

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 64 (1973)  
**Heft:** 16

**Artikel:** Anwendung des Laser-Impulsschweissens in der Feintechnik  
**Autor:** Remund, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915586>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 21.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Anwendung des Laser-Impulsschweissens in der Feintechnik

Von R. Remund

621.791.7 : 621.375.826

Seit der bedeutenden Entdeckung des Laserlichtes von T. Maiman im Jahre 1960 entspannte sich ein gigantischer Wettlauf um die Entwicklung und die Verbesserung der Laserstrahlen und deren Anwendungen. Die theoretischen Grundlagen dazu wurden bereits im Jahre 1917 im Memorandum über die induzierte Lichtemission von Albert Einstein erläutert. Es dauerte daher ungefähr 50 Jahre, bis der Laser eigentlich entdeckt wurde.

Seit den frühen 60er Jahren begannen viele Laboratorien in der ganzen Welt an den Anwendungen des Lasers zu arbeiten. Noch heute werden fast täglich neue Anwendungen entwickelt und neue Lasermaterialien entdeckt und grössere und leistungsstärkere Systeme gebaut.

Dank den besonderen Eigenschaften des Lasers hat dieser neben vielen Anwendungen in Wissenschaft und Technik auch einen grossen Anwendungsbereich in der Materialbearbeitung gefunden. Neue Methoden und neue Bearbeitungstechniken konnten dadurch realisiert werden, die sich viel günstiger auf die zu bearbeitenden Materialien auswirken, insbesondere hinsichtlich Strukturveränderungen und Materialspannungen durch Wärmebeeinflussung, die bei konventionellen Methoden zum Teil unvermeidbar sind.

Die Anwendungen des Lasers in der Feintechnik beruhen auf dessen Haupteigenschaften: sehr hohe Leistungsdichte, die im fokussierten Punkt erreicht werden, grosse Parallelität des Strahles, Phasengleichheit (Kohärenz genannt) der Lichtwellen und monochromatisches Licht, d. h., dass der Strahl mit einer einzigen Wellenlänge schwingt. Die Wellenlänge ist abhängig vom verwendeten Resonator-Material und variiert im Bereich von etwa 0,3 µm bis 10,6 µm, d. h. vom ultravioletten über den sichtbaren bis in den hohen ultraroten Bereich. Sichtbar für das menschliche Auge sind die Wellenlängen von 0,4...0,8 µm. In Tabelle I sind einige der üblichsten Laser, die in der Materialbearbeitung verwendet werden, zusammengestellt. Der in der Tabelle I aufgeführte He-Ne-Laser wird zwar nicht für die Materialbearbeitung verwendet, hat aber eine grosse Bedeutung in der Mess- und Kontrolltechnik, einerseits in der Holographie für die Kontrolle von Materialstrukturen und Schweiss-

stellen und andererseits für die Längen- und Distanzmessung und Geschwindigkeitsmessung.

Die Laser HeNe, Rubin und Argon sind sichtbar für das menschliche Auge, dagegen können die YAG- und Glaslaser nur mittels Bildwandler sichtbar gemacht werden.

Laser werden je nach verwendetem Resonator in Festkörper-, Gas- oder Flüssigkeitslaser eingegliedert. Die grundsätzlichen Eigenschaften sind bei allen Lasertypen dieselben. Auf Grund dieser Eigenschaften werden im Brennfleck des Laserstrahles sehr hohe Energiedichten erreicht. Versuche haben gezeigt, dass damit alle bekannten Stoffe geschmolzen und verdampft werden können, eingeschlossen Werkstoffe wie Rubin, Diamant und Hartmetall. Auf Grund dieser Tatsachen sind für die Materialbearbeitung klare Voraussetzungen gegeben.

Um die erzeugbaren Energiedichten besser zu veranschaulichen, sind in der nachstehenden Zusammenstellung einige Energiequellen angegeben. Die Energie wurde bei allen Quellen im fokussierten Punkt einer fast idealen Linse mit einer Brennweite von 25 mm gemessen.

Sonne	ca. 500 W/cm <sup>2</sup>
HeNe-Laser	ca. 50 kW/cm <sup>2</sup>
Nd: YAG- und Rubin-Laser	ca. 10 <sup>16</sup> W/cm <sup>2</sup>

im Vergleich dazu:

Azetylen-Sauerstoff-Brenner	ca. 1 kW
Elektrischer Lichtbogen	ca. 10 kW
Elektronenstrahl	ca. 1 GW

Die Energie im fokussierten Punkt beträgt

$$N = \frac{E_{AUS}}{\pi f^2 \alpha^2 t}$$

- N Leistungsdichte im Punkt
- E<sub>AUS</sub> Ausgangsenergie des Lasers
- f Fokusslänge
- α Divergenz des Strahles
- t Pulslänge

Daraus ist ersichtlich, welche enorme Energiedichten erreicht werden können. Ohne weiter auf die gegebene mathematische Beziehung einzugehen, sei erwähnt, dass die Wahl der Fokusslänge f und die Kleinheit des Divergenzwinkels α sehr wichtig sind.

Auch wenn oft angenommen wird, dass der Laserstrahl parallel ist, stimmt dies im wahrsten geometrischen Sinne nicht. Die Unparallelität (auch Divergenz genannt), beträgt etwa 1...5 mrad (Winkel α). Bei 1 mrad Winkel und 1000 m Strahlänge beträgt die Strahlstreuung 1 m. Diese ist gegeben durch die Beugungen an den Laserbegrenzungen wie z. B. durch Blenden oder Aussendurchmesser des Kristalles.

Die Fokussierbarkeit des Strahles ist ebenfalls begrenzt, d. h. je kleiner der Winkel, desto kleiner der Brennpunkt, d. h. grösser die Energiedichte im Fokuspunkt.

Die Grösse des Brennflecks F<sub>a</sub> ist:

$$F_a = 2 f \alpha$$

Häufig verwendete Laser in der Bearbeitungstechnik

Tabelle I

Material	Wellenlänge µm	Pulsenergie J	Dauerleistung kW	Verwendung
HeNe	0,632	–	20 · 10 <sup>-6</sup>	Messen
Nd: YAG	1,06	100	1	Bohren, Schweißen Trimmen, Schneiden
Nd: Glas	1,06	100	–	Schweißen (Bohren)
Rubin	0,69	50	–	Bohren (Schweißen)
Argon	0,51	–	bis 0,020	Feinstbearbeitung z. B. von Dünnschichten
CO <sub>2</sub>	10,6	500	bis 10	Schneiden, Schweißen



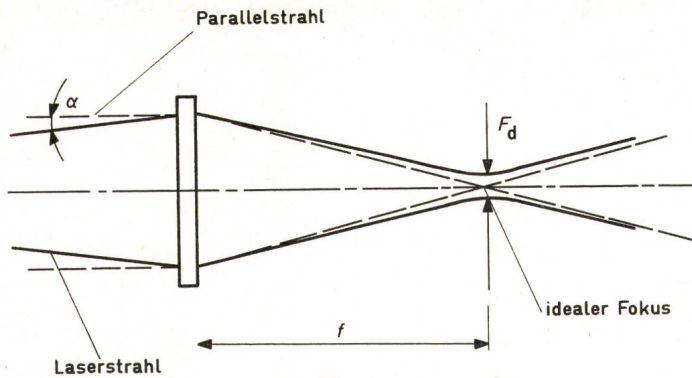


Fig. 1  
Grösse des Brennpunktes  
 $F_d = 2 f \alpha \approx 2 \dots 50 \mu\text{m}$   
 $F_d$  Fehler im Brennpunkt  
 $\alpha$  Divergenz  
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

In Fig. 1 ist gestrichelt der ideale Laser (absolut paralleler Strahl), und durch die ausgezogene Linie ein praktischer Fall angedeutet mit dem Divergenzfehler  $\alpha$  und dem daraus resultierenden Fehler im Brennpunkt  $F_d$ .

Nebst den genannten Eigenschaften weist der Laser die Vorzüge auf, dass sich die hohe Intensität im zeitlichen Ablauf über die Pulslänge steuern und im voraus bestimmen lässt und zwar in der Pulslänge wie in der Pulsform, und dass heute verschiedene Wellenlängen vorhanden sind, die je nach der Absorption des zu bearbeitenden Materials angepasst werden können.

In Fig. 2 wird schematisch gezeigt, wie ein Laserstrahl auf eine Schweißstelle einwirkt, wenn die beiden Werkstücke 1 und 2 stumpfgeschweisst werden sollen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Laserstrahl im zu bearbeitenden Werkstück optimal

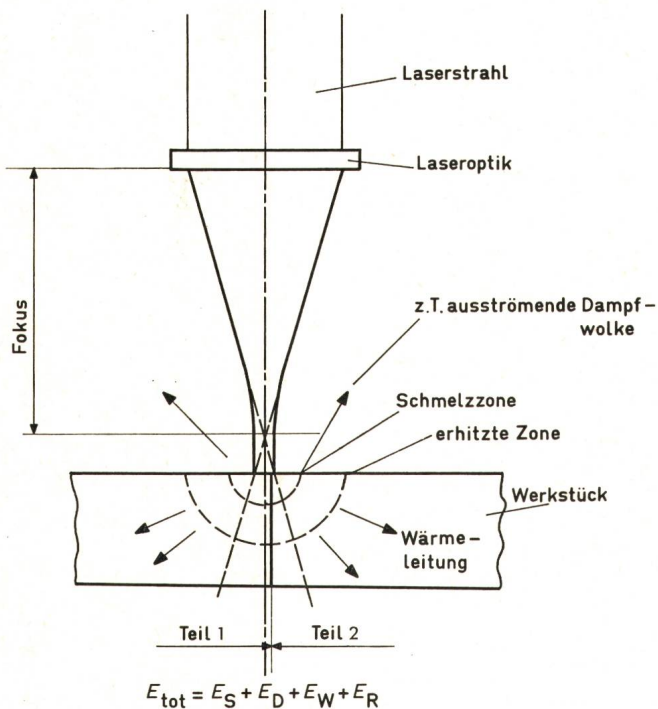


Fig. 2  
Schematische Anordnung des Laserschweisens  
 $E_S$  Schmelzwärme  
 $E_D$  Energieverlust durch Dampf-wolke  
 $E_W$  Wärmeleitung im Material  
 $E_R$  Verluste durch Reflektion  
 $E_{tot}$  zugeführte Gesamtenergie

absorbiert wird, d. h. dass die Energie in Wärme (Schmelz- oder Verdampfungswärme) umgewandelt wird.

Nebst der Absorptionsenergie, die in diesem Falle zum Schweißen als Schmelzwärme verwendet wird ( $E_S$ ), treten auch Verluste auf, einerseits durch die Reflektion ( $E_R$ ) und durch die Wärmeleitung ( $E_W$ ) im Material, andererseits durch die Dampf-wolke ( $E_D$ ) des verdampften Werkstoffes. Dieser Anteil kann beim Schweißen sehr minim gehalten werden, beim Bohren dagegen ist dies ein wesentlicher Bestandteil der Gesamtenergie.

Daher gilt:

$$E_{tot} = E_S + E_D + E_W + E_R$$

In Fig. 2 wird auch gezeigt, dass die Laserachse gegenüber der Schnittstelle oder Berührungsstelle der beiden Materialien (Teil 1 und Teil 2) oft verschoben wird. Dies dient zur Steuerung der Energieverteilung, wenn z. B. Teil 1 grössere Energie braucht als Teil 2 zur Erreichung der idealen Schmelztempera-

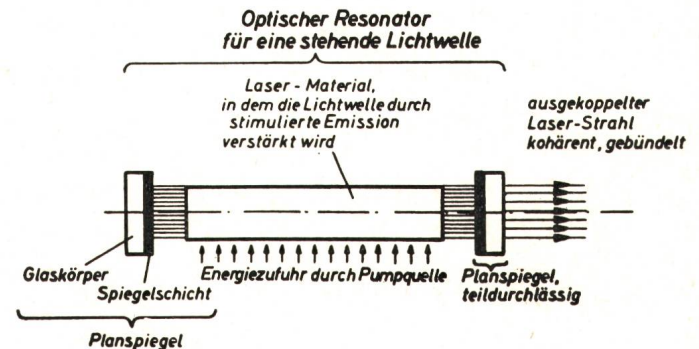


Fig. 3  
Schematische Laseranordnung  
Laser Kristall mit Energiespiegeln

tur. Im weiteren wird der Fokuspunkt nicht auf die Oberfläche gerichtet, wie dies beim Bohren oder Schneiden nötig wäre. Dadurch erreicht man, dass eine grössere Fläche vom Strahl beeinflusst wird und die Energiedichte direkt mit der Fokustverstellung gesteuert werden kann.

Dank dieser optimalen Auslegung und der vorausbestimm-baren Güte und Grösse der Schweißstelle hat der Laser in der Schweisstechnik revolutionierend gewirkt. Heute wird er vor allem eingesetzt für das Punkt- und Nahtschweißen wie auch für das Tiefschweißen bis etwa 20 mm. Der Laser hat sich bis heute vor allem im Bereiche der Mikro- und Feintechnischen Schweißung durchgesetzt.

Laserschweißungen weisen eine höhere Festigkeit auf als eine konventionelle Schweißung und zwar deshalb, weil eine direkte Verschmelzung der beiden Werkstoffe stattfindet. Beim Laserschweißen wird die Leistungsdichte so gesteuert, dass die beiden zu verbindenden Materialien an der Oberfläche geschmolzen, aber nicht verdampft werden. Zu Beginn muss eine erhöhte Leistung dafür sorgen, dass die Materialverschmelzung rasch eintritt, in der weiteren Phase nur noch so viel Energie zugeführt werden, wie durch die Verluste ( $E_D + E_W + E_R$ ) abgeführt wird, um eine optimale Schweißverbindung zu erhalten. Die Aufschmelztiefe wird durch die spezifischen Werkstoff-eigenschaften, wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit und die Absorption bei gegebener Wellenlänge, beeinflusst. Falsche zeitliche Energieverteilung oder zu hohe, respektive zu schwache Leistungen führen zu schlechten Schweißstellen, Versprödungen oder Durchbohren der Schweißung.

Aus dem Gesagten geht hervor, dass oft nur durch exakte



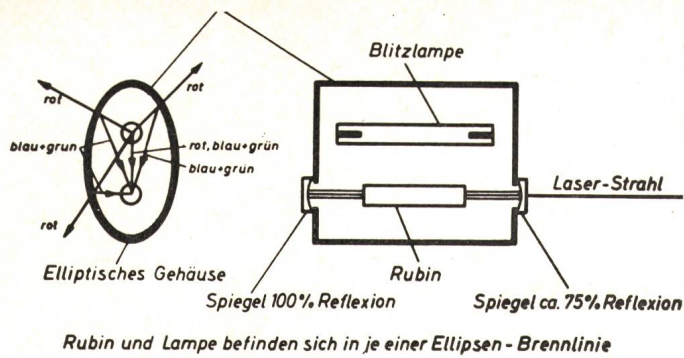


Fig. 4  
Elliptischer Resonator

Untersuchungen eine optimale Lösung für das Schweißen gefunden werden kann.

Die Laserleistung bleibt beim kurzzeitigen Puls auf eine eng begrenzte Stelle lokalisiert. Die total beeinflusste Zone beträgt etwa 3 Fokusbereiche. Diese begrenzte Einflusszone ist bei vielen Anwendungen, wie z. B. beim Schweißen von Halbleitern, von grosser Bedeutung. Da die Laserenergie berührungsfrei auf das zu bearbeitende Werkstück wirkt, ist eine Verunreinigung der Schweißstelle durch Fremdstoffe ausgeschlossen.

Im weiteren ist es wichtig, dass die Werkstückteile, die mit dem Laser geschweisst werden sollen, in gutem Kontakt miteinander stehen, d. h., dass kein Luftspalt dazwischen ist. In den meisten Fällen kann dies mechanisch durch geeignete Werkzeuge oder Niederhalter erreicht werden. Bei kleineren Teilen werden Pressluft-, respektive Vakuumanspressen angewendet.

Als Material für den Laserresonator werden heute für das Schweißen vor allem die Festkörper Nd:Glas, Nd:YAG, beide von  $1,06 \mu\text{m}$  Wellenlänge, und das Gas  $\text{CO}_2$  von  $10,6 \mu\text{m}$  verwendet. Die beiden ersten vor allem für das Punktschweißen mit gepulsten Lasern, letzterer für das Nahtschweißen mit Dauerstrichlaser, im speziellen von Kunststoffen und Eisenmetallen.

Fig. 3 zeigt die schematische Anordnung von Lasern. Für die beiden Endspiegel werden Glassubstrate verwendet, die mit einer speziellen Beschichtung überzogen sind und zwar so, dass der eine Spiegel die Strahlen 100% reflektiert und der Austrittsspiegel teildurchlässig ist, d. h. bei einer bestimmten Energiedichte den Strahl durchlässt. Manchmal sind die Spiegel direkt an den Enden des Kristalls aufgedampft.

Je nach Art wie der Kristall erregt wird – pulsformig oder mit Dauerlicht – klassifiziert man die Laser in gepulste oder Dauerstrichlaser.

Fig. 4 zeigt einen elliptischen Resonator mit Kristall und Blitzlampe in den beiden Brennpunkten. Damit wird erreicht, dass ein Maximum der Pumpenergie der Blitzlampe in den Kristall reflektiert wird.

Fig. 5 zeigt eine optische Anordnung mit Betrachtungsoptik kombiniert. Bereits aus dem früher Gesagten geht hervor, dass der Laser nur optimale Resultate abgeben kann, wenn er mit der geeigneten Optik ausgerüstet wird. In der Figur ist der Laserstrahlenerzeuger und der  $90^\circ$ -Winkel-Ablenkspiegel von  $1,06 \mu\text{m}$  erkennbar. Der Spiegel lenkt die Laserstrahlen 100-prozentig ab, lässt jedoch das sichtbare Licht senkrecht durch (ohne Reflexion und Ablenkung). Das Licht für die Werkstückbeleuchtung wird in einer zweiten Ebene eingespiegelt. Die Betrachtungsoptik ist mit einem Spezialfilter geschützt. Im

weiteren wird der Strahl nach dem Austritt mit einer Optik von Durchmesser  $d$  auf  $D$  vergrössert. Dadurch wird der Divergenzwinkel  $\alpha$  reduziert, und zwar um das Aufwertungsverhältnis  $d : D$ .

Die Verwendung einer solchen optischen Anordnung wirkt sich ebenfalls günstig in der Mikrobearbeitungstechnik aus, ist doch durch dieses Mittel die genaue Positionierkontrolle gegeben. Dank des optischen Zentriermikroskopes können komplizierte Bearbeitungen realisiert werden. Für spezielle Anwendungen werden auch Blenden oder Masken in der Kavität oder am Strahlenaustritt montiert. Damit kann jede beliebige Form erreicht werden. Dabei wird aber nur ein Teil der Gesamtenergie des Lasers zur Bearbeitung ausgenützt. Oft wird mit der gleichen Methode nur das Kernstück des Resonators herausgenommen, was zur starken Verbesserung der Strahlqualität führt – in der Fachsprache wird dies mit «Single-Mode- oder Low-Mode-Betrieb» bezeichnet.

Oft werden auch Sonderoptiken verwendet, mit denen der Strahl rotiert werden kann oder kegelförmig ausgelenkt wird, z. B. um an einem Kreisumfang regelmässige Schweißpunkte zu machen.

In Fig. 6 wird eine solche Drehoptik gezeigt, die mit einem Schrittmotor angetrieben wird. Dadurch kann diese direkt synchronisiert werden mit den Laserpulsen. Im weiteren ist die Drehoptik zur genauen Positionskontrolle mit einem Zentriermikroskop ausgerüstet.

In Fig. 7 und 8 sind zwei Anwendungen einer solchen Drehoptik gezeigt. In Fig. 7 werden 2 Scheiben mit Einzelpulsen verschweisst; Fig. 8 zeigt eine Nahtschweißung mittels überlagernden Einzelpulsen von zwei ineinander gesteckten Berylliumröhren ( $\varnothing 12 \text{ mm}$ ). Die Wandstärke der beiden Röhren beträgt zusammen  $0,2 \text{ mm}$  und die Schweißpunktgrösse ca.  $0,16 \text{ mm}$ .

In den folgenden Bildern werden praktische Realisationen von Laserköpfen, Optiken und kompletten Lasersystemen gezeigt.

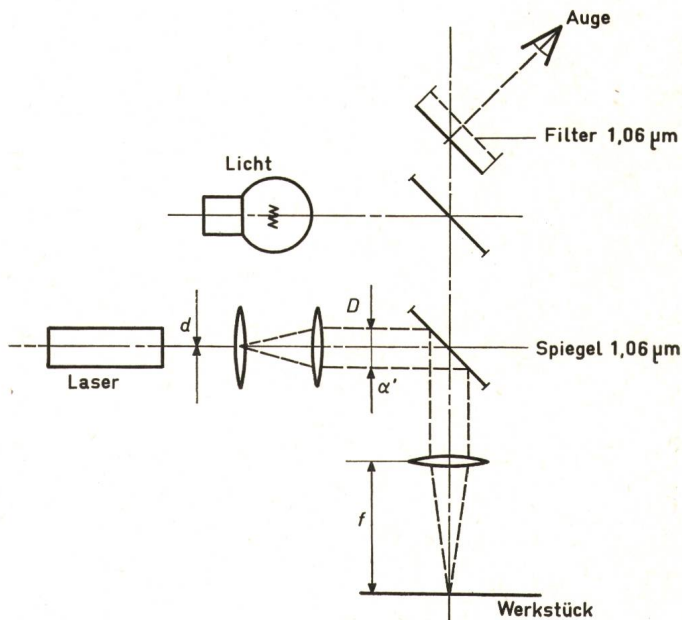


Fig. 5  
Optikanordnung für Laserbearbeitung

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{d}{D}$$

- $d$  Strahldurchmesser am Austritt des Resonators
- $D$  Strahldurchmesser nach optischer Aufweitung
- $\alpha$  Laser-Divergenzwinkel
- $\alpha'$  verkleinerte Divergenz nach Aufweitung



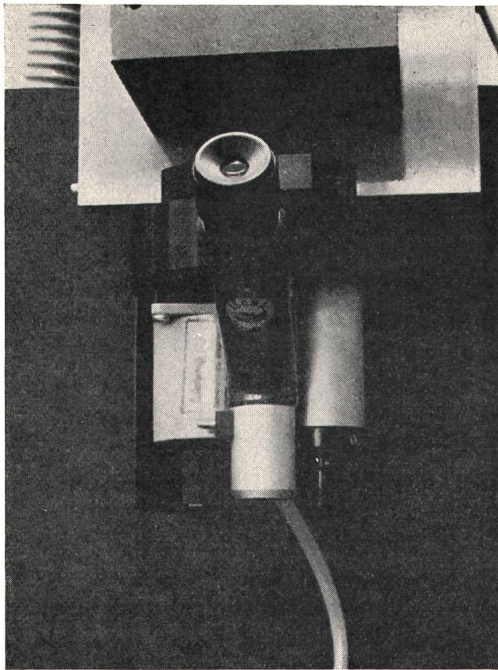


Fig. 6

**Drehoptik angetrieben mit Schrittmotor kombiniert mit Zentriermikroskop**

In Fig. 9 ist ein Laserkopf offen gezeigt. Erkennlich ist in der Mitte die Laserkavität (Ellipse) mit dem Kristall und der Blitzlampe (erkennbar an den elektrischen Anschlüssen der beiden Elektroden). Im weiteren sind die beiden Aussenspiegel mit Mikrometerjustierung erkennbar, wie auch der Blenden-träger unmittelbar unterhalb dem oberen Spiegel und das Kühlwasserzirkulationssystem mit Durchflussschalter.

Fig. 10 zeigt eine Spezialoptik mit Laseroptik und geschlossenem TV-Betrachtungssystem kombiniert. Im weiteren ist auch die Werkstückbeleuchtung gut erkennbar. Diese Art von Beobachtung wird vor allem vorgezogen, wenn mehrere Stationen gemeinsam überwacht werden sollen, oder wenn der

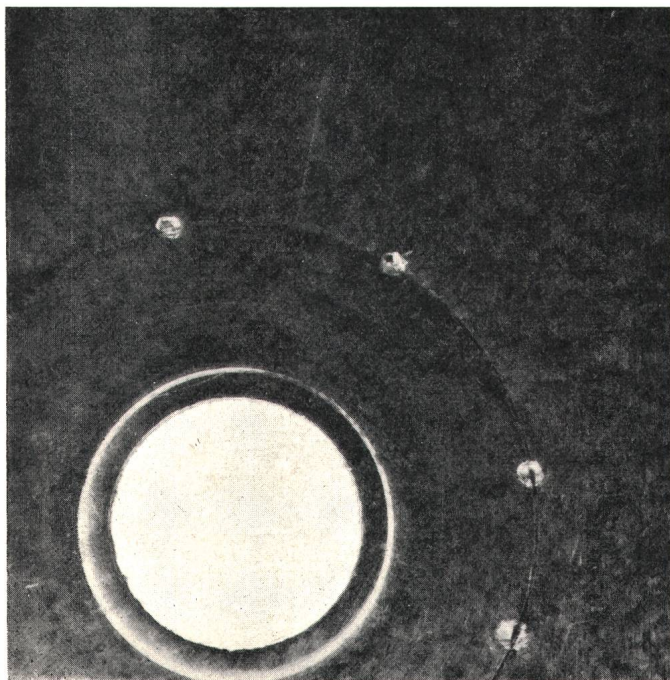


Fig. 7

**Punktschweissung auf einem Durchmesser von 6 mm mit Drehoptik (Material Messing)**

Laserprozess über längere Zeit dauert, wie z. B. beim Bohren von Diamanten.

Die grossen Vorteile des Schweisens mit dem Laserstrahl sind die äusserst genauen Toleranzen, die auch über grössere Stückzahlen erreicht werden, da keine Werkzeugabnutzung oder kein Hilfsmittelverschleiss, wie Schweisselectroden, vorliegen, die oft Schwankungen in Herstelltoleranzen bewirken.

Die weiteren Vorteile sind:

- a) Kein mechanischer Kontakt mit der Schweißstelle;
- b) Thermische und elektrische Isolation der Werkstücke;
- c) Kurze Impulszeit 1..8 ms, daher praktisch keine Wärmeleitung;
- d) Dank der leichten zeitlichen Steuerung der Energie, praktisch alle Materialien miteinander verschweisbar;
- e) Sehr kleine Schweisspunkte;
- f) Schweissungen sind auch an unzugänglichen Stellen möglich, z. B. durch Glasabdeckungen hindurch oder in Sacklöchern;
- g) Es sind keine speziellen Hilfsmittel nötig wie z. B. Elektroden oder Lötwater usw.;
- h) Schweissungen können in Gasen, Vakuum und Flüssigkeiten durchgeführt werden;
- i) Man kann auch direkt durch Isolation hindurch schweissen, also keine Abisolierung nötig;
- j) Die Grösse wie die Tiefe der Schweißstelle ist gut kontrollierbar.

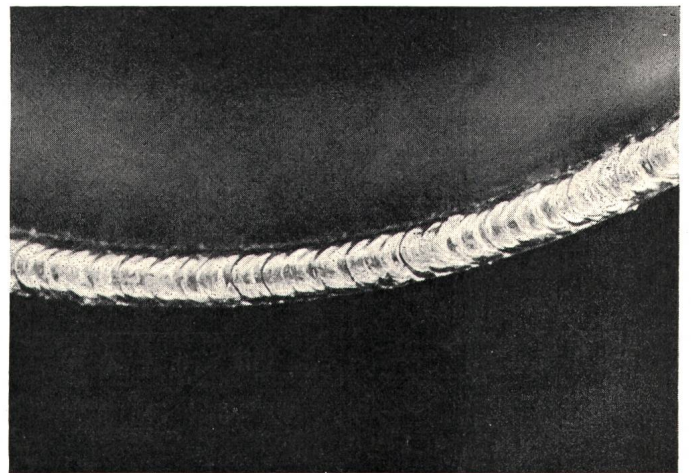


Fig. 8

**Nahtschweissung mit überlagernden Einzelpulsen**  
Kreisdurchmesser 12 mm

Die Kurvenschar der Fig. 11 zeigt die benötigten Energien relativ zueinander für das Schweissen der Materialien Stahl, Aluminium und Kupfer. Bei der Berechnung der Kurven wurde angenommen, dass ein Laser der Wellenlänge von  $1,06 \mu\text{m}$  verwendet wird. Es wurden die Energien berechnet, die zur Erreichung von bestimmten Eindringtiefen nötig sind. Z. B. werden folgende Energien für die Schweissdicke von 1 mm benötigt: für Stahl 500 W, für Aluminium 1200 W und für Kupfer ca. 6000 W. Daraus ist ersichtlich, wie unterschiedlich verschiedene Materialien vom gleichen Laserstrahl durchdrungen werden; dies auf Grund der Verschiedenheit der Absorptions- und Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien.

Die Kurve in Fig. 12 zeigt die benötigte Laserleistung in Funktion der Eindringtiefe, d. h. wie dicke Materialien geschweisst werden können. Die Messung wurde mit einem Dauerstrich Nd: YAG Laser gemacht an rostfreiem Stahl. Um Leistungen bis 1000 W zu erreichen ist es nötig, dass mehrere Einzel-Lasermodule in Serie geschaltet werden. In diesem Falle wurden bis 8 Module zu je 125 W hintereinander geschaltet. Die Schweisspunktgrösse betrug 0,6 mm Durchmesser.



Aus der Kurve ist ersichtlich, dass bereits für die Blechdicke von 1 mm bereits 400 W Laserleistung benötigt wird.

Da die Betriebs- und Servicekosten einer Laseranlage sehr gering sind, weil keine Teile und Werkzeuge (mit Ausnahme der Lampen) abgenutzt werden, und die Produktionszahlen pro Zeiteinheit sehr hoch sind, sind auch die Produktionskosten geringer als bei herkömmlichen Methoden.

An einigen Beispielen sei gezeigt, wie erfolgreich sich das Laserschweißen bei geeigneter Anwendung in die Produktion eingeführt hat. Als Kalkulationsschema wurde eine allgemein gültige Vorlage mit einer Abschreibungsrate von 10% pro Jahr und einer Verzinsung von 8% des Restkapitals verwendet.

Fig. 13 zeigt die Schweißung einer Uhrenspirale aus Federstahl mit einem Virol. Um eine optimale Lösung zu finden, wurde dem Virol eine geeignete Form gegeben, damit eine klar definierte Kontaktstelle besteht. Fig. 14 zeigt eine starke Vergrößerung des Schweißpunktes. Gut ersichtlich ist die vollständige Verschmelzung an der Schweißstelle und dass praktisch keine Wärmeinwirkung um die Schweißstelle herum entstand. Die Produktion wird auf einem Halbautomaten mit einer Ausgangsenergie von 0,5...0,8 J/Puls vorgenommen. Da-

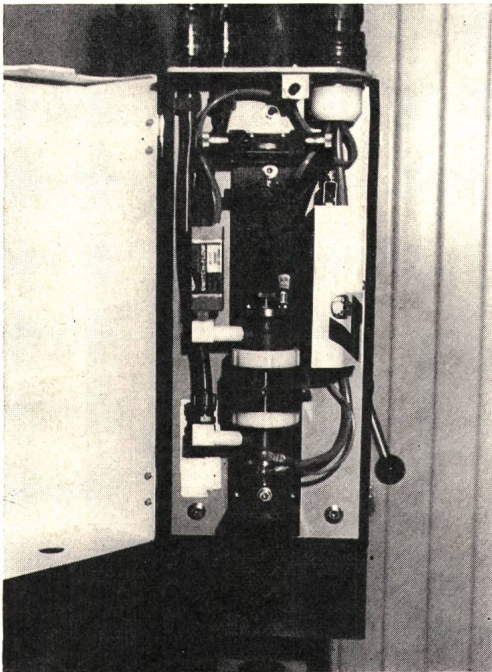


Fig. 9  
Laserkopf LT-1 mit Nd: YAG Kristall

bei erfolgt die Bestückung des Virols automatisch; die Spirale muss jedoch manuell eingelegt werden. Die Jahresproduktion bei 8 h/Tag liegt bei 600 000 Stück. Der Anschaffungspreis einer solchen Maschine beläuft sich auf Fr. 50 000.-. Die Kosten pro Jahr durch Abschreibung, Kapitalverzinsung, Platzbedarf und übrige Unterhaltskosten einschliesslich Kosten der Blitzlampen (600 000 Schweißpunkte entsprechen bei einer mittleren Lebensdauer von 1 Million Pulse 60% einer einzelnen Lampe) resultieren bei Fr. 7600.-. Daraus ergeben sich die maschinengebundenen Kosten von 5.30 Fr./h. Pro Maschine wird eine Hilfskraft benötigt, die nach einigen Stunden Anlernzeit bereits voll in die Produktion eingearbeitet werden kann (Hilfskraft berechnet zu 15.- Fr./h). Auf Grund dieser Kalkulation ergibt sich ein Stückpreis von 7 Rp., was bedeutend billiger ist als die konventionelle Methode.

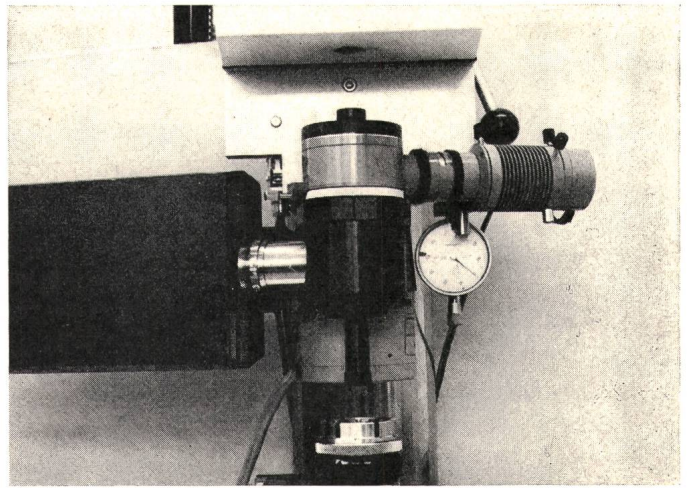


Fig. 10  
Laseroptik kombiniert mit TV-Kamera zur Monitorüberwachung des Prozesses

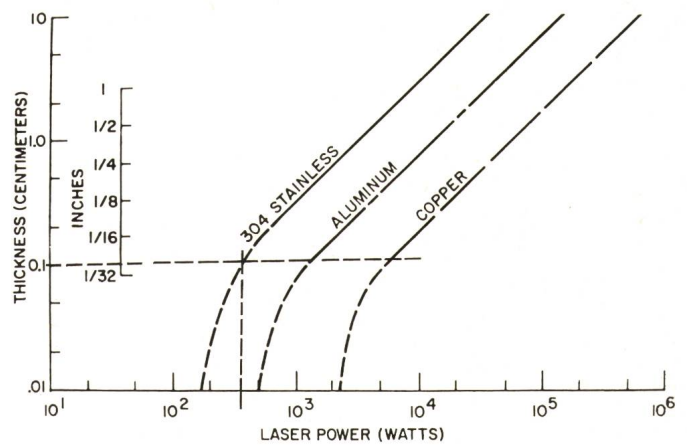


Fig. 11  
Benötigte Laserleistung für die Schweißung von Stahl, Aluminium und Kupfer (Relativmessungen)

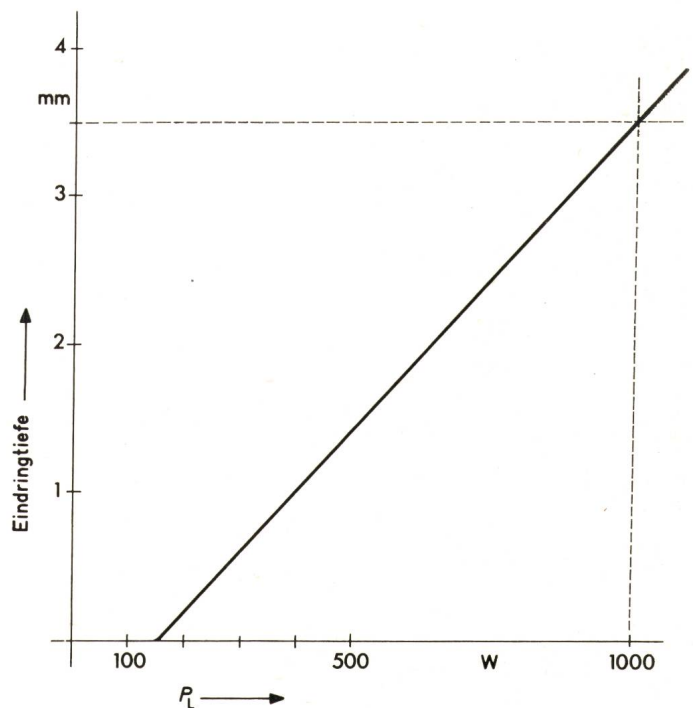


Fig. 12  
Laserleistung in Funktion der Eindringtiefe gemessen mit Nd: YAG Lasersystem  
 $P_L$  Laserleistung



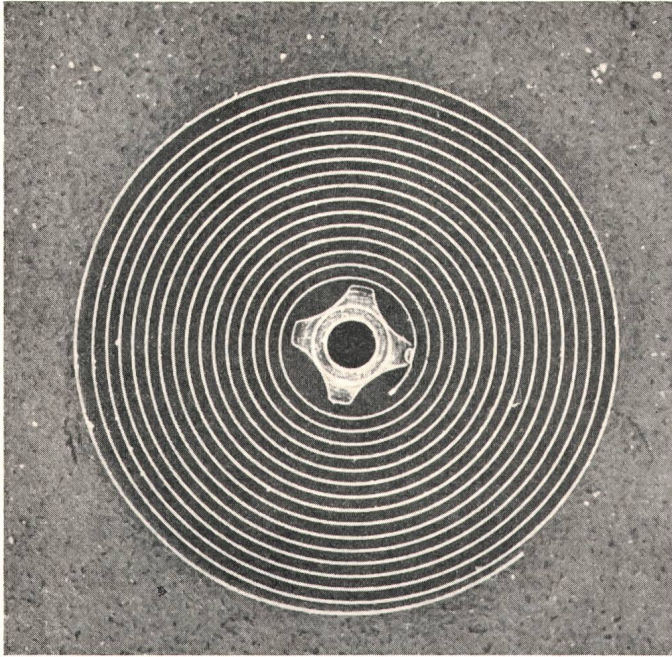


Fig. 13  
Schweissung einer Uhrenspiralfeder

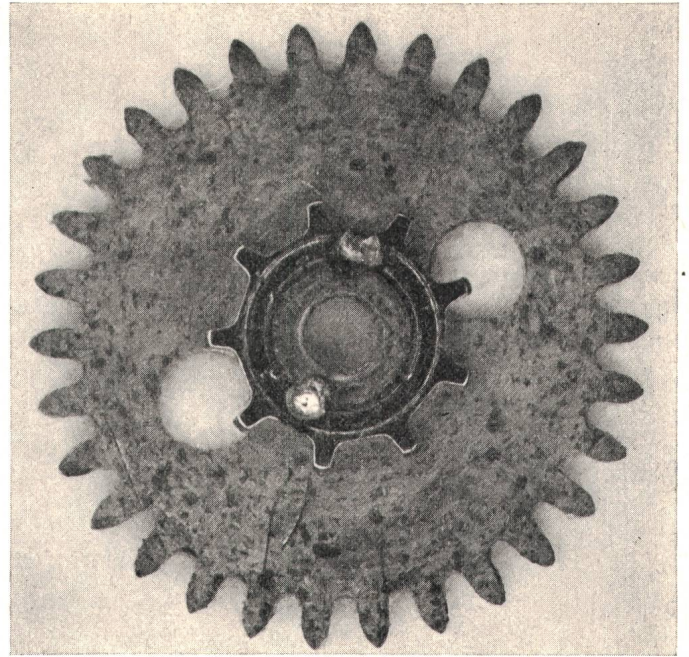


Fig. 16  
Kronenzahnrad

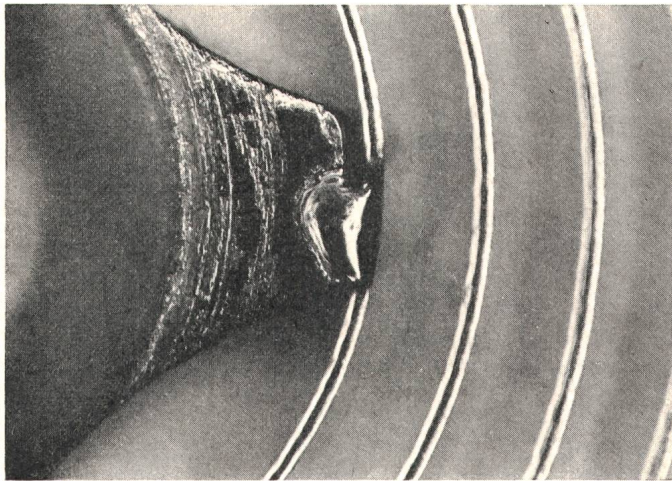


Fig. 14  
Vergrösserte Schweißstelle, Virol-Feder

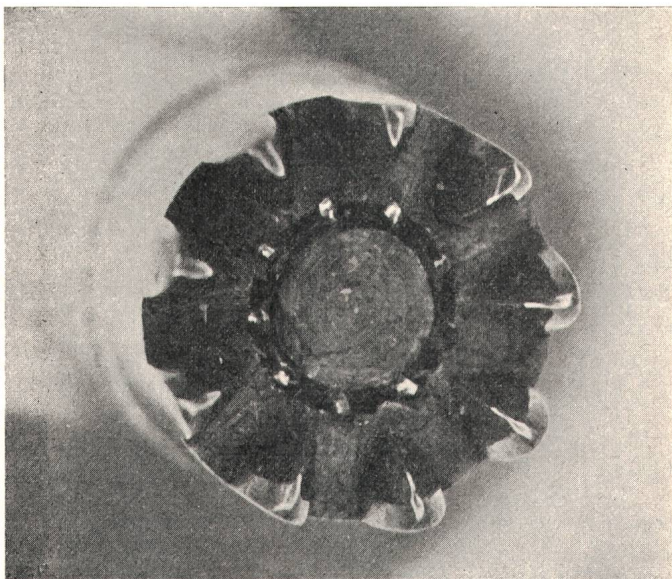


Fig. 15  
Schweissen zweier Miniaturzahnräder

Ein weiteres Beispiel sei am Schweißen zweier Miniaturzahnäder gezeigt (Fig. 15). Der Aussendurchmesser des grösseren Rades beträgt 1,5 mm. Der Schweißprozess ersetzt das Rivieren. Die Vorteile des Laserschweißens sind, dass während der Schweißung kein mechanischer wie auch kein thermischer Kontakt zwischen Schweissvorrichtung und Werkstück vorliegt. Daher kann kein Materialverzug stattfinden, was sich negativ auf das Werkstück auswirkt. Der Anschaffungspreis einer Maschine mit automatischer Beschickung der Schweißstelle beträgt Fr. 70 000.-. Die Jahresproduktion beträgt 1,5 Mill. Stück. Gemäss obigem Kalkulationsschema belaufen sich die totalen maschinenbedingten Kosten auf 7.50 Fr./h. Daraus resultiert ein Stückpreis von 2 Rp. bei einer Maschinenausnutzung von 8 h/Tag.

Fig. 16 zeigt ein Kronenzahnrad mit einem Aussendurchmesser von 5 mm, das mit 8 Schweisspunkten auf eine Achse von 2 mm  $\varnothing$  geschweisst wird. Das Zahnrad wird für eine hohtourige Turbine verwendet. Die benötigte Pulsenergie beträgt ca. 10 J.

#### Zusammenfassung

An Hand der gezeigten Beispiele kann klar demonstriert werden, dass die Lasertechnik für die Materialbearbeitung, insbesondere für das feintechnische Schweißen in der Präzisionsmechanik und in der Elektronikindustrie im weitesten Sinne, verwendbar ist und bereits verwendet wird.

Die grossen Vorteile liegen in den hohen Genauigkeiten, den grossen Produktionszahlen und den geringen Betriebskosten, wie in der hohen Qualität der Schweißungen. Es darf wohl gesagt werden, dass die Lasertechnik vielen neuen Prozessen und Produktionsmitteln erst richtig zum Durchbruch verhalf, vor allem dort, wo hohe Genauigkeiten und die konstant gute Qualität der Massenproduktion wichtig sind, was mit dem Laser ohne weiteres erreicht werden kann.

Adresse des Autors:

R. Remund, Ing.-Techn. HTL, Laser Technik AG, Büren an der Aare.