

**Inhalt:**

- 1 Vorwort
- 2 Ziele der Messung
- 3 Begriffsdefinition
- 4 Messprinzipien
  - 4.1 Leistungsmessung
  - 4.2 Photometrische Messung
  - 4.3 Spektrale Messung
  - 4.4 Bewertung der Messprinzipien
- 5 Prüfkörperbedingte Einflüsse
  - 5.1 Wanddicke
  - 5.2 Oberflächenstruktur
  - 5.3 Morphologie
  - 5.4 Wassergehalt
  - 5.5 Materialtyp
  - 5.6 Zusatzstoffe
  - 5.7 Herstellbedingungen (Spritzgießparameter)
  - 5.8 Probertemperatur
- 6 Messtechnisch bedingte Einflussfaktoren
- 7 Literaturhinweise

**1 Vorwort**

Die optischen Eigenschaften der Thermoplaste bestimmen ihre Wechselwirkung mit der Laserstrahlung und damit die definierte räumliche und zeitliche Energieeinbringung und -umwandlung. Die optischen Eigenschaften der Thermoplaste sind herstellungs-, material-, wellenlängen- und temperaturabhängig.

Die relevanten Prozessgrößen sind:

- Reflexionsgrad R
- Transmissionsgrad T
- Absorptionsgrad A

Der durch Reflexion am und Absorption im laserstrahltransparenten Fügepartner verursachte Strahlungsflussverlust führt zu einer verringerten Laserstrahlungsintensität auf dem absorbierenden Fügepartner. Entsprechend der Energieerhaltung kann aus dem Transmissionsgrad T und dem Reflexionsgrad R der Absorptionsgrad A nach  $A = 1 - T - R$  bestimmt werden. Für die Einsatzfähigkeit des laserstrahltransparenten Fügepartners für das Laserdurchstrahlsschweißen sowie die im Fügebereich zur Verfügung stehende Laserstrahlleistung zu bestimmen ist die Messung des Transmissionsgrades T notwendig.

**2 Ziele der Messung**

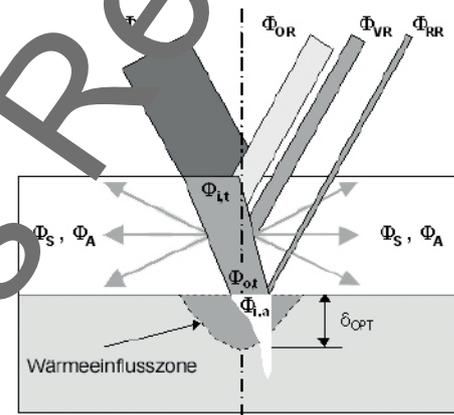
- Bestimmung des Transmissionsgrades T
- Die Kenntnis des spektralen Verhaltens liefert eine Entscheidungshilfe bei
  - Auswahl der Laserstrahlwellenlänge und damit der Laserstrahlquelle
  - Auswahl der Dicke des laserstrahltransparenten Fügepartners
  - Auswahl der Werkstoffe
  - Auswahl zu verwendender spektral wirkender Zusätze (Farbmittel)
  - Bestimmung der benötigten Laserstrahlleistung

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.

**3 Begriffsdefinition**

Eine elektromagnetische Welle, die auf ein homogenes Medium trifft kann entweder reflektiert, transmittiert oder absorbiert werden. Die physikalischen Prozesse Reflexion, Transmission und Absorption werden dabei durch Kennzahlen (Grade, Koeffizienten) beschrieben, die im Allgemeinen material-, wellenlängen- und temperaturabhängig sind. Bei optisch inhomogenen Medien (z.B. durch Zusatzstoffe wie Glasfasern) kommt noch die Streuung der einfallenden Strahlung im Medium hinzu. Die Grade beziehen sich stets auf eine bestimmte Materialdicke. Die Koeffizienten sind hingegen dickene unabhängige Kenngrößen.

Trifft elektromagnetische Strahlung ( $\Phi_0$ ) auf einen Thermoplasten (Bild 1) wird ein Teil der Strahlung ( $\Phi_{OR}$ ) an der Oberfläche reflektiert. Der restliche Strahlungsfluss tritt in den Werkstoff ( $\Phi_{i,t}$ ) ein, kann dieser durch Volumenreflexion ( $\Phi_{VR}$ ,  $\Phi_S$ ) und Rückreflexion ( $\Phi_{RR}$ ) an Thermoplasten wieder verlassen oder in diesem verschluckt und absorbiert ( $\Phi_A$ ,  $\delta_{OPT}$ ) werden. Bild 1 stellt die Ergebnisse schematisch dar.



**Bild 1.** Schematische Darstellung der elektromagnetischen Strahlungsflüsse beim Laserdurchstrahlsschweißen.

- $\Phi_0$  = einfallender Strahlungsfluss
- $\Phi_{OR}$  = an der Oberfläche reflektierter Strahlungsfluss
- $\Phi_{VR}$  = im Volumen reflektierter, gestreuter Strahlungsfluss (innere Streuung)
- $\Phi_{RR}$  = an der Grenzschicht reflektierter Strahlungsfluss
- $\Phi_S$  = gestreuter, nicht austretender Strahlungsfluss (innere Streuung)
- $\Phi_A$  = im transparenten Fügepartner absorbiertes Strahlungsfluss
- $\Phi_{i,t}$  = in den transparenten Fügepartner eintretender Strahlungsfluss
- $\Phi_{o,t}$  = aus dem transparenten Fügepartner austretender Strahlungsfluss
- $\Phi_{i,a}$  = in den absorbierenden Fügepartner eintretender Strahlungsfluss
- $\delta_{Opt}$  = optische Eindringtiefe

Der einfallende Strahlungsfluss  $\Phi_0$  kann monochromatisch sein, d. h. er korrespondiert zu nur einer Wellenlänge (einfarbig), oder spektral verbreitert sein, d. h. mehr als eine Wellenlänge bilden ein Wellenlängenspektrum.

Die Größen, die das optische Verhalten charakterisieren, können spektroskopisch bestimmt werden.

**Reflexionsgrad:**  $R = \Phi_R / \Phi_0 = (\Phi_{OR} + \Phi_{VR} + \Phi_{RR}) / \Phi_0$   
Verhältnis von reflektiertem zu einfallendem Strahlungsfluss

Der Reflexionsgrad ist der Anteil des auftreffenden Strahlungsflusses, der von einem Bauteil reflektiert wird. Normalerweise wird er für den senkrechten Lichteinfall angegeben. Die Reflexion kann durch die Fresnel-Gleichungen beschrieben werden.

**Transmissionsgrad:**  $T = \Phi_{o,t} / \Phi_0$   
Verhältnis von transmittiertem zu einfallendem Strahlungsfluss

Der Transmissionsgrad ist der Anteil des einfallenden Strahlungsflusses, der ein transparentes Bauteil komplett durchdringt. Normalerweise wird er für senkrechten Lichteinfall angegeben.

Der Transmissionskoeffizient ist die Menge des durch eine Längeneinheit in einem teiltransparenten Medium direkt transmittierten Lichtes, im Verhältnis zu der Menge, die die gleiche Strecke durch ein Vakuum zurücklegen würde.

**Absorptionsgrad:**  $A = 1 - R - T$   
Verhältnis von absorbiertem zu einfallendem Strahlungsfluss

Die Absorption ist die Aufnahme von Strahlungsenergie an einer Oberfläche oder in einem Medium, verursacht durch die Umwandlung in eine andere Energieform, normalerweise Wärme, durch die Wechselwirkung des Strahlungsfeldes mit der Materie. Das Verhältnis zwischen absorbiertem Strahlungsfluss zum einfallenden Strahlungsfluss wird Absorptionsgrad oder auch Absorptionsfaktor genannt. Die Einheit des Absorptionsgrads ist Prozent (%) oder ein Faktor zwischen 0 und 1.

Den Anteil des Lichtes, der pro Einheit der Distanz in einem teiltransparenten Medium absorbiert wird, beziffert der Absorptionskoeffizient. Die Einheit des Absorptionskoeffizienten ist *Anteile pro Meter* (1/m).

Entsprechend der Energieerhaltung gilt:  $R + T + A = 1$

Die optische Eindringtiefe  $\delta_{OPT}$  des absorbierenden Fügepartners ist die Kopplungsgröße des elektromagnetischen Feldes mit der Materie. Sie ist ein Maß für die räumliche Ausprägung der Wechselwirkung (Absorption) und damit für die sich durch Energieumwandlung einstellende Energiedichteverteilung. Die optische Eindringtiefe  $\delta_{OPT}$  entspricht der Materialtiefe, bei der der ursprüngliche Strahlungsfluss auf  $1/e = 36,78\%$  abgefallen ist.

Ein Thermoplast wird bei einer bestimmten Laserstrahlwellenlänge als laserstrahltransparent bezeichnet, wenn durch ihn eine ausreichende Menge der Laserstrahlung hindurch geht und er als „transparenter Fügepartner“ beim Laserstrahlschweißen verwendet werden kann. Entsprechend wird ein Thermoplast bei einer bestimmten Laserstrahlwellenlänge als laserstrahlabsorbierend bezeichnet, wenn durch ihn eine ausreichende Menge der Laserstrahlung in Wärme umgewandelt wird, so dass er als „absorbierender Fügepartner“ beim Laserstrahlschweißen verwendet werden kann.

Ein Laserstrahl wird in erster Linie durch die Wellenlänge der Laserstrahlung, die Leistungsdichteverteilung und die Laserstrahlleistung charakterisiert. Die Laserstrahlleistung pro Flächeneinheit wird als Intensität bezeichnet.

#### 4 Messprinzipien

##### 4.1 Leistungsmessung

Die Ermittlung des Transmissionsgrades T mittels Laserleistungsmessgeräten geschieht über die Verhältnisbildung zweier Laserleistungsmessungen. Zunächst wird die Laserstrahlleistung  $P_0$  des Laserstrahles ohne Probe bestimmt. Anschließend wird die Laserstrahlleistung  $P_P$  nach Durchgang des Laserstrahles durch die Probe gemessen. Durch Division des Leistungswertes

mit Probe durch den ohne Probe erhält man den Transmissionsgrad  $T = P_P / P_0$ . Dabei gilt der bestimmte Transmissionsgrad nur für die Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung.

##### 4.2 Photometrische Messung

Die Ermittlung des Transmissionsgrades T mittels photometrischer Messgeräte geschieht über die Verhältnisbildung zweier elektrischer Signale, die durch unterschiedliche Strahlungsflüsse erzeugt werden. Der Strahlungsfluss von Glühlampen oder Leuchtdioden, die in einem schmalen Wellenlängenbereich emittieren, trifft auf einen photometrischen Detektor, der ein elektrisches Signal entsprechend dem Strahlungsfluss erzeugt. Die Wellenlängenselektion bzw. die Einschränkung des Wellenlängenbereiches kann durch optische Filter geschehen.

Die Division des Signalwertes  $S_P$  mit Probe durch dem Signalwert  $S_0$  ohne Probe im Strahlengang liefert den Transmissionsgrad  $T = S_P / S_0$ . Dabei ist der bestimmte Transmissionsgrad T ein Mittelwert über den verwendeten Wellenlängenbereich. Der Strahlungsfluss der verwendeten Messstrahlung ist sehr viel geringer als der Strahlungsfluss der zum Schweißen verwendeten Laserstrahlung.

##### 4.3 Spektrale Messung

In einem Spektralphotometer wird über Prismen oder Beugungsgitter das Licht nach Wellenlängen zerlegt. Über Blenden wird die Probe nacheinander mit den verschiedenen Wellenlängen des gewählten Bereiches bestrahlt. Ein hinter der Probe befindlicher Detektor erfasst die Lichtmenge der transmittierten Strahlung nach Wellenlängen aufgelöst.

Bei häufig verwendeten Zweistrahl-Spektralphotometern wird der Strahlungselement, wobei ein Teil direkt auf einen Detektor trifft, während der andere durch die Probe strahlt. Hierbei entfällt eine Referenzmessung. Die gemessenen Werte können direkt für jede Wellenlänge ins Verhältnis gesetzt werden und es ergibt sich der nach Wellenlängen aufgelöste Transmissionsgrad der Probe, das Transmissionspektrum  $T_\lambda = P_{P,\lambda} / P_{0,\lambda}$ .

Zum Einsatz kommen Geräte im kurzwelligeren Bereich mit der Bezeichnung UV-VIS-NIR-Spektralphotometer, die einen Wellenlängenbereich von etwa 180 nm bis 3000 nm abdecken können. Im Wellenlängenbereich zwischen 700 nm und 25000 nm kommen sogenannten FTIR-Spektralphotometer zum Einsatz.

Mit Hilfe von Spektralphotometern kann häufig neben dem Transmissionsgrad T auch der Reflexionsgrad R gemessen werden.

##### 4.4 Bewertung der Messprinzipien

Die aufgeführten Messprinzipien eignen sich unterschiedlich gut, je nachdem, welche Aussage durch die Messung getroffen werden soll.

Für einen qualitativen Vergleich verschiedener Proben untereinander eignen sich alle beschriebenen Verfahren gleich gut. Dieser Vergleich erlaubt eine Auswahl der zu schweißenden Materialien und eine bauteil- oder chargenbezogenen Qualitätskontrolle. Er liefert des Weiteren Hinweise für die Dimensionierung der Fügeteile.

Da die photometrische Messung einen Wellenlängenbereich berücksichtigt, ist keine eindeutige Aussage bezüglich des Transmissionsgrades bei einer bestimmten Wellenlängen möglich.

Die anderen Verfahren erlauben die Angabe des Transmissionsgrades bei einer bestimmten Wellenlänge und damit die Auswahl der Laserquelle.

Sofern der zum Schweißen erforderliche Leistungsbedarf aus Schweißversuchen bekannt ist, erlaubt die Leistungsmessung als einziges Messprinzip, die Leistungsdichte beim Schweißen direkt abzuschätzen. Diese Abschätzung ist bei den übrigen Messprinzipien nur bei Kenntnis des Transmissionskoeffizienten möglich. Für eine endgültige Aussage zur Schweißbarkeit sind allerdings Schweißversuche erforderlich.