig. 3: Temperature distribution of soldered Zerodur® pieces after 0.44 s, $T_{max} = 438$ °C, detail plane of symmetry.

