

Laserschweißen

Einführung

Die Lasertechnik ist bislang vor allem in der Metallbearbeitung etabliert. Bei der Bearbeitung von Kunststoffen beschränkten sich die Einsatzgebiete des Lasers auf das Beschriften, Schneiden, Bohren und Rapid Prototyping. Erst in jüngster Zeit werden für diese Materialien Laser-Fügeverfahren entwickelt. Auf dem Gebiet des Schweißens von thermoplastischen Halbzeugen mit Hilfe von Laserstrahlung sind zwei Verfahren entwickelt worden, auf die sich die Forschungsarbeiten konzentrieren: Das Laserstumpfschweißen, welches dem kontaktlosen Heizelementschweißen vom Verfahrensablauf her gleich ist, und das Laser-Durchstrahlschweißen, bei dem Halbzeuge mit unterschiedlichen strahlungsoptischen Eigenschaften geschweißt werden.

Beide Schweißverfahren setzen unter anderem gezielt die Strahlung des Nd:YAG-Festkörperlasers ein. Die kurzwellige Strahlung (Wellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$) dringt in nahezu alle Kunststoffe ohne Zusatzstoffe bis in den Millimeterbereich ein. Spezielle Absorptionseigenschaften der Kunststoffe können durch die Verwendung von Füllstoffen, Verstärkungsstoffen oder Farbpigmenten eingestellt werden.

Neben den allgemeinen Vorteilen der Lasertechnologie in der Schweißtechnik, wie hohe Flexibilität und kurze Umrüstzeiten, bietet die Verwendung von Festkörperlasern die Möglichkeit des Einsatzes von Lichtwellenleitern. Dieses ergibt neben der räumlichen Flexibilität die Möglichkeit, die Strahlung eines Lasers im time-sharing-Prinzip nacheinander in mehreren Schweißmaschinen zu verwenden, wodurch die Investitionskosten gesenkt werden. Vorteile dieser Schweißverfahren gegenüber anderen, z. B. Heizelement- und Heizstrahlerschweißen, sind hauptsächlich in einer präzisen, kontaktlosen Wärmeeinbringung sowie der Realisierbarkeit hoher Schweißtemperaturen zu sehen. Damit bieten Laserschweißverfahren optimale Anwendungsmöglichkeiten bei niedrigviskosen sowie hochtemperaturbeständigen Kunststoffen.

Verfahrensablauf des Laser-Durchstrahlschweißens von Thermoplasten

Bild 1 zeigt das Prinzip des Laser-Durchstrahlschweißverfahrens, auf das im Folgenden näher eingegangen werden soll. Zur Anwendung des Verfahrens ist es erforderlich, daß ein Halbzeug für den Laserstrahl transparent ist und das andere Halbzeugmaterial eine hohe Absorptionskonstante aufweist. Da die Nd:YAG-Laserstrahlung in die meisten Kunststoffe (amorphe und teilkristalline) ohne Zusatzstoffe tief eindringt, kann die Bedingung an die Halbzeuge durch unterschiedliche Pigmentierung des Materials, z. B. mit Gasruß, erfüllt werden.

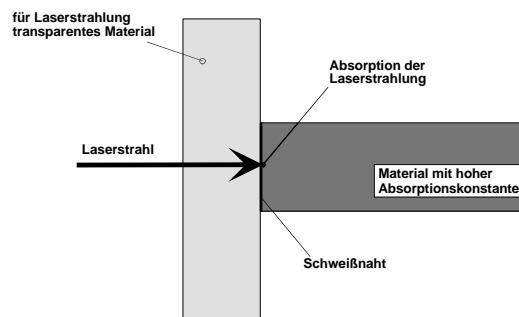


Bild 1: Prinzip des Durchstrahlschweißens

Ein für das menschliche Auge farbiger Kunststoff kann für die Strahlung des Nd:YAG-Lasers durchaus transparent sein. Aufgrund dieser Materialkombination transmittiert der Laserstrahl fast ungehindert durch das erste Halbzeug hindurch und wird in oberflächennahen Schichten des zweiten Halbzeugs (hohe Absorptionskonstante) vollständig absorbiert (Bild 2).

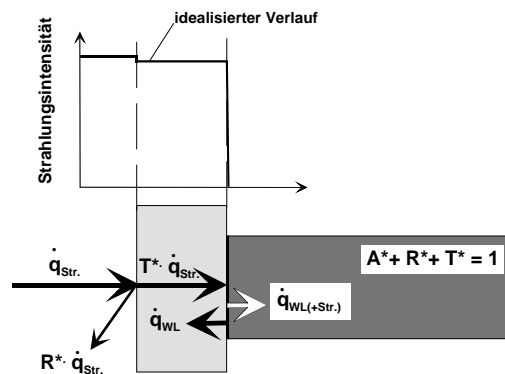


Bild 2: Energetische Verhältnisse

Die dadurch entstehende Wärme wird durch Wärmeleitung sowohl in tiefere Schichten des absorbierenden Halbzeugs als auch in das für den Laserstrahl transparente Halbzeug transportiert. Durch die Absorption kommt es zu einer Temperaturerhöhung in der Fügezone. Die entstehende Schmelze verbessert den Wärmekontakt zwischen den Fügepartnern und bewirkt durch Volumenausdehnung einen inneren Fügedruck, sofern der Kontakt der Fügeteile zu Beginn des Schweißvorganges drucklos vorlag. Wie beim Schweißen von Folien erfolgen bei diesem Laserschweißverfahren Erwärmungs- und Fügephase zeitgleich. Eine ausgeprägte Quetschströmung, wie etwa beim Heizelementschweißen, findet daher nicht statt. In Bild 3 ist die Dünnschnittaufnahme der Schweißnaht einer laserdurchstrahlgeschweißten Probe aus PP dargestellt, bei der das absorbierende Fügeteil durch einen Rußgehalt von 0,05 Gew.-% gekennzeichnet ist (Laserleistung: 45 W; Scangeschwindigkeit: 6 mm/s; Fügedruck: 0,3 N/mm²; Scanzahl: 2, ohne Begrenzung des Fügeweges).

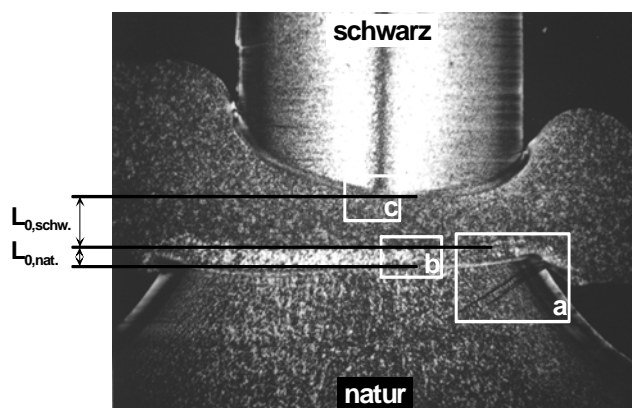


Bild 3: Gefügaufnahme einer Probe aus PP

Hier sind die Schmelzeschichtdicken des teildurchlässigen Fügeteils $L_{0,nat.}$ und des absorbierenden Fügeteils $L_{0,schw.}$ hervorgehoben. Deutlich wird, daß das pigmentierte Fügeteil wesentlich tiefer plastifiziert wurde als das teildurchlässige, bedingt durch die große Eindringtiefe der Laserstrahlung bei einem geringen Rußgehalt von 0,05 Gew.-%. Da die gezeigte Schweißnaht ohne Begrenzung des

Fügeweges hergestellt wurde, kam es zu einer unterschiedlichen Schweißwulstbildung auf beiden Seiten bedingt durch eine Ungenauigkeit bei der Fixierung der Fügeteile zueinander. Der Schweißwulst besteht nahezu ausschließlich aus dem Material des absorbierenden Fügeteils. Infolge der Wärmeübertragung vom Schweißwulst insbesondere in das absorbierende Fügeteil sind die Randbereiche dieses Fügeteils tiefer plastifiziert als die Fügeteilmitte.

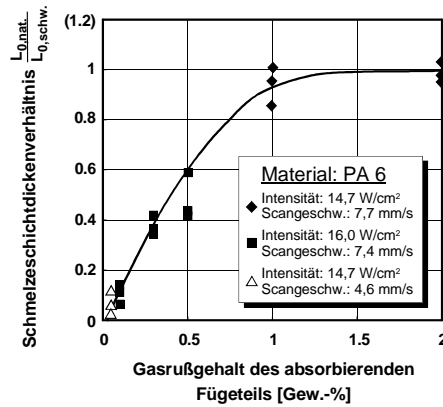


Bild 4: Schmelzeschichtdickenverhältnis

Bild 4 zeigt die Schmelzeschichtdicke des transparenten Fügeteils im Verhältnis zur Schmelzeschichtdicke des absorbierenden in Abhängigkeit vom Gasrußgehalt des absorbierenden Fügeteils. Enthält das absorbierende Fügeteil eine geringe Menge an Gasruß, so wird die Strahlungsenergie in einer breiten Materialschicht absorbiert. Es entsteht ein relativ flaches Temperaturprofil mit einer langsam steigenden Kontaktflächentemperatur. Da die Wärmeleitung in das transparente Fügeteil vom Temperaturgradienten abhängt, gelangt nur ein geringer Teil der eingekoppelten Strahlungsenergie in das transparente Fügeteil. Dagegen ist die absorbierende Schicht im Falle eines hohen Gasrußgehaltes sehr dünn und die zugeführte Energie wird unter der Bedingung gleicher Temperaturleitwerte zu gleichen Teilen in beide Fügeteile geleitet.

Festigkeitsuntersuchungen beim Laserdurchstrahlenschweißen

In Bild 5 sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchung zum Material PA 6 mit einem Rußgehalt von 0,3 Gew.-% im absorbierenden Fügeteil dargestellt. Bei diesem Material bestätigten sich die Erkenntnisse aus den Untersuchungen mit PE-HD. Die maximalen Schweißnahtfestigkeiten ergaben sich bei diesem teilkristallinen Material mit höchster Laserleistung und niedrigster Scangeschwindigkeit im untersuchten Bereich bei zweimaligem Abscannen der Fügefläche.

Der Verlauf der Festigkeit in Bild 5 läßt vermuten, daß bei größerer zugeführter Energiemenge (durch höhere Laserleistung und/oder niedrigere Scangeschwindigkeit) die Festigkeit nicht weiter ansteigt. Vielmehr wird aufgrund thermischer Materialschädigungen in der Fügefläche mit einem Festigkeitsabfall zu rechnen sein.

Im Bereich des Laserdurchstrahlenschweißens etablieren sich in letzter Zeit zunehmend Verfahren, mit denen auch Abschmelzwege realisiert und somit Toleranzen ausgeglichen werden können. Zu nennen sind hier das Quasisimultan- und das Simultanverfahren.

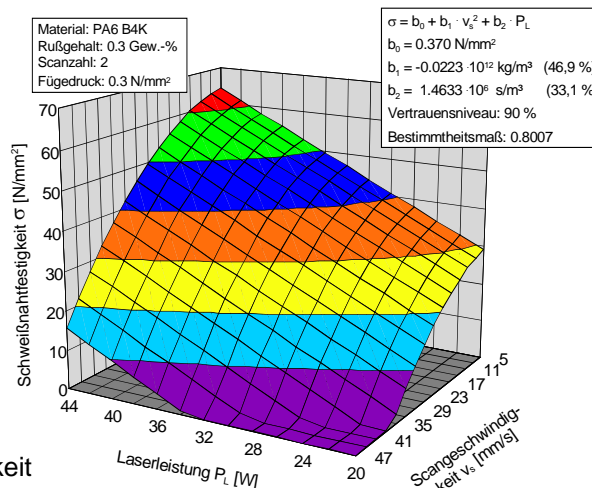


Bild 5: Schweißnahtfestigkeit

Verfahrensablauf des Laserstumpfschweißens von Thermoplasten

Das Laserstumpfschweißverfahren ist vom Verfahrensablauf her mit dem des kontaktlosen Heizelementschweißens sowie des Heizstrahlerschweißens identisch. In Bild 6 sind die Weg- und Kraftverläufe des Laserstumpfschweißverfahrens den Verläufen des kontaktbehafteten Heizelementschweißens gegenübergestellt. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt in der Erwärmungsphase, in der die Wärmeübertragung beim Heizelementschweißen in erster Linie durch Wärmeleitung erfolgt. Beim Laserstumpfschweißverfahren erfolgt die Erwärmung der Fügezonen kontaktlos durch einen Laserstrahl, der mit Hilfe von Scanner- und Umlenkspiegeln mit hoher Frequenz auf den Fügeflächen verfahren wird (Bild 7).

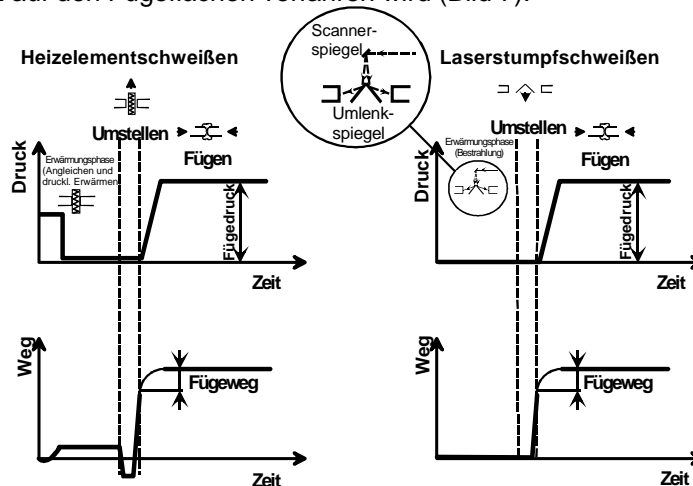


Bild 6: Weg- und Kraftverläufe

Die Umlenkspiegel werden zu Beginn der Erwärmungsphase wie das Heizelement zwischen die eingespannten Fügeteile gefahren. Ein Angleichen entfällt beim Laserstumpfschweißen, da bei der Strahlungserwärmung von Anfang an ein optimaler Wärmeübergang besteht.

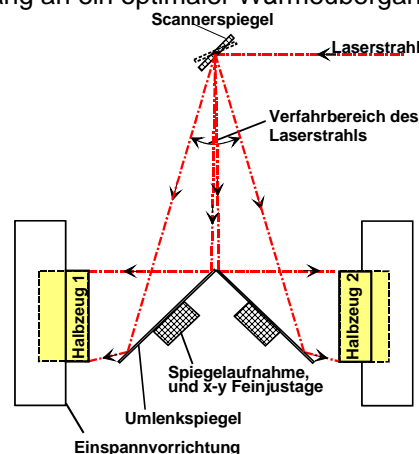


Bild 7: Verfahrensablauf Laserstumpfschweißen

Durch die hohe Verfahrensgeschwindigkeit des Laserstrahls auf den Fügeflächen wird eine homogene Erwärmung der Fügezonen durch die punktförmige Wärmequelle des Laserstrahls sichergestellt. Der Durchmesser des Laserstrahls entspricht in erster Näherung den Wand-dicken der Fügeteile. Hierdurch kann auf ein zeilenförmiges Abscannen der Fügeflächen durch den Laserstrahl verzichtet werden. Nach Erreichen der gewünschten Schmelzeschichtdicke beginnt die Umstellphase.

Bei der Umstellung von Erwärmungs- auf Fügephase werden die Umlenkspiegel aus der Fügeebene herausgefahren. Ein Zurückfahren der Halbbeuge, wie es beim Heizelementschweißen zur Trennung der Fügeteile von den Heizelementoberflächen erforderlich ist, entfällt beim Laserstumpfschweißverfahren. Die Fügephase beginnt mit der gegenseitigen Berührung der Fügeflächen und ist vom Ablauf her mit der Fügephase beim Heizelementschweißen identisch.