

Prozessverständnis als Grundlage der Verfahrensentwicklung

Das IFSW hat sich seit seiner Gründung im Jahr 1986 darum bemüht, ein umfassendes Verständnis der für die Fertigungstechnik interessanten Prozesse aufzubauen. Dieses sollte eine zielgerichtete Verfahrensentwicklung und Problemlösung ebenso ermöglichen wie auch der Strahlquellenentwicklung Ziele aufzeigen. Nachstehend soll in einer leider aus Platzgründen unvollständigen Rückschau über einige Ergebnisse berichtet werden. Vieles davon ist heute Allgemeingut.

Energieeinkopplung

Als das IFSW 1986 anfangen waren die Anwendungsfelder für CO₂- und Nd:YAG-Laser klar abgegrenzt. Für hohe Leistung wie sie zum Schneiden, Schweißen und Oberflächenbehandeln von Makrobauteilen z.B. aus der Automobilindustrie benötigt wird, kamen nur CO₂-Laser infrage. Nd:YAG-Laser wurden dagegen eingesetzt für feinwerktechnische Schweißaufgaben z.B. in der Elektrotechnik, für Beschriften und dann, wenn hohe Pulspitzenleistung erforderlich war für abtragende Bearbeitung z.B. zum Abgleichen von elektronischen Bauelementen oder zum Bohren, z.B. von Turbinenschaufeln. Nur wenige hatten Interesse, an dieser Situation etwas zu ändern, am wenigsten die etablierten Strahlquellenhersteller. Als erste forderten japanische Kollegen Hochleistungs-Nd:YAG-Laser. Sie benötigten für die Reparatur von Kernkraftwerken einen kraftvollen, über Hunderte von Metern über Glasfasern übertragbaren Strahl und hatten auch genug Geld, um entsprechende Laser in Auftrag zu geben.

Das IFSW kümmerte sich früh um die unterschiedliche Energieeinkopplung [1,2]. Aus Tabellenwerken optischer

Konstanten waren im wesentlichen Absorptionswerte für perfekte Oberflächen auf Raumtemperatur zu entnehmen. Demnach ist die Absorption in Stahl bei der Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers zehnfach höher als bei der des CO₂-Lasers. Die Frage war, ob dieser Unterschied auch bei Prozess-Bedingungen (technische Oberflächen, hohe Temperaturen, flache Einfallswinkel) bestehen blieb. Theoretische Abschätzungen zeigten [3], dass dann nur noch ein Faktor 2-3 übrig bleibt. Dies war dann immer noch Grund genug, den Nd:YAG-Laser für Oberflächenverfahren zu empfehlen.

Beim Schweißen und Schneiden genügte es nicht, die Absorption bei Prozess-temperatur zu kennen. Hier war zusätzlich die Geometrie der Wechselwirkungszone zu berücksichtigen [4]. Beim Schweißen verändert sich diese drastisch beim Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen durch Ausbildung einer Dampfkapillare. Zusätzlich musste die Rolle verschiedener Energieübertragungskanäle geklärt werden. Die heiß diskutierte Grundsatzfrage in der zweiten Hälfte der 80er Jahre war, ob ein laserinduziertes Plasma oder Vielfachreflexion in der Dampfkapillaren der die

Energieeinkopplung dominierende Effekt sei. Das IFSW setzte von Anfang an auf die Vielfachreflexion [5,6] als primären Mechanismus und betrachtete das laserinduzierte Plasma als einen das Schweißen störenden Effekt.

Diese Diskussion erschien vielen wie ein Henne-Ei-Problem. Dabei wird jedoch übersehen, dass sie entscheidend war für die Empfehlung, Hochleistungs-Nd:YAG-Laser für das Tiefschweißen zu entwickeln. Wenn nämlich Plasma erforderlich wäre für hohe Einkopplung, hätte der Nd:YAG-Laser mit seiner 10-fach kürzeren Wellenlänge nie eine Chance gehabt mit dem CO₂-Laser zu konkurrieren, steigt doch die Wechselwirkung zwischen Plasma und Laserstrahlung je nach Theorie mit dem Quadrat oder der dritten Potenz der Wellenlänge an.

Auch für die Berechnung der zur Erreichung des Tiefschweißeffekts erforderlichen Strahlparameter erwies sich die Vielfachreflexionsannahme als nützlich. Auf ihrer Basis konnte folgende Gleichung

$$\frac{P_{\min}}{d_f} = \sqrt{\pi} \cdot \frac{T_v \cdot \lambda_{th}}{A} \cdot \sqrt{\frac{v \cdot d_f}{4\kappa_{th}} + 1.1} \\ \approx \sqrt{\pi} \cdot \frac{T_v \cdot \lambda_{th}}{A}$$

abgeleitet werden [6], welche die Abhängigkeit der Schwelle von den Materialparametern Verdampfungstemperatur T_v , Wärmeleitfähigkeit κ_{th} und Absorptionsgrad A beschreibt. Wichtig ist, dass für das Erreichen der Schwelle nicht die Intensität sondern die durch den Fokusbereich

geteilte Laserleistung maßgeblich ist. Dies konnte inzwischen in gründlichen experimentellen Untersuchungen verifiziert werden [7] und ist, wie folgende Abschätzung zeigen möge, auch von praktischem Nutzen: Die genannten Untersuchungen ergaben z.B. für das Schweißen von Stahl einen Schwellwert von ca. 1 kW/mm. Angenommen man hätte einen Faserlaser mit einem Fokusbereich von 10 μ m zur Verfügung. Wäre die Intensität maßgebend, so würden schon 0,1 W genügen, um den Tiefschweißeffekt zu erreichen. Im Falle von P/d_f kommt man auf 10 W, was inzwischen experimentell bestätigt wurde [8].

Schweißen von Aluminiumwerkstoffen

Als Anfang der 90er Jahre ein bedeutender Automobilhersteller die Fügeverfahren für eine Aluminiumkarosserie festlegte, wurde das Laserschweißen als ungeeignet verworfen, zum damaligen Stand der Kenntnisse zu Recht. Bei der nächsten Karosserie war dies grundlegend anders, jetzt wurden 30 m Nahtlänge mit Laser geschweißt [9], mehr als mit konkurrierenden Schweißverfahren und mehr als bis dahin in Stahlkarosserien. In der dazwischen liegenden Zeit war das Prozessverständnis in einem Maße weiterentwickelt worden, dass das Laserschweißen von Aluminium für den Fertigungseinsatz empfohlen werden konnte.

Um dies zu erreichen mussten zunächst die Ursachen der zahlreich auftretenden Schweißfehler gefunden

werden. Es zeigte sich, dass dabei zu unterscheiden war zwischen werkstoffbedingten wie Heißrissen und Wasserdampfporosität einerseits und verfahrensbedingten, d.h. durch Prozessinstabilität verursachten, wie Prozessporen und Auswürfe, andererseits [10]. Für alle Defektarten konnten Rezepte zu ihrer Vermeidung erarbeitet werden. Zum Beispiel deckten experimentelle Vergleiche des IFSW auf, dass sich durch Verwendung gut fokussierbarer Nd:YAG-Laser die Zahl der Prozessfehler deutlich reduzieren lässt [11], siehe Abbildung. Eine Erklärung dafür lieferte die Modellierung des Schweißprozesses: Das laserinduzierte Plasma verursacht Druckerhöhungen in der Dampfkapillare, die zu Poren und Auswürfen führen. Auch das Rezept gegen diese Prozessfehler, die Doppelfokustechnik [12] (siehe Abbildung), konnte durch die Modellrechnung erklärt wer-

den. Die durch die Anordnung eng benachbarter Fokuserzwungene Aufweitung der gemeinsamen Dampfkapillare verhindert Druckerhöhungen.

Literaturübersicht

[1] DAUSINGER, F.; BECK, M.; LEE, J.H.; MEINERS, E.; RUDLAFF, T.; SHEN, J.: *Energy Coupling in Surface Treatment Processes*. Journal of Laser Application 3 (1990) Nr. x, S. 17.
 [2] DAUSINGER, F.: *Lasers with Different Wave-Length - Implications for Various Applications*. In: Bergmann, H.W.; Kupfer, R. (Hrsg.): Proc. of the 3rd European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT'90), Erlangen, 1990. Coburg: Sprechsaal Publishing Group, 1990, S. 1.
 [3] DAUSINGER, F.; SHEN, J.: *Energy Coupling Efficiency in Laser Surface Treatment*. ISIJ International 33 (1993), S.

925.
 [4] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift, 1994. Stuttgart: Teubner, 1995 (Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des IFSW).
 [5] DAUSINGER, F.; BECK, M.; RUDLAFF, T.; WAHL, T.: *On Coupling Mechanisms in Laser Processes*. In: Hügel, H. (Hrsg.): Proc. of the 5th International Conference Lasers in Manufacturing (LIM5), Stuttgart, 1988. Berlin: Springer, 1988, S. 177.
 [6] BECK, M.: *Modellierung des Lasertiefschweißens*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1995. Stuttgart: Teubner, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW)
 [7] DAUSINGER, F.; GREF, W.; RÜB, A.: *Festkörperlaser zum Schweißen: Präziser Strahl schafft neue Potenziale*. Laser Magazin, Jg. 2002, Heft Nr.4, S. 20-24
 [8] MIYAMOTO, I., LIM 03, Tagungsband
 [9] LEITERMANN, W., RUDLAFF T., *Lasereinsatz im Aluminium Rohbau*. In: Dausinger, F., Hügel, H. and Opower, H. (Hrsg.): Tagungsband der Stuttgarter Lasertage (SLT '99), Stuttgart. Stuttgart: Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, 1999, pp. 1-3.
 [10] RAPP, J., *Laserschweißbeugung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1995. Stuttgart: Teubner, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW)
 [11] DAUSINGER, F.; FAISST, F.; HACK, R.; RAPP, J.; HÜGEL, H.; BECK, M.: *Welding of Aluminum: Challenge and Chance for Laser Technology*. In: Mazumder, J.; Matsunawa, A.;

Magnusson, C. (Hrsg.): *Proceedings of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO'95*, San Diego (CA), 1995. Orlando (FL): Laser Institute of America (LIA), 1995, S. 1059 (LIA Vol. 80).
 [12] GLUMANN, C.; RAPP, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Welding with a Combination of Two CO₂-Lasers - Advantages in Processing and Quality*. In: Denny, P., Miyamoto, I.; Mordike, B.L. (ed.): *Proceedings of Laser Materials Processing Symposium (ICALEO'93)*, Orlando. Orlando: Laser Institute of America (LIA), p. 672.

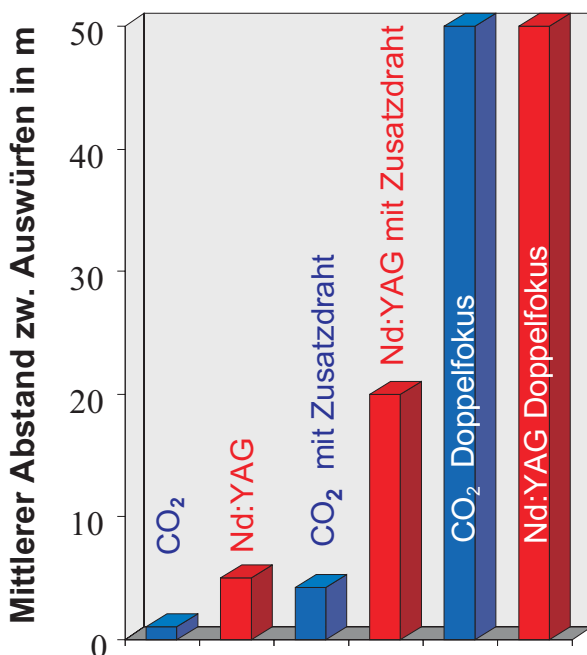


Abb.: Qualität von Schweißnähten in Aluminiumwerkstoffen. Aufgetragen ist der mittlere Abstand zwischen Auswürfen. Bei Verwendung von einem Fokus traten mit dem CO₂-Laser fünfmal mehr Defekte auf. Durch Doppelfokustechnik konnte bei beiden Lasertypen ein hohes Qualitätsniveau erreicht werden.

Institutsadresse:
 Institut für Strahlwerkzeuge
 Pfaffenwaldring 43
 70569 Stuttgart
 Tel.: +49 (0)711-685 6840
 Fax: +49 (0)711-685 6842
<http://www.ifsw.uni-stuttgart.de>

Autor:
 Prof. Dr. Friedrich Dausinger
dausinger@ifsw.uni-stuttgart.de

Kontakt / Redaktion:
 Dipl.-Ing. Friedemann Lichtner
 FGSW - Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH
 Nobelstr. 15
 70569 Stuttgart
 Tel.: +49 (0)711-351 451-28
 Fax: +49 (0)711-351 451-29
friedemann.lichtner@fgsw.de
<http://www.fgsww.de>