

Ersetzt Ausgabe Januar 2005

Inhalt:

- 1 Geltungsbereich
 - 2 Erwärmungsprinzip
 - 2.1 Durchstrahlschweißen
 - 2.2 Stumpfschweißen
 - 3 Werkstoffeigenschaften
 - 3.1 Optische Eigenschaften von Kunststoffen – Transmission, Reflexion, Absorption, Streuung
 - 3.2 Grundwerkstoffe
 - 3.3 Additive
 - 4 Laserarten
 - 4.1 Diodenlaser
 - 4.2 Nd:YAG-Laser
 - 4.3 Faserlaser
 - 4.4 CO₂-Laser
 - 4.5 Übersicht
 - 5 Bestrahlungsstrategien und Verfahrensvarianten
 - 5.1 Konturschweißen
 - 5.2 Simultanschweißen
 - 5.3 Quasi-Simultanschweißen
 - 5.4 Verfahrensvarianten
 - 6 Maschinenkonzepte
 - 6.1 Grundaufbau
 - 6.2 Strahlführung und -formung
 - 6.3 Spanntechnik
 - 6.4 Bestehende Maschinenkonzepte
 - 7 Konstruktive Gestaltung der Fügeteile
 - 7.1 Allgemeine Anforderungen
 - 7.2 Konstruktive Merkmale der Fügegeometrie
 - 8 Einflussfaktoren auf die Schweißnahtqualität
 - 8.1 Überblick
 - 8.2 Einfluss der Kunststoffkombination
 - 8.3 Einfluss von Granulatherstellung und Compoundieren
 - 8.4 Einfluss des Spritzgießprozesses
 - 8.5 Einfluss des Bauteilhandlings
 - 8.6 Einfluss der Schweißbedingungen
 - 9 Maßnahmen zur Qualitätssicherung
 - 9.1 Überwachung vor dem Laserschweißprozess
 - 9.2 Überwachung während des Schweißprozesses
 - 9.3 Konstruktions- und Prozess-FMEA
 - 9.4 Maschinen- und Prozessfähigkeitsumersuchung
 - 9.5 Eingangsprüfung der Fügeteile
 - 9.6 Qualitätsregelkarte in der laufenden Fertigung
 - 9.7 Statistische Prozesskontrolle (SPC)
 - 10 Prüfen von Schweißverbindungen
 - 10.1 Nahtqualitätsdefinition
 - 10.2 Zerstörungsfreie Prüfungen
 - 10.3 Zerstörende Prüfungen
 - 11 Sicherheitsvorschriften
 - 12 Schrifttum
- Anhang: Ausgewählte Anwendungsbeispiele

1 Geltungsbereich

Diese Richtlinie gilt für das Fügen von Formteilen und Halbzeugen aus thermoplastischen Kunststoffen mittels Laserstrahlung. Die dafür erforderlichen Maschinen, die verwendete Verfahrenstechnik sowie die werkstoffbezogenen Einflüsse werden beschrieben.

2 Erwärmungsprinzip

Beim Laserstrahlschweißen wird die elektromagnetische Energie der infraroten Laserstrahlung im thermoplastischen Kunststoff in Wärme umgewandelt, um eine Plastifizierung der Fügezone zu erreichen. Dabei wird zwischen drei verschiedenen Bestrahlungsstrategien unterschieden (siehe Abschnitt 5).

Die Fügezone kann

- sequentiell (einmalig) abgefahren werden,
- im gesamten Simultan bestrahlt werden,
- mit einer sehr hohen Vorschubgeschwindigkeit mehrfach abgefahren werden, sodass es zu einer quasi-simultanen Bestrahlung kommt.

Die auf die Fügezone treffende Laserstrahlung wird von den Fügeteilen in niedrigen Anteilen reflektiert, absorbiert und transmittiert. Der Anteil der absorbierten Strahlung führt zum Erwärmen und Aufschmelzen der Fügezone.

2.1 Durchstrahlschweißen

Für das Durchstrahlschweißen (Bild 1) wird eine Werkstoffkombination gewählt, bei der die Fügepartner sich hinsichtlich ihrer Absorptionseigenschaften stark unterscheiden. Während einer der Fügepartner eine hohe Transmission für die verwendete Laserstrahlung aufweist, also eine große optische Eindringtiefe besitzt, zeichnet sich der andere durch eine geringe Eindringtiefe bzw. eine hohe Absorption aus. Nähere Informationen dazu sind im Beiblatt 1 zur Richtlinie 2243 „Bestimmung des Transmissionsgrades T des laserstrahltransparenten Fügepartners beim Laserdurchstrahlschweißen von Thermoplasten“ zu finden.

Die Fügeteile werden vor dem Schweißen miteinander in Kontakt gebracht. Die zum Plastifizieren des Werkstoffes notwendige Strahlungsenergie tritt durch den für den Laserstrahl transparenten Fügepartner, ohne diesen dabei wesentlich zu erwärmen. Die Strahlungsenergie wird im zweiten Fügepartner durch Absorption in Wärme umgewandelt. Hierdurch werden die bestrahlten Bereiche aufgeschmolzen. Die benötigte Wärme für das Aufschmelzen des transparenten Fügepartners wird diesem über Wärmeleitung vom absorbierenden Partner zugeführt. Die Volumenausdehnung der beiden Fügepartner bewirkt zusätzlich zur eingesetzten Vorspannung einen inneren Fügedruck, sodass es zu einer Schweißung kommt. Die zum Aufschmelzen des Materials notwendige Energie wird direkt an der Fügestelle eingebracht. Dort wird die Strahlung in Wärme umgewandelt. Die Wärmeeinflusszone soll minimal und kontrollierbar bleiben, sodass eine thermische Schädigung der unmittelbaren Umgebung der Schweißnaht auszuschließen ist. Die einzige äußere mechanische Beanspruchung der Fügeteile ergibt sich aus dem Fügedruck.

Diese Veröffentlichung wurde von einer Gruppe erfahrener Fachleute in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit erstellt und wird als eine wichtige Erkenntnisquelle zur Beachtung empfohlen. Der Anwender muss jeweils prüfen, wie weit der Inhalt auf seinen speziellen Fall anwendbar und ob die ihm vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung des DVS und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

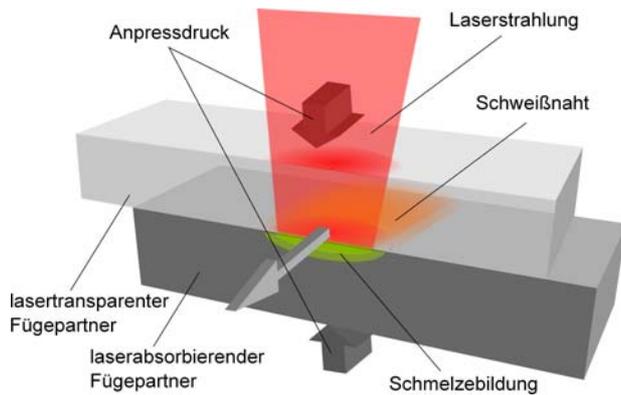


Bild 1. Prinzipielle Darstellung des Durchstrahlschweißens.

2.2 Stumpfschweißen

Beim Stumpfschweißen sind zwei Verfahrensvarianten möglich:

- I) Die Bauteile werden, wie beim Laserstrahlschweißen von Metallen, im Bereich der Fügezone in engen Kontakt gebracht. Die Laserstrahlung wird in die Stoßfläche eingebracht und über die gesamte Materialdicke absorbiert, sodass beide Stoßflächen aufschmelzen und sich nach ausreichender Erwärmung stumpf verbinden. Eine Herausforderung ist die unterschiedliche Energiedichteverteilung durch die Absorption (siehe Abschnitt 3.1) über die Bauteildicke, die zu einem ungleichmäßigen Aufschmelzen und zum Aufbau von Spannungen führen kann.
- II) Bei der zweiten Variante ist der grundsätzliche Verfahrensablauf vergleichbar mit dem des Heizelementstumpfschweißens. Die Unterteilung in eine Erwärm-, eine Umstell- und eine Fügephase (siehe Richtlinie DVS 2215-1) ist ebenfalls möglich. Der wesentliche Unterschied zwischen den Verfahren ist die Erwärmungsphase. In dieser Phase werden die Fügezonen berührungslos mittels Laserstrahlung erwärmt.

3 Werkstoffeigenschaften

3.1 Optische Eigenschaften von Kunststoffen – Transmission, Reflexion, Absorption, Streuung

Die strahlungsoptischen Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen hängen neben der Wellenlänge der Laserstrahlung entscheidend von der chemischen Zusammensetzung und der morphologischen Struktur des Werkstoffs sowie zum Teil auch von vorgelagerten Verarbeitungsschritten ab. Die Oberflächenreflexion liegt bei allen ungefüllten Kunststoffen in einem Bereich von 5 bis 10 %. Abhängig von der optischen Eindringtiefe (Bild 2) ist für die Erwärmung der Fügezone die Absorption der eingekoppelten Strahlung in der Polymermatrix und in die Zusatzstoffe verantwortlich. Sie wird beeinflusst durch

- die Wellenlänge der auftretenden Laserstrahlung,
- die Art des Kunststoffes (makromolekularer Aufbau),
- die Art, Menge und Verteilung von Zusatzstoffen (z. B. Farbstoffe, Flammschutzmittel, Füll- und Verstärkungsstoffe).

Während z. B. bei sämtlichen metallischen Werkstoffen die Absorption der infraroten Laserstrahlung direkt in der Oberfläche erfolgt, sind bei Kunststoffen auch optische Eindringtiefen bis zu mehreren Millimetern möglich. Da bei Kunststoffen die strahlungsoptischen Materialeigenschaften durch ihren makromolekularen Aufbau bestimmt werden, sind die Wechselwirkungen zwischen der Laserstrahlung und dem Kunststoff neben der Wellenlänge der Strahlung auch von der Struktur und der Temperatur des Werkstoffes abhängig. Kunststoffe weisen sowohl Wellenlängenbereichen hoher Transmission als auch hoher Absorption auf.

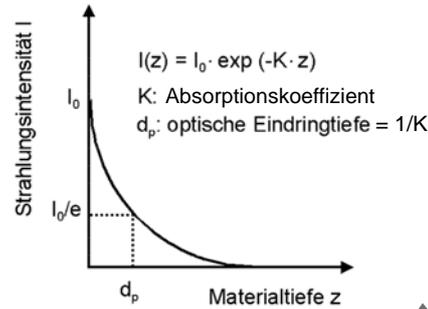


Bild 2. Änderung der Strahlungsintensität beim Eindringen des Laserstrahles in den Kunststoff.

Aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit der strahlungsoptischen Materialeigenschaften ist das Erwärmungsverhalten der Kunststoffe in Abhängigkeit der verwendeten Laserstrahlung zu betrachten. Die kurzwellige Strahlung von Festkörperlaser (z. B. Nd:YAG-Laser, Wellenlänge $\lambda = 1.064 \text{ nm}$) und Hochleistungsdiodenlasern ($\lambda = 800 \text{ bis } 1.000 \text{ nm}$) dringt in nahezu alle Kunststoffe ohne Zusatzstoffe bis in den Millimeterbereich ein (Volumenabsorption). Für Dioden- und Fasenlaser im Wellenlängenbereich $\lambda = 1.200 \text{ bis } 2.000 \text{ nm}$ weisen viele Kunststoffe bereits eine merkliche Eigenabsorption auf. Die von CO_2 -Lasern ($\lambda = 10.600 \text{ nm}$) emittierte langwellige Strahlung wird dagegen von allen Kunststoffen, unabhängig von deren Zusatzstoffgehalt in oberflächennahen Schichten, vollständig absorbiert (Oberflächenabsorption). Daher beschränkt sich das Einsatzgebiet des CO_2 -Lasers beim Schweißen von Kunststoffen auf die Bearbeitung von Kunststofffolien oder das Stumpfschweißen (vgl. II, Abschnitt 2.2).

3.2 Grundwerkstoffe

Amorphe Thermoplaste absorbieren bei bestimmten Wellenlängen nur einen geringen Anteil der einfallenden Laserstrahlung, sodass ihnen theoretisch optische Eindringtiefen von über 100 mm erreicht werden können. Dagegen unterscheiden sich die optischen Eigenschaften teilkristalliner Thermoplaste deutlich von denen der amorphen. Die dort vorhandenen kristallinen Überstrukturen (z. B. Sphärolithe) bewirken eine mehrfach ungerichtete Reflexion der Laserstrahlung (Streuung), wodurch sich der optische Weg der Strahlung im Material verlängert. Gleichzeitig wird dadurch der Laserstrahl aufgeweitet und die Intensität nimmt ab. Mit zunehmendem Kristallisationsgrad bzw. bei gleichem Kristallisationsgrad mit abnehmender Sphärolithgröße steigt der optische Weg der Strahlung und damit der Absorptionsgrad. Die Reflexion von IR-Strahlung durch den Werkstoff selbst ist bei teilkristallinen Thermoplasten größer als bei amorphen.

3.3 Additive

Zusatzstoffe können die optischen Eigenschaften der Grundwerkstoffe weitreichend beeinflussen. Insbesondere sind hier eingelagerte Fremdpolymere, Füll- und Verstärkungsstoffe, Flammschutz- und Farbstoffe zu nennen. Durch gezielte Modifikation lassen sich die strahlungsoptischen Eigenschaften der Polymerwerkstoffe in bestimmten Grenzen an die jeweiligen Anforderungen anpassen.

So sind geringfügige Zusätze von Verarbeitungshilfen (Nukleierungsmittel, Stabilisatoren, Schmiermittel, u. a.) in der Lage, die strahlungsoptischen Eigenschaften zu verändern – direkt oder indirekt durch Beeinflussung z. B. der Kristallinität.

Die Streuwirkung von Partikeln und somit die Abnahme der Eindringtiefe der Strahlung in das Polymer ist neben der Konzentration der streuenden Partikel vom Verhältnis des Partikeldurchmessers zur Wellenlänge abhängig. Liegt die Wellenlänge der Strahlung im Bereich der Partikelgröße, so wird die Strahlung durch die Partikel vergleichsweise stark gestreut.

Glasfasern und -kugeln selbst sind im relevanten Wellenlängenbereich durchlässig für die Strahlung, sodass diese nicht absorbiert wird. Aufgrund ihrer Form wirken sie aber als beugende und brechende Struktur.