

Ersetzt Ausgabe Dezember 1988

Das Merkblatt enthält Anleitungen zur einheitlichen und vergleichbaren Prüfung von Parametern für das Laserstrahlschweißen. Eine Reihe dieser Parameter sind ausreichend definiert. Für die Prüfung anderer wichtiger Parameter werden Empfehlungen gegeben.

Die mit diesem Merkblatt gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse können bei einer späteren Normung von Abnahmeprüfungen für Laserstrahlschweißmaschinen mitverwertet werden.

Das Merkblatt ist in Zusammenarbeit mit Herstellern und Anwendern von Laserstrahlschweißmaschinen sowie Forschungsinstituten aufgestellt worden.

**Inhalt:**

- 1 Anwendungsbereich
- 2 Kenngrößen und Maßeinheiten
- 3 Zweck der Prozesssicherung
- 4 Voraussetzungen für einen überprüfbaren Maschinenbetrieb
- 5 Prüfen der wichtigsten Schweißparameter
- 6 Indirekte Überprüfung der Schweißparameter
- 7 Schrifttum

**1 Anwendungsbereich**

Das Merkblatt gilt für das Prüfen von wichtigen Schweißparametern bei Anwendung des Schmelzschweißens von metallischen Werkstoffen mit cw-Lasern.

Schweißparameter sind:

- Strahlleistung am Ort des Werkstücks (Abschnitt 5.1)
- Durchmesser des fokussierten Laserstrahls (Fokusedurchmesser) (Abschnitt 5.2)
- Fokustiefe (Rayleighlänge) des Laserstrahls (Abschnitt 5.3)
- Strahlkennzahl der Laserstrahlquelle (Abschnitt 5.4)
- Strahlsymmetrie (Elliptizität) (Abschnitt 5.5)
- Intensitätsverteilung (Leistungsflussdichte-Verteilung) in der Fokusebene und im Bereich der Fokustiefe (Abschnitt 5.6)
- Polarisation der Strahlung (Abschnitt 5.7)
- Schweißgeschwindigkeit (Abschnitt 5.8)
- Positionierung des Fokuspunktes (Abschnitt 5.9)
- Gasstrom zur Plasmabeeinflussung (Prozessgas) (Abschnitt 5.10)
- Schutzgas (Abschnitt 5.11)

**2 Kenngrößen und Maßeinheiten**

Im Folgenden werden die in diesem Merkblatt enthaltenen Kenngrößen und Maßeinheiten genannt:

Strahlleistung	P	kW
Intensität (Leistungsflussdichte)	I	W/cm <sup>2</sup>
Strahldurchmesser	d <sub>s</sub>	mm
Fokusedurchmesser	d <sub>f</sub>	mm
Fokusradius	r <sub>f</sub>	mm
Fokustiefe (Rayleighlänge)	Z <sub>f</sub>	mm
Schweißgeschwindigkeit	v <sub>s</sub>	mm/s

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.

Strahldivergenz	α <sub>s</sub>	mrad
Strahlparameterprodukt	SPP	mm · mrad
Strahlqualität	Q	–
Strahlkennzahl	K	–
Laserwellenlänge	λ	µm
Fokussierzahl	$F = \frac{f}{d_s}$	–
Brennweite	f	mm
Ausbreitungsrichtung	z	mm

**3 Zweck der Prozesssicherung**

Die in Abschnitt 5 festgelegten Kenngrößen gehören zu den wichtigsten Schweißparametern für das Laserstrahlschweißen. Mit dem Prüfen der Schweißparameter ist nachzuweisen, ob die Schwankungen dieser Kenngrößen innerhalb zulässiger Grenzen liegen.

**4 Voraussetzungen für einen überprüfbaren Maschinenbetrieb**

Die Laserstrahlschweißmaschine ist so aufzustellen und zu installieren, dass der Ablauf des Schweißvorganges durch äußere Einflüsse (zum Beispiel mechanische Schwingungen, Luftverunreinigungen) nicht gestört wird. Die Anschlussbedingungen bzw. Betriebsanleitungen der Maschinenhersteller sind einzuhalten.

**5 Prüfen der wichtigsten Schweißparameter**

Das Prüfen der Kenngrößen soll am Ort des Werkstücks vorgenommen werden.

Die nachstehenden Prüfungen können sowohl zum Zeitpunkt der Abnahme der Laserstrahlschweißmaschine als auch zur Wartung und Überprüfung dieser Maschine im Laufe der Fertigung durchgeführt werden.

**5.1 Strahlleistung am Ort des Werkstücks**

Strahlführung und Strahlformung verursachen durch Absorption Leistungsverluste. Im Neuzustand der Komponenten sind diese Verluste stabil. Im weiteren Einsatz kann es durch Kontamination zu einem Anstieg der Leistungsverluste kommen. Deshalb ist es erforderlich, die Strahlleistung am Werkstück zu messen.

Da die meisten der dafür einsetzbaren Geräte nicht im fokussierten Strahl gemessen werden können, ist im hinreichenden Abstand vom Fokuspunkt unterhalb der Fokussieroptik zu messen.

Die notwendige Leistungsstabilität ist abhängig von der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , vom Fokussdurchmesser  $d_f$  und den Prozessanforderungen.

**5.2 Durchmesser des fokussierten Laserstrahls (Fokussdurchmesser)**

Als Bezugsgröße für den Fokussdurchmesser sowie für den Strahldurchmesser an einem beliebigen Ort wird die Strahlquerschnittsfläche verwendet, in welcher 86% ( $1 - \frac{1}{e^2} = 0,86$ ) der Strahlleistung enthalten sind. Bei nicht radialsymmetrischer Strahlgeometrie sind der minimale und maximale Strahldurchmesser im Fokus anzugeben.

Der Fokuspunkt ist der Ort (Fokuslage), an dem der Strahl die kleinste Strahlquerschnittsfläche hat.

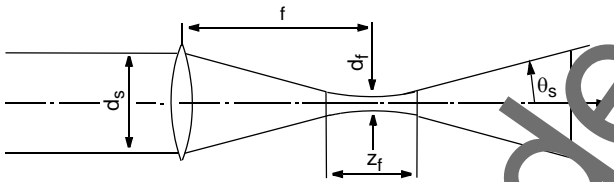
Der Fokussdurchmesser sollte analog der Strahlleistung in möglichst engen Grenzen konstant bleiben.

**5.3 Fokustiefe (Rayleighlänge) des Laserstrahls**

Die Fokustiefe oder auch Rayleighlänge  $z_f$  ist der Abstand zwischen den beiden Strahlquerschnittsflächen, die doppelt so groß sind wie die Strahlquerschnittsfläche im Fokuspunkt, Bild 1. Bei radialsymmetrischen Strahlverteilungen hat sich der Fokussdurchmesser an den Grenzen der Fokustiefe um den Faktor  $\sqrt{2}$  vergrößert.

Die Fokustiefe ist besonders für die maximal mögliche Schweißtiefe (Schmelzzoneentiefe) und die Prozessstabilität bei toleranzbedingten Bauteilhöhenschwankungen von Bedeutung.

Die Angabe einer zulässigen Schwankungsbreite für die Fokustiefe ist nicht erforderlich, da sich diese aus dem Fokussdurchmesser und der Fokuslage ergibt.



**Bild 1.** Darstellung der geometrischen Kenngrößen zur Fokussierung von Laserstrahlen.

**5.4 Strahlkennzahl der Laserstrahlquelle**

Die einzelnen Strahlparameter sind voneinander nicht unabhängig wählbar.

Für den praktischen Gebrauch hat sich bei Lasern die Angabe der Strahlkennzahl K bewährt.

Je größer diese Kennzahl K ist, desto besser ist die Strahlqualität. Der größtmögliche Wert ist 1 und wird bei einer Gaußschen Intensitätsverteilung (TEM<sub>00</sub>) erreicht. Die Kennzahl steht in einem direkten Zusammenhang mit der Art der Intensitätsverteilung im Strahl. Da aus der Art der Strahlverteilung bei Hochleistungslasersystemen nur selten eine exakte Kennzahl angegeben werden kann, empfiehlt sich eine experimentelle Ermittlung. Hierzu müssen in der Regel nur zwei Größen gemessen werden (dies gilt insbesondere für rotationssymmetrische Intensitätsverteilungen):

- der Durchmesser des fokussierten Laserstrahls  $d_f$ ,
- der Durchmesser des unfokussierten Laserstrahls  $d_s$  am Ort der fokussierenden Optik:

$$K = \frac{4}{\pi} \cdot f \cdot \frac{1}{d_s \cdot d_f}$$

Die Größe  $F = f/d_s$  wird als „F-Zahl“ = Fokussierzahl bezeichnet. Der Wert  $1/F$  entspricht dem Öffnungsverhältnis.

Die Ermittlung der Strahlkennzahl K über die Messung der Fokustiefe ist ebenfalls möglich:

$$K = \frac{2\lambda \cdot z_f}{\pi d_f^2}$$

Während die Strahlkennzahl in Kombination mit der Strahlleistung das Potential einer Laserstrahlquelle beschreibt, wird das Bearbeitungsergebnis durch die Fokusparameter (die Fokussdurchmesser, Fokustiefe und Strahlleistung) bestimmt.

Durch die Angabe der Strahlkennzahl K, der Fokussierzahl F und der Strahlleistung P sind die Laserstrahlparameter (eine Schweißung eindeutig beschrieben (gilt für rotationssymmetrische Strahlen).

Zur Erzielung eines großen Tiefschweißwärters – insbesondere bei Blechdicken ab 3 mm – ist eine möglichst große Kennzahl K anzustreben. Für den Feinblechbereich bis 3 mm spielt die Strahlqualitätskennzahl eher eine untergeordnete Rolle. Hier hat die Form der Intensitätsverteilung über dem Strahlquerschnitt – der sogenannte Lasermode – einen größeren Einfluss auf das Schweißergebnis.

Für Festkörperlaser wird meist statt der Strahlkennzahl K das Strahlparameterprodukt SPP als Produkt aus Fokussradius und halbem Fernfeldwinkel angegeben. Das SPP beschreibt letztendlich das Divergenzverhalten des Lasers nach dem Austritt aus dem Lichtleiterkabel LLK in Abhängigkeit vom Kerndurchmesser der Faser. Es berechnet sich als dem Produkt von Radius der Strahltaile bzw. des auskoppelnden LLK und dem halben Divergenzwinkel.

Konventionelle laser- oder diodengepumpte Festkörperlaser haben mit 2 mm · mrad ein um einen Faktor 5 größeres SPP als die Festkörperlaser vom Typ Faser- oder Scheibenlaser.

Es gilt folgender Zusammenhang zwischen der Strahlkennzahl K und dem SPP:

$$SPP = \frac{1}{K} \cdot \frac{\lambda}{\pi}$$

Mit handelsüblichen Messgeräten kann die Strahlkennzahl K und das Strahlparameterprodukt SSP ermittelt werden.

**5.5 Strahlsymmetrie (Elliptizität)**

Bei elliptischer bzw. nicht rotationssymmetrischer Strahlverteilung ist die Lage von minimalem und maximalem Strahldurchmesser bezogen auf die Schweißrichtung eine das Schweißergebnis charakterisierende Kenngröße. Besonders beim Schweißen mit bewegten Optiken und beim Schweißen in unterschiedlichen Richtungen ist die Lage der Strahlverteilung an die momentane Schweißrichtung anzupassen.

**5.6 Intensitätsverteilung (Leistungsflussdichte-Verteilung) in der Fokusebene und im Bereich der Fokustiefe**

Die Intensitätsverteilung ist mit der Verteilung der Leistungsflussdichte identisch. Sie wird in W/cm<sup>2</sup> angegeben. Änderungen der maximalen Intensität sowie der Intensitätsverteilung in der Fokusebene als auch im Bereich der Fokustiefe können das Schweißergebnis beeinflussen. Ein Wert für zulässige Abweichungen kann zurzeit nicht angegeben werden. Eine Änderung der Intensitätsverteilung hat in der Regel eine Änderung der Kennzahl zur Folge und wird somit über die Größen Fokussdurchmesser und Fokustiefe mit erfasst.

**5.7 Polarisierung der Strahlung**

Die Laserstrahlung eines CO<sub>2</sub>-Lasers ist im Unterschied zu den Festkörperlaser meist polarisiert. Die Richtung der Strahlungspolarisation, bezogen auf die Schweißrichtung, kann besonders bei relativ geringen Strahlungsintensitäten und bei größeren Schweißgeschwindigkeiten die Schweißtiefe beeinflussen. Der Grad der Polarisation und die Polarisationsrichtung sind zu kennzeichnen und gegebenenfalls zu kontrollieren.

Beim Konturenschweißen mit CO<sub>2</sub>-Lasern empfiehlt es sich, mit zirkularpolarisierter Laserstrahlung zu arbeiten.