

# Redundanzmöglichkeiten zwischen CO<sub>2</sub>-Laser- und Festkörperlaseranlagen in der industriellen Fertigung (REDCOFAL)

Aurin, A.; Brozek, J., Keitel, S.  
SLV Halle GmbH, Köthener Straße 33a, 06118 Halle (Saale)

## Kurzfassung

CO<sub>2</sub>-Laser prägten die Fertigungsverfahren Schneiden und Schweißen über mehr als 25 Jahre. Neue Bearbeitungsmaschinen werden jedoch seit geraumer Zeit alternativ mit NIR-Lasern, zumeist Faserlasern, ausgerüstet. Weitere Laserquellen werden das Spektrum in den nächsten Jahren erweitern.

Im Rahmen des Forschungsprojekts REDCOFAL sollte eine Methode ermittelt werden, welche den mathematischen Brückenschlag zwischen den Lasergenerationen bildet und den Anwendern eine unproblematische Weiterführung ihrer Applikationen ermöglicht.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die Definition und Erfassung von notwendigen Parametern, welche in eine rechnerische Methode einfließen sollen, um Schweißnahtgeometrien abzuleiten. Den Ansatz für die Methode liefert die physikalische Beschreibung des Tiefschweißeffekts. Diese führte in weiterer Betrachtung zum neu definierten Parameter Nutzleistung bzw. zur Strahleffizienz. Die Untersuchung offenbarte im Fortlauf eine Vielzahl von Abhängigkeiten zwischen den Laserstrahl- und Materialkennwerten sowie den Prozessparametern und konnte diese zur mathematischen Bestimmung der Schweißnahtbreite und -tiefe nutzen.

## 1. Einleitung

Über mehrere Jahrzehnte stellte der CO<sub>2</sub>-Laser die Strahlquelle erster Wahl in der Laserstrahlmaterialbearbeitung, insbesondere dem Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen, dar. In den letzten Jahren wurden jedoch die Festkörperlaser kontinuierlich bezüglich ihres Leistungsvermögens, ihrer Effizienz und ihrer Strahlqualität verbessert. Dieser Lasertyp umfasst die Nd:YAG-, Scheiben und Faserlaser, welche im nahen Infrarotbereich ( $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ ) emittieren, wodurch die Absorption der Laserstrahlung im metallischen Werkstoff im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung (fernes Infrarot,  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ) erheblich gesteigert wird. Hierbei sind eminente Produktivitätssteigerungen in der Materialbearbeitung möglich. Der erhöhte Wirkungsgrad der Festkörperlaser spricht aus betriebswirtschaftlicher Sicht für diese Art der Strahlquelle. Aus diesem Grund werden bestehende Laserschweißanlagen für metallische Werkstoffe teilweise umgerüstet bzw. neue Anlagen mit diesem Lasertyp ausgestattet.

Mit dem öffentlich geförderten EFRE-Forschungsvorhaben REDCOFAL sollte eine wissenschaftlich fundierte Methode zur Übertragung von Schweißparametern von CO<sub>2</sub>-Lasern auf moderne Faserlaser entwickelt werden. Die mathematische Simulation der Schweißprozesse stand hierbei im Mittelpunkt der Untersuchung. Voraussetzung dafür war das Detektieren und die Erfassung der prozessrelevanten Parameter.

Mit der angestrebten Methode wäre eine zeitsparende und kostengünstige Übertragung vorhandener Schweißtechnologien von CO<sub>2</sub>-Lasern auf moderne Faserlaser möglich. Ein mit dem Wechsel der Strahlquellen verbundener Produktionsausfall würde erheblich reduziert. Zudem wird die Anlagenredundanz für die schweißtechnische Fertigung im Fall des Ausfalls oder anderweitiger Nichtverfügbarkeit einer Produktionsanlage drastisch erhöht. Relevant wird diese Problematik für sehr viele KMU mit CO<sub>2</sub>-Lasern der ersten Generationen, die mittlerweile über 20 Jahre alt sind.

## 2. Durchführung

### 2.1 Randbedingungen

Für die Entwicklung einer derartigen Methode stand zunächst die Erstellung einer Datenbank mit praktisch ermittelten Parametern im Mittelpunkt. Zum einen wurde die Strahlqualität gemäß DIN EN ISO 11146-1:2005 [1] ausgewählter Laserquellen bei 3 Leistungsstufen aufgezeichnet. Dafür kam das marktetaillierte Messgerät FocusMonitor FM+ von PRIMES zum Einsatz. Dieses nutzt eine achsengeführte rotierende Messspitze, welche fokussnahe Intensitätsprofile in definierten Schnittebenen entlang der Strahlachse aufnimmt. Anhand der normkonformen Methode der 2. Momente wurden die relevanten Laserparameter Fokussdurchmesser  $2\omega_F$ , Rohstrahldurchmesser  $2\omega_0$ , Rayleighlänge  $z_R$ , Beugungsmaßzahl  $M^2$  und Strahlparameterprodukt SPP abgeleitet.

Zum anderen wurden reale Laserschweißungen an ebenen Laseranlagen bei denselben Leistungsstufen vollzogen. Kreissymmetrische Proben des Durchmessers 90 mm und der Stärke 20 mm aus den Werkstoffen S235JR EN 10025 (1.0038) und X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) wurden auf einem Drehfutter auf einer konstanten Drehgeschwindigkeit gehalten. Der Laserstrahl wurde in Fokusslage 0 (Fokus auf Oberfläche) derart in Position gebracht, dass die erreichte Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  für alle Proben bei 44 mm/s (2,64 m/min) lag. Die resultierenden einlagigen Blindschweißungen ohne Schutzgas wurden anschließend metallografisch ausgewertet. Der Einfachheit halber wurden lediglich die Schweißnahtbreite und -tiefe dimensioniert. Die Laserparameter und Schweißnahtgeometrien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

### 2.2 Mathematische Aufarbeitung der Daten

Die Weiterverarbeitung der Datengrundlagen sollte einen weiteren Arbeitsschritt umfassen. Hierbei sollten die Intensitätsprofile der Laserstrahlen in Fokusslage eine Rolle spielen. Für diese musste eine stetige Funktion gefunden werden, welche eine Analyse oder Integration zulässt. Mithilfe der Mathematiksoftware Origin Pro konnte die asymmetrische doppelte Sigmoidalfunktion Asym2Sig [I] eruiert werden, welche alle aufgenommenen Datensätze zuverlässig mittels 4 Variablen beschrieb.

$$y = A \cdot \frac{1}{1 + e^{-\frac{x + \frac{w_1}{2}}{w_2}}} \cdot \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{x - \frac{w_1}{2}}{w_3}}} \right) \quad [I]$$

Die Grundidee für die Methode des Laservergleichs beruht auf der Beschreibung des Tiefschweißeffekts mithilfe der Interaktionsgleichung [II] für einen gut fokussierbaren Laserstrahl mit einem Werkstoff nach Hülgel und Graf [2]. Darin bestimmen die Verdampfungstemperatur  $T_B$ , die wellenlängenspezifische Absorption  $A$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}$  des Werkstoffs sowie der Fokussdurchmesser des Laserstrahls  $d_f$  die notwendige Zentrums-Schwellintensität  $I_B$  für die Verdampfung.

$$I_B = \frac{T_B \cdot \lambda_{th}}{A \cdot d_f} \cdot \sqrt{\frac{32}{\pi}} \quad [II]$$

Übersteigt die maximale Intensität des Laserstrahls die Schwellintensität, ist dieser in der Lage, eine Dampfkapillare zu erzeugen. Eine darüber hinaus gesteigerte Intensität führt zu einem tieferen Eingriff des Laserstrahls in den Werkstoff. Somit konnte eine direkte Korrelation zwischen den ermittelten Parametern gefunden werden. Für alle Kombinationen aus Laserquelle und Werkstoff wurden daraufhin die Schwellintensitäten bestimmt. Diese wurden in die Intensitätsverläufe eingetragen. Hierbei wurde deutlich, wieviel Leistungsüberschuss oberhalb der Schwellintensität bei einigen Laserquellen vorhanden war.

Tabelle 1: Laserparameter und Schweißnahtgeometrien; Werkstoff A: S235JR EN 10025 (1.0038),  
Werkstoff B: X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571)

Hersteller / Modell	Typ / Wellenlänge	Fokusslänge	Rohstrahl- durchmesse	Fokus- durchmesse	Rayleigh- länge	M <sup>2</sup>	SPP	Leistungs- stufe	Schweiß- nahttiefe A / B	Schweiß- nahtbreite A / B
FEHA / HYPERICO 4-10.6	CO <sub>2</sub> -Laser / 10,6 µm	200 mm	14 mm	226 µm	3,19 mm	1,19	4,02 mm·mrad	1200 W	1,51 / 1,64 mm	0,81 / 1,02 mm
								1000 W	1,38 / 1,42 mm	0,77 / 0,98 mm
								800 W	1,14 / 1,19 mm	0,75 / 0,81 mm
Trumpf / TruFlow 12000	CO <sub>2</sub> -Laser / 10,6 µm	270 mm	29 mm	574 µm	5,44 mm	4,48	15,11 mm·mrad	4000 W	3,50 / 4,76 mm	1,79 / 1,83 mm
								2000 W	1,53 / 2,34 mm	1,60 / 1,67 mm
								1500 W	1,38 / 2,27 mm	1,58 / 1,63 mm
Trumpf / HL 3006D	Nd:YAG-Laser / 1064 nm	150 mm	36 mm	399 µm	1,72 mm	68,35	23,15 mm·mrad	3000 W	3,33 / 3,43 mm	1,27 / 1,85 mm
								2000 W	2,37 / 2,46 mm	1,33 / 1,52 mm
								1000 W	1,16 / 1,42 mm	1,02 / 1,00 mm
IPG / YLS 12000	Faserlaser / 1070 nm	200 mm	19 mm	473 µm	4,98 mm	32,94	11,22 mm·mrad	3000 W	2,86 / 3,02 mm	1,40 / 1,67 mm
								2000 W	2,07 / 2,09 mm	1,15 / 1,21 mm
								1000 W	0,88 / 1,35 mm	0,73 / 0,83 mm

Mithilfe der Sigmoidalfunktion wurden die Basisleistungen bis zur Schwellintensität in den Grenzen des Fokusbereichs  $d_f$  sowie die Überschussleistungen durch Integration eines „halben“ Intensitätsprofils zum rotationssymmetrischen Volumen kalkuliert und zur Nutzleistung  $P_{Nutz}$  zusammengefasst.

Im Anschluss daran wurden alle Laserstrahl- und Prozesskennwerte gegenübergestellt und auf die wesentlichen, Schweißnahtgeometrie beeinflussenden Werte eingekürzt. Diese werden mit ihrem jeweiligen Tendenzverhalten in der Abbildung 1 aufgeführt. Die Nutzleistung beinhaltet bereits materialspezifische Parameter. Diese müssen ergo nicht ein weiteres Mal einfließen.

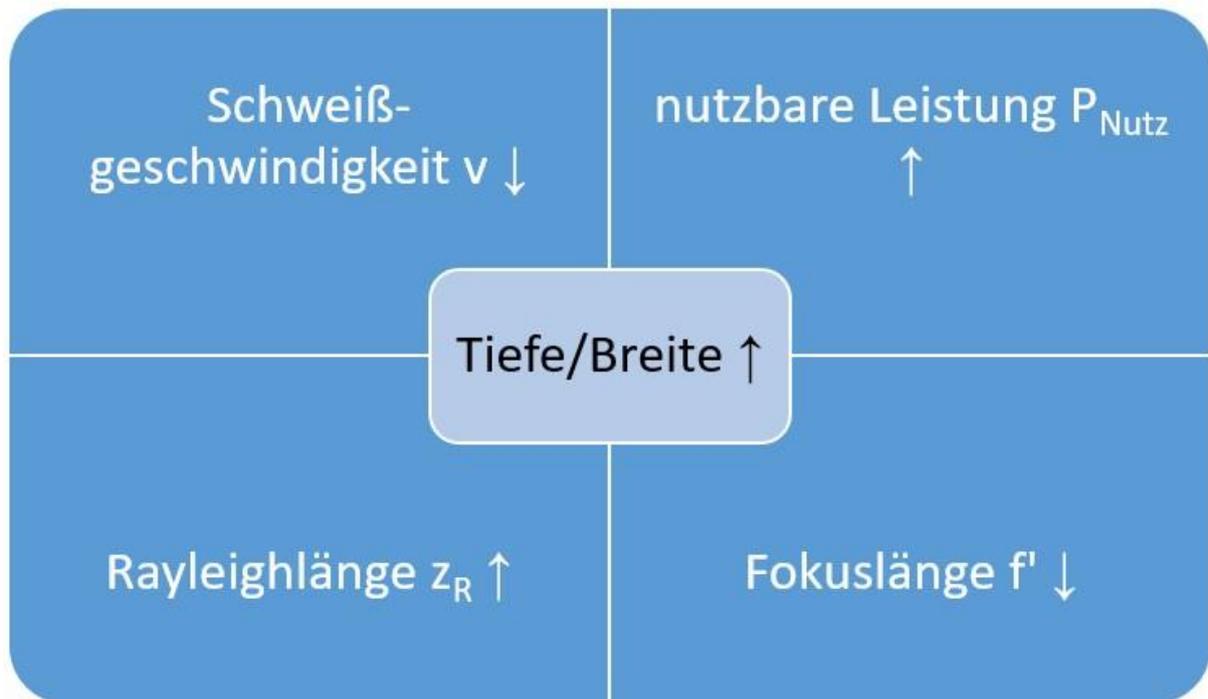


Abbildung 1: Abhängigkeit der Schweißnahtgeometrie von Laser- und Prozessparametern

Über einfache Formelkombinationen der genannten Einflussgrößen konnte ein exponentieller Zusammenhang zwischen der Rayleighlänge und der Nahtgeometrie gefunden werden. Indem alle Datensätze (Laser, Laserleistung und Material) immer in ein Diagramm geplottet wurden, konnte die Allgemeingültigkeit inklusive eines stetigen Verlaufs der Datenpunkte überprüft werden. Das Ergebnis liefert noch nicht direkt einen Parameter der Schweißnahtgeometrie, sondern die Hilfsgröße  $x$ , welche einheitenlos betrachtet werden soll:

$$x = \frac{P_{Nutz}}{v} \cdot e^{\frac{z_R^2}{f'}} \quad [III]$$

Zu beachten ist, dass sowohl die Rayleighlänge  $z_R$  als auch die Fokuslänge  $f'$  in mm eingesetzt werden; die nutzbare Leistung in W und die Schweißgeschwindigkeit in mm/s.

Aus der Hilfsgröße  $x$  konnte mithilfe einfacher Kurvenanalyse der direkte Zusammenhang zur Schweißnahtbreite  $b$  [IV] und –tiefe  $t$  [V] ermittelt werden. Die Ergebnisse tragen jeweils die Einheit mm.

$$b = 0,495 \cdot \ln(x) - 0,45125 \quad [IV]$$

$$t = 0,9183 \cdot e^{0,0255 \cdot x} \quad [V]$$

### 2.3 Berücksichtigung von Toleranzen

Der gesamte Rechenweg sowie die Datenakquise sind fehler- und toleranzbehaftet. Somit müssen sich zwangsläufig reale Abweichungen von der oben aufgeführten theoretischen Betrachtung ergeben. Die zu Beginn des Projekts aufgenommenen Daten sowie die nachfolgenden Überprüfungen wiesen den Gleichungen die Toleranzen  $b \pm 0,3 \text{ mm}$  und  $t \pm 0,5 \text{ mm}$  zu.

Der bisher aufgezeigte Weg kann jedoch noch nicht vollständig von einem potenziellen Anwender nachvollzogen werden. In der Regel besitzen Lohnfertiger aus dem Bereich der Lasermaterialbearbeitung nicht das messtechnische Equipment, die mathematischen Voraussetzungen und verfügen überdies nicht über die notwendige Zeit, den komplexen Datenverarbeitungs- und Rechenweg der Ableitung der nutzbaren Leistung zu beschreiten. Hierfür musste ein weiterer Ansatz entwickelt werden, welcher die nutzbare Leistung mithilfe verfügbarer Laserparameter und Materialkenngrößen beschreibt.

Zunächst soll darum der Vergleichswert der Strahleffizienz  $\eta$  eingeführt werden:

$$\eta = \frac{P_{\text{Nutz}}}{P} \quad [\text{VI}]$$

Analog zur mathematischen Betrachtung der Schweißnahtgeometrie sollten wiederum Parameterproportionalitäten zur Beschreibung der Strahleffizienz gefunden werden. Die resultierenden Abhängigkeiten sind in Abbildung 2 zusammengefasst.

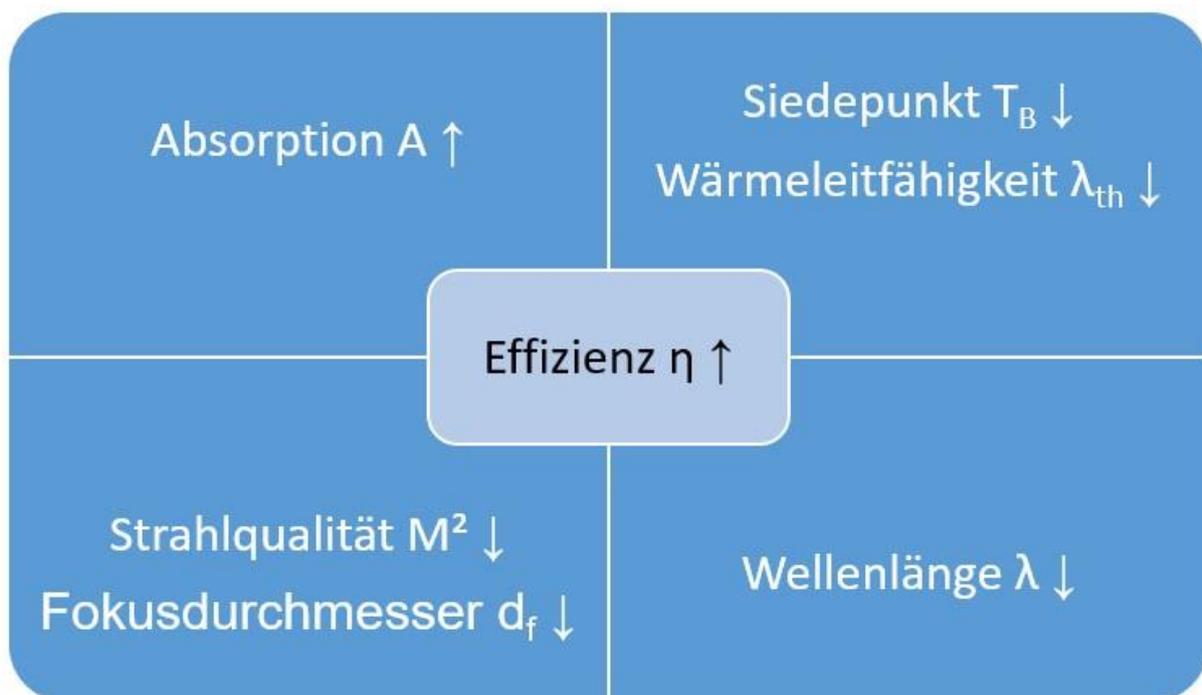


Abbildung 2: Abhängigkeit der Strahleffizienz von Laserparametern und Materialkenngrößen

Über das Plotten der einzelnen Faktoren sowie deren mathematischen Kombinationen konnten konkretere Abhängigkeiten ermittelt werden. Diese wurden unter der Berücksichtigung aller verfügbaren Datensätze vorgenommen und schrittweise an einen stetigen Verlauf der Hilfsgröße  $y$  an die Strahleffizienz  $\eta$  angepasst. Hieraus ergibt sich die resultierende Berechnungsvorschrift für die Hilfsgröße  $y$ :

$$y = \sqrt{\frac{A \cdot 10^9}{T_B \cdot \sqrt{\lambda_{th}} \cdot \lambda \cdot M^2 \cdot d_f}} \quad [\text{VII}]$$

Die Absorption  $A$  ist einheitenlos, der Siedepunkt  $T_B$  in K angegeben, die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}$  in  $W/K \cdot m$  sowie die Wellenlänge  $\lambda$  und der Fokussdurchmesser  $d_f$  in  $\mu m$ . Der Faktor  $10^9$  dient lediglich der besseren Handhabung der Zahlenwerte von  $y$ , welche einheitenlos zu betrachten sind. Der angesprochene stetige Verlauf nimmt in diesem Fall die Form eines Polynoms zweiten Grades an:

$$\eta = -0,356 \cdot y^2 + 1,3953 \cdot y - 0,37935 \quad [VIII]$$

Die Effizienz  $\eta$  ist einheitenlos und befähigt den Anwender, die nutzbare Laserleistung  $P_{Nutz}$  an-hand der Gleichung [VI] zu berechnen.

Da die Datensätze aus der berechneten Strahleffizienz und deren Vorgabe wiederum leicht variieren, soll für den Anwender abermals ein Toleranzbereich von  $\pm 0,1$  eingeführt werden. Sowohl die Berechnung der Effizienz als auch der Schweißnahtgeometrien soll nicht weiter zusammengeführt werden, da die resultierende Gleichung unnötig komplex würde und Rechenfehler nicht auszuschließen wären.

### 3. Ergebnisse

Auf dem Weg zum Redundanz-Algorithmus wurden die Intensitätsprofile und Kaustikverläufe der fokussierten Laserstrahlen aufgenommen und gemäß DIN EN ISO 11146-1:2005-04 nachberechnet. Mithilfe des Ansatzes des Tiefschweißeffekts konnte daraus die Parameter nutzbare Leistung  $P_{Nutz}$  und Strahleffizienz  $\eta$  abgeleitet werden. Diese beinhalten bereits laser- und materialspezifische Abhängigkeiten und ermöglichen somit einen Vergleich unterschiedlicher Laserquellen. Die Testschweißungen an den Werkstoffen S235JR EN 10025 und X6CrNiMoTi17-12-2 konnten den Bezug zu realen Schweißnahtgeometrien herstellen. Der eigentliche Algorithmus für die Vergleichbarkeit von Laserstrahlquellen für das Laserschweißen metallischer Werkstoffe besteht grundsätzlich aus zwei Schritten:

- Ableitung der nutzbaren Leistung  $P_{Nutz}$  bzw. Strahleffizienz  $\eta$  aus laser- und materialspezifischen Parametern
- Herstellung einer Verbindung aus Prozessparametern sowie der Strahleffizienz  $\eta$  und der Schweißnahtgeometrie

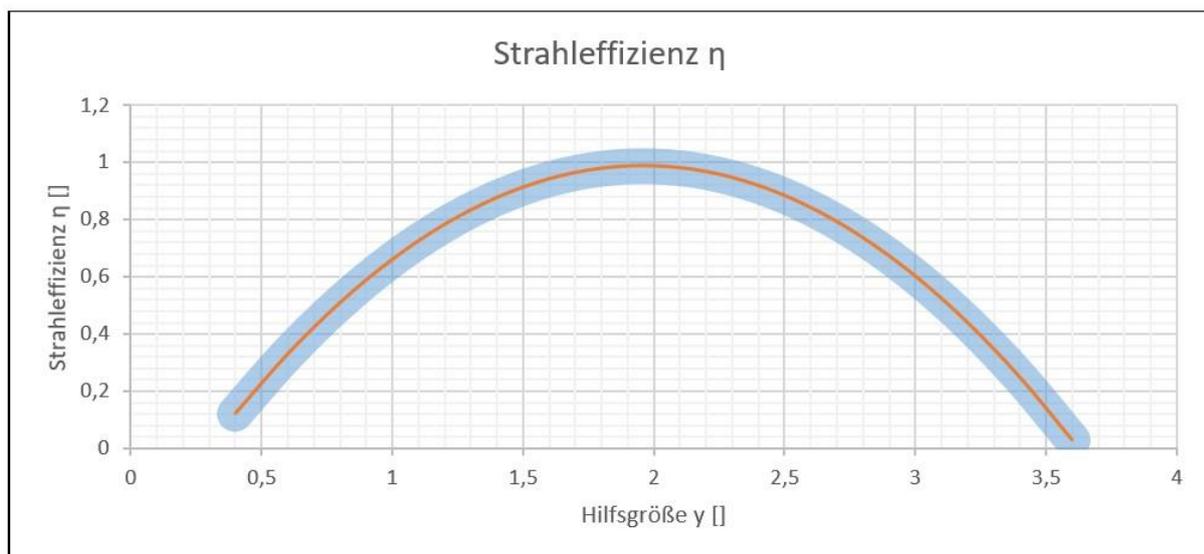


Abbildung 3: Strahleffizienz  $\eta$  in Abhängigkeit der Hilfsgröße  $y$  inkl. Toleranz  $\pm 0,1$

Der Algorithmus kann sowohl rein rechnerisch angewendet werden oder in Kombination aus Berechnung und Ablesung aus einem Diagramm. Dafür können die Abbildungen 3 bis 5 herangezogen werden, welche die Beziehung der Strahleffizienz zur Hilfsgröße  $y$  sowie der

Schweißnahtgeometrie zur Hilfsgrößen  $x$  nebst den eingeführten Toleranzbereichen aufzeigen.

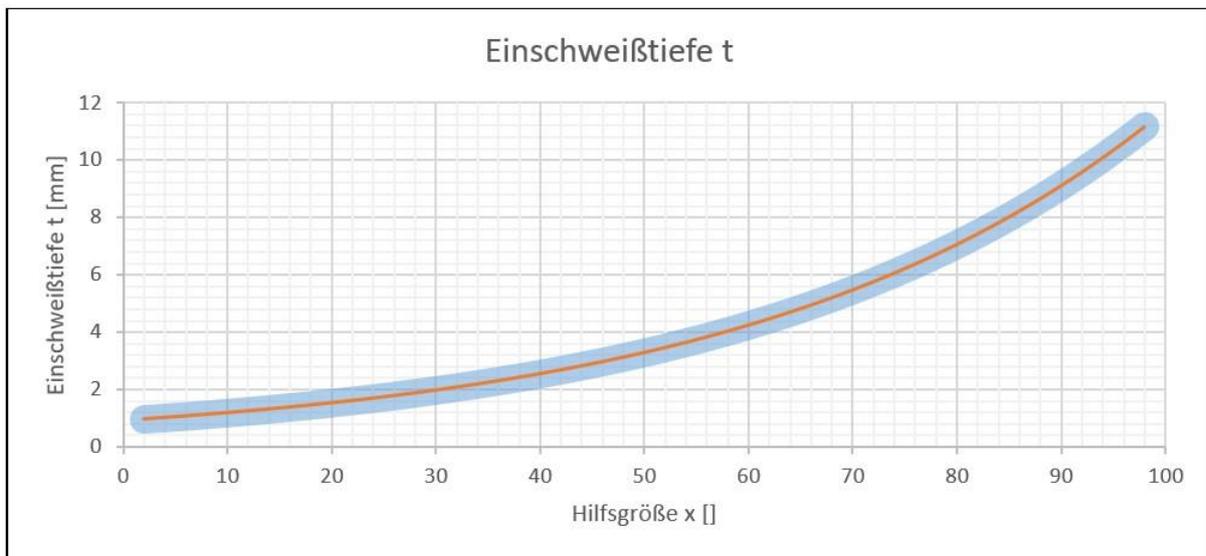


Abbildung 4: Einschweißtiefe  $t$  in Abhängigkeit der Hilfsgröße  $x$  inkl. Toleranz  $\pm 0,5$  mm

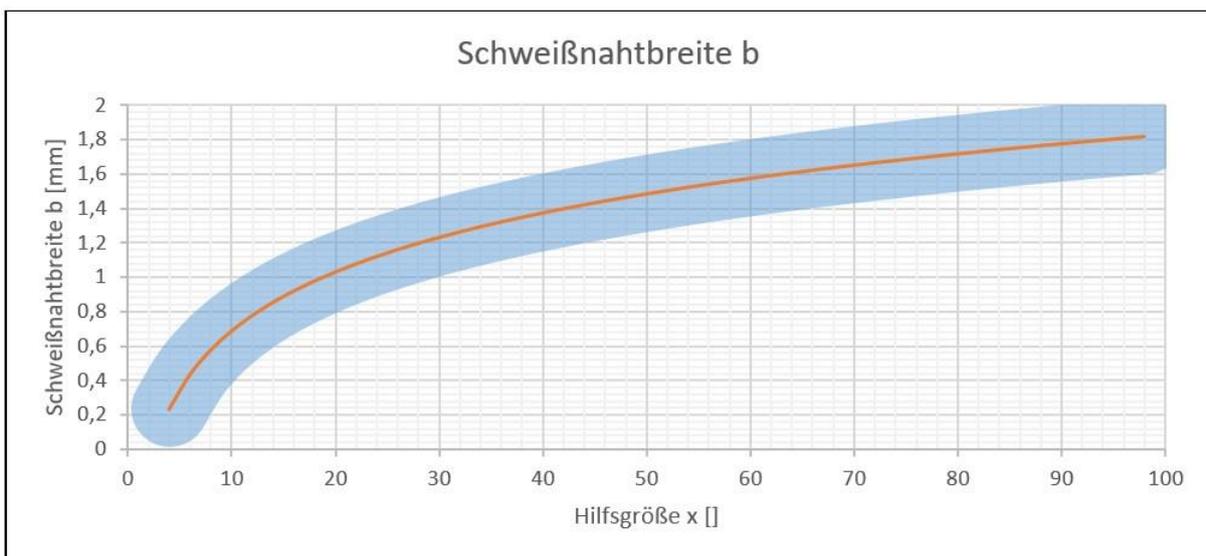


Abbildung 5: Schweißnahtbreite  $b$  in Abhängigkeit der Hilfsgröße  $x$  inkl. Toleranz  $\pm 0,3$  mm

Für die Anwendbarkeit der Methode spricht die Reversibilität des Algorithmus, insofern einige Parameter, wie z.B. die Fokusslänge, im Voraus festgelegt werden.

Aufgrund der Bedingung eines gut fokussierbaren Laserstrahls aus dem Grundansatz des Tiefschweißeffekts [2] können nachgewiesener Weise keine Strahlquellen mit Beugungsmaßzahlen  $M^2 > 70$  mit dieser Methode beschrieben werden. Die meisten Hochleistungsdiodenlaser für Schweißanwendungen entziehen sich somit der Betrachtung. Zudem muss beachtet werden, dass die Fokusebene im Bereich der Werkstückoberfläche liegt. Der Einfluss des Schutzgases wurde in diesem Projekt nicht weiter untersucht. Dieser Umstand soll unter den Punkt der Parameterfeinjustierung des Anlagenführers fallen.

#### **4. Folgerungen für die Praxis**

Die mathematische Beschreibung des Laserschweißens metallischer Werkstoffe mithilfe des Tiefschweißeffekts lässt Vergleiche zwischen verschiedenen Laserquellen und -typen zu. Ein Anwender kann hiermit ein und dieselbe Applikation auf mehreren Lasermaterialbearbeitungsanlagen fertigen. Der Algorithmus soll im hierbei helfen, den Aufwand der Parameterüberführung so gering wie möglich zu halten. Eine spezielle Laserstrahlvermessung durch den Anwender ist nicht notwendig. Alle verwendeten Parameter können der Literatur beziehungsweise Datenblättern entnommen werden. Die Ausnahme hierfür bilden lediglich die Rayleighlänge  $z_R$  sowie der Fokusbereich  $d_f$ , die mittels bekannter Gleichungen leicht kalkuliert werden können.

Die Genauigkeit der Methode unterliegt deren Toleranzbehauptung und beschreibt lediglich ein Parameterfenster. Eine Feinjustierung der Prozessparameter obliegt dem fachkundigen Anlagenführer.

Der gesamte Rechenweg lässt sich in Excel nachvollziehen, wobei Eingabemasken für die Optikauslegung und andere Prozessparameter möglich sind. Dadurch können auf einfachem Weg variable Parametersätze erstellt und miteinander verglichen werden. Insbesondere der Rechenweg zur Bestimmung der Laser- und Prozessparameter in Kenntnis der Schweißnahtgeometrie wird erst durch die Unterstützung der EDV handhabbar und universell einsetzbar.

#### **5. Literaturverzeichnis**

[1] DIN EN ISO 11146-1:2005-04, Beuth Verlag GmbH, Berlin (2005)

[2] Hügel, H.; Graf, T.: „Laser in der Fertigung“, Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2009)