

**Miyachi Europe B.V.**

Schootense Dreef 21  
NL-5708 HZ Helmond

Tel.: +31 492 542 225

Fax: +31 492 536 222

Email: [webinfo@mec.miyachi.com](mailto:webinfo@mec.miyachi.com)

[www.miyachieurope.com](http://www.miyachieurope.com)

**Autor: Frank Sonnemans und Sander Dorrestein – Entwicklung und Technischer Kundendienst**

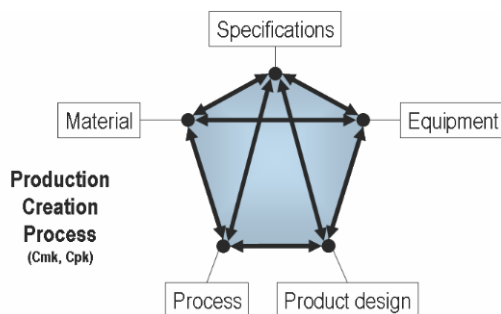
Anspruchsvolle Mikroschweißanwendungen – Lösungen und Parameterentwicklung speziell für gepulste Nd:YAG-Laser.

Laserschweißanwendungen gestalten sich zunehmend komplizierter. Die steigende Tendenz kleinere und preiswertere Produkte herzustellen resultiert oft in der Notwendigkeit, hoch qualitative Laserschweißungen zu erzeugen unter Verwendung gering geeigneter Werkstoffe. Speziell im Automobilbereich werden oft schwer schweißbare Werkstoffe verwendet wie Kupfer, Messing und andere Kupferlegierungen.

Um diese Bauteile zuverlässig schweißen zu können, ist es unabdingbar, Parametersätze mit einem geeigneten Parameterfenster zu entwickeln. Der Einsatz gepulster Nd:YAG-Laser mit Pulsformung kann signifikant diese Parameterfenster vergrößern und somit die Prozesssicherheit erhöhen.

Die Pulsformung ist zurzeit Stand der Technik Sie ermöglicht die optimale Amplitudenform über der Zeit zu finden. Als solche bietet sie eine Anzahl von höchstinteressanten Möglichkeiten. So kann die Pulsformung dazu beitragen, eine hohe Einschweißtiefe bei geringer Pulsenergie zu erreichen. Letzteres ist häufig erforderlich beim Nahtschweißen wärmeempfindlicher Bauteile. Weiterhin kann die Pulsformung zur Wärmebehandlung vor und nach dem Schweißen eingesetzt werden. Damit können die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit verringert und somit Schweißfehler wie Risse, Einschlüsse und Poren reduziert bzw. ganz vermieden werden.

Der Schlüssel zum Erfolg - einen robusten Laserschweißprozess in der Produktion zu haben, liegt darin, in der Entwicklungsphase eines Produktes die Anforderungen für den Laserschweißprozess zu berücksichtigen und dann diese in die Konstruktion des Bauteiles bzw. Produktes einfließen zu lassen. Häufig wird ein Produkt nur auf seine Funktion hin entwickelt. Bei der Entwicklung sind jedoch folgende Kriterien zu berücksichtigen: Laserschweißprozess, Konstruktion des Produktes, Werkstoffeigenschaften und Fertigungsmittel.



Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Herangehensweise bei der Parameterentwicklung für anspruchsvolle Mikroschweißanwendungen mittels gepulstem Nd:YAG-Laser. Das Ziel der Laserapplikationsentwicklung ist, den besten Prozessablauf für die Produktion zu finden.

Von Mikroschweißen spricht man, wenn die Materialdicke bei Flachteilen geringer als 0,5 mm bzw. der Durchmesser von Rundteilen kleiner als 1 mm ist.

### Auswirkungen der Laserparameter

Folgende Überlegungen sollten bei der Entwicklung des Laserschweißprozesses berücksichtigt werden:

- Gesamttoleranzen der Baugruppe das heißt: kein Verzug durch den Schweißprozess.
- Korrosionseffekte durch die Laserschweißung
- Metallurgische Mikrostruktur in der Schmelzzone das heißt: keine Risse, keine Poren sowie keine spröden intermetallischen Phasen

Das Optimieren der Prozessparameter ist wesentlich, um die Anforderungen an das Bauteil zu erfüllen. Der Laserschweißprozess wird durch viele Parameter bestimmt, die wichtigsten im Überblick:

*Tabelle 1: Überblick über die wichtigsten Laserschweißparameter*

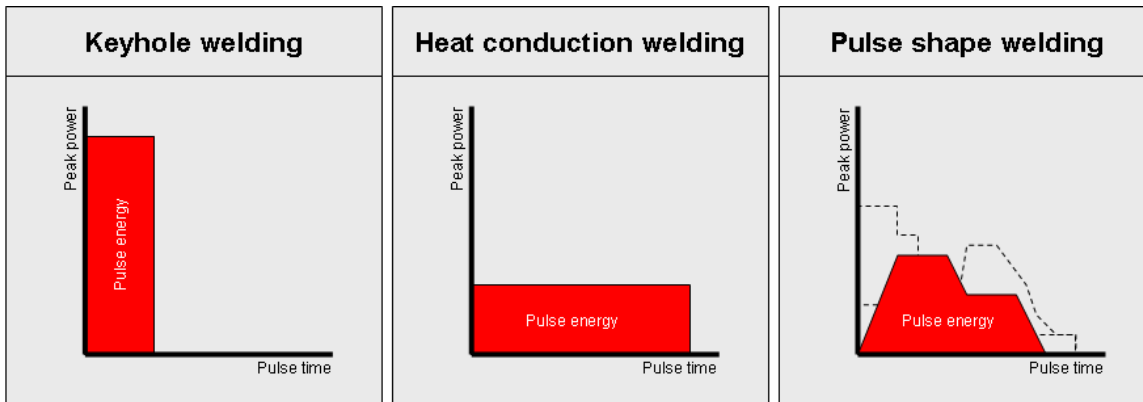
Parameter	Auswirkung	Kommentar
Pulslänge [ms]	Schmelzbadvolumen	Eine Kombination dieser Parameter verändert die Menge des verdampften Materials und kann das übermäßige Verschmutzen der Anlage begünstigen
Pulsspitzenleistung [W]	Schweißtiefe	
Pulsenergie [J]	Schmelzbadvolumen	
Pulsfrequenz [Hz]	Überlappung der Schweißpunkte	hermetisch dichte Nahtschweißung
Fokus-Durchmesser [µm]		~ 1x bis 2x Materialdicke
Fokusenergieverteilung	Eindringtiefe	
Anzahl der Schweißpunkte	Festigkeit der Schweißstelle	
sequenziell/simultan	Verzug	Gesamttoleranz der Baugruppe

Das Ziel der Parameterentwicklung für das Mikroschweißen ist, die beste technische Ausführung des Schweißprozesses zu finden. Die Ausführung des Schweißprozesses wird durch die Werkstoffauswahl, die Konstruktion der Schweißgeometrie des Produktes und das Vorrichtungsdesign bestimmt. Die statistische Zuverlässigkeit des Prozesses muss nachgewiesen und eine entsprechende Laserquelle für die Serienproduktion ausgewählt werden.

Ein Schlüssel zum Erfolg für die Entwicklung eines robusten Produktionsprozesses ist die enge Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklern, Anlagenkonstrukteuren und Laserschweißexperten.

## Laserschweißleistung aufgetragen über die Pulslänge

Drei Hauptgruppen des Laserschweißens werden unterschieden, hauptsächlich angewendet werden das Tiefschweißen und das Wärmeleitungsschweißen. Das Laserschweißen mittels programmierten Pulses kommt bei ca. 20% der Laserschweißanwendungen zum Einsatz.



Key hole welding – **Tiefschweißen**; Heat conduction welding – **Wärmeleitungsschweißen**;  
Pulse shape welding – Schweißen mit Pulsformung; Peak power – Pulsspitzenleistung;  
Pulse energy – **Pulsenergie**; Pulse time – **Pulslänge**

### Tiefschweißen

Schweißen mit hoher Leistungsdichte, also hohe Pulsspitzenleistungen bei kurzen Pulslängen (<5ms) sind typischerweise die Parametereinstellungen beim Tiefschweißen. Dabei ist die Schweißtiefe immer größer als die Schweißnahtbreite. Die hohe Leistungsdichte öffnet die Schmelze durch die Bildung einer Kapillare und ermöglicht somit eine hohe Eindringtiefe. Der Tiefschweißprozess wird immer dann ausgewählt, wenn:

- die Applikation eine hohe Eindringtiefe bei geringer Wärmeeinflusszone erfordert.
- hoch reflektierende Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wie Kupfer oder Aluminium geschweißt werden sollen
- hohe Spaltbreiten überbrückt werden müssen. Beim Tiefschweißen, können Spalte bis ca. 50% der Materialdicke überbrückt werden.

Der Nachteil des Tiefschweißens liegt darin, dass dabei die Teile, die Anlage und die Optiken stärker mit Schweißspritzern und Schmauch kontaminiert werden können. Aufgrund der hohen Schweißenergie wird die Oberfläche des Schweißbades überhitzt und Material verdampft. Der Metalldampf kondensiert nahe der Schweißstelle.

### Wärmeleitungsschweißen

Typischerweise werden beim Wärmeleitungsschweißen niedrige Pulsspitzenleistungen und längere Pulse (>15ms) eingesetzt. Die zum Schmelzen des Materials notwendige Energie wird in das Material durch Wärmeleitung eingebracht, anders als beim Tiefschweißen, wo die Schmelze sich öffnet. Die Eindringtiefe ist sehr gering, sie liegt zumeist unter der Breite der Naht. Das Wärmeleitungsschweißen wird immer dann verwendet, wenn:

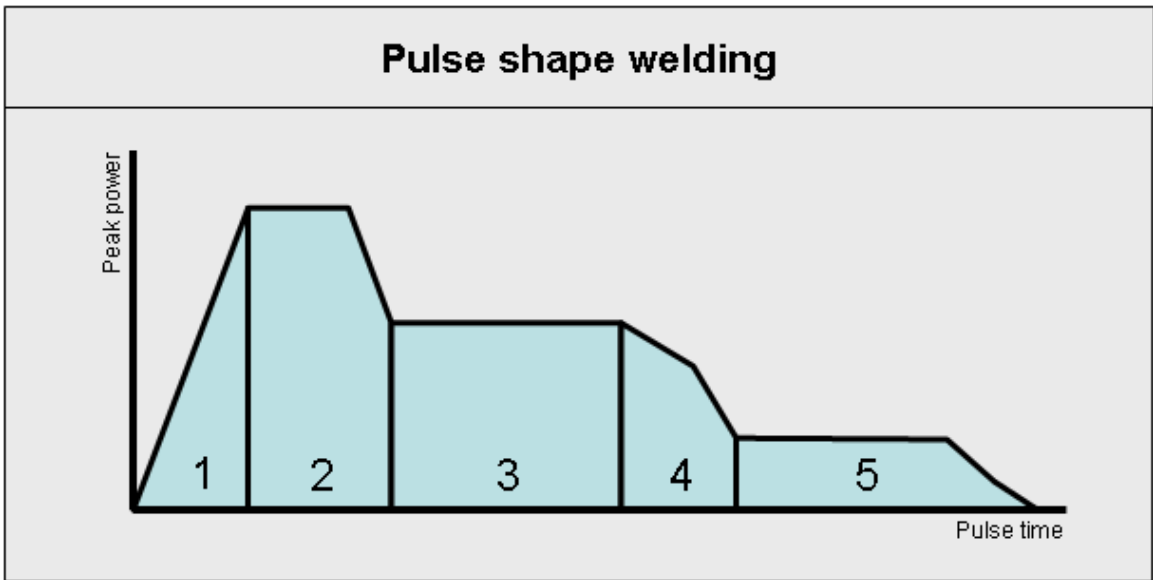
- eine saubere Schweißnaht erforderlich ist
- ein Rohr dicht verschweißt werden soll oder eine hohes Schmelzvolumen gefordert ist

Der Nachteil des Wärmeleitungsschweißens ist, dass Spalte nicht überbrückt werden können.

## Pulsformung

Ein Laser-Puls wird dann als geformt bezeichnet, wenn die Leistung während der Pulsdauer variiert wird. Die Pulsformung ermöglicht das freie Programmieren des Pulses und stellt somit eine Herausforderung dar die beste Pulsform zu finden. Allerdings können mit der Pulsformung Materialkombinationen geschweißt werden, für die weder Tief- noch Wärmeleitungsschweißen in Frage kommen. Speziell entwickelte Pulsformen ermöglichen optimale Eindringtiefen ohne starke Kontamination und Schweißspritzer. Mittels geeigneter Pulsformen können auch schwer schweißbare Materialkombinationen verbunden werden. In anderen Worten, Pulsformung vereint die besten Eigenschaften des Tiefschweißens und des Wärmeleitungsschweißens.

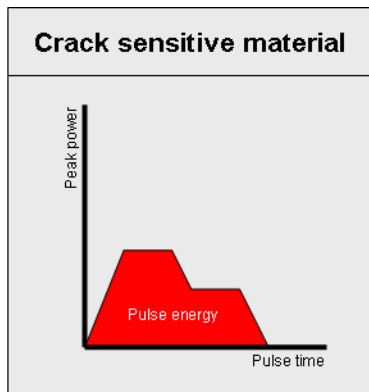
Der Schweißpuls kann in fünf Phasen mit je einer eigenen Pulsform unterteilt werden.



1. Initiieren des Schmelzprozesses in Material A (Laserabsorption)
2. Beginn der Schmelzbadvergrößerung des Materials A
3. Initiieren des Schmelzprozesses zwischen Material A und Material B
4. Stabilisieren des Schweißbades zwischen A und B
5. Kontrolliertes Abkühlen des Schweißbades

Die Pulsformung hängt immer davon ab, was durch die Laserschweißung erreicht werden soll. Dabei kann es sich um ein Material oder eine Materialkombination handeln, die ein kontrolliertes Abkühlen notwendig machen. Auch Produkttoleranzen, die zu einem Spalt zwischen den Teilen führen oder ein Werkstoff, der eine temperaturabhängige Laserstrahlabsorption hat, kann eine spezielle Pulsformung erfordern.

## Typische Pulsformen



Für rissanfällige Werkstoffe werden üblicherweise Pulsformen verwendet, die eine Rampe am Beginn des Pulses aufweisen, um Wärmeshocks zu vermeiden. Am Ende des Pulses werden wieder Rampen eingesetzt, die ein kontrolliertes Abkühlen ermöglichen.

Edelstähle mit einem hohen Kohlenstoffgehalt (>0,25%) sind rissanfällig. Materialkombinationen können zu spröden Phasen führen. Durch eine kontrollierte Abkühlphase können thermische Schrumpfspannungen verringert werden. Normalerweise erfordert das Laserschweißen eine hohe Genauigkeit der Teile. Ein guter Wärmekontakt zwischen den zu schweißenden Teilen ist notwendig für einen guten Schweißprozess. Je

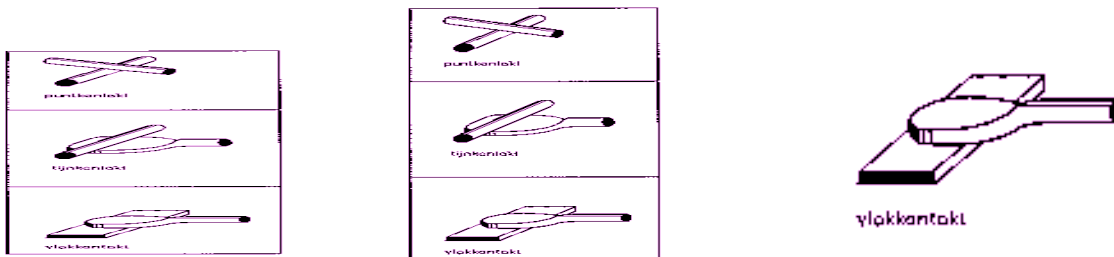
kleiner die zu fügenden Teile werden, desto schwieriger wird es solch hohe Bauteilgenauigkeit zu gewährleisten. Bei Anwendung der Pulsformung können Spalte überbrückt werden bis zu 100% der Materialdicke. Der Puls beginnt mit niedriger Pulsleistung für ca. 15 ms, um Material A aufzuschmelzen. Nachdem eine Schmelze erzeugt wurde, wird die Spitzenleistung schlagartig erhöht, um die Schmelze in Richtung Material B zu „drücken“. Nachdem Material A Material B berührt hat, wird die Leistung allmählich reduziert, um die Schmelze zu stabilisieren und abzukühlen.

Für hoch reflektierende Materialien gestaltet sich die Energieeinkopplung als schwierig, da der größte Teil der Energie durch das Material reflektiert wird. Eine hohe Pulsspitzenleistung wird benötigt, um Energie in das Werkstück einzukoppeln und eine Schmelze erzeugen zu können. Für die meisten hoch reflektierenden Materialien gilt, dass die Absorption von der Materialtemperatur abhängt. Das heißt, die Absorptionsrate steigt rapide an, sobald das Material aufgeschmolzen ist. Wenn Laserpulse mit konstanter Spitzenleistung eingesetzt werden, wird die Schmelze überhitzt und flüssiges Metall wird herausgeschleudert. Demzufolge ist es notwendig, Pulsformung einzusetzen, um die Spitzenleistung schnell zu reduzieren, sobald die Schmelzphase erreicht wurde. Die Leistung wird reduziert, das Schmelzbad vergrößert sich bei niedriger Pulsspitzenleistung und langer Pulsdauer.

### Schweißgeometrien

Ein Schlüsselkriterium des Laserschweißens ist die Konstruktion der Fügepartner. Es muss genügend Material für die Schweißung vorhanden sein, da normalerweise kein Zusatzmaterial verwendet wird. Ein weiterer Aspekt ist der gute thermische Kontakt zwischen den zu fügenden Teilen. Der größte Teil der Energie wird in dem Teil absorbiert, auf das der Laserstrahl zuerst auftrifft. Das andere Teil wird nur durch Wärmeleitung erwärmt. Ein guter Kontakt zwischen beiden Teilen ist daher notwendig.

Nachfolgende Bilder zeigen typische **Laserschweißkonfigurationen**:



- Punktkontakt      Schlechter thermischer Kontakt, nicht empfohlen für Laserschweißen
- Linienkontakt      Moderater thermischer Kontakt, kann unter Umständen verwendet werden
- Flächenkontakt      Guter thermischer Kontakt, bevorzugt beim Laserschweißen

Tabelle 2: Grenzen und Kriterien einer Überlappverbindung sowie Kehlnaht im Überlapp

	Überlappverbindung	Kehlnaht im Überlapp
Materialdicke	0.020 – 0.5mm	0.1 – 0.7mm
Maximalspalt	40 – 50% der Materialdicke	60 – 70% der Materialdicke
Positioniergenauigkeit	Unkritisch	±0.1mm Randabstand
Verzug	< 4µm ...ist möglich	~ 10µm
Visuelle Inspektionsmöglichkeit	Schwierig	Gut



### Hoch reflektierende, gut wärmeleitende Werkstoffe

Der Schweißprozess für hoch reflektierende Werkstoffe mittels Nd:YAG-Laser ist besonders anspruchsvoll. Der größte Anteil der Energie wird reflektiert. Einerseits bedeutet die hohe Reflektion, dass eine hohe Pulsspitzenleistung erforderlich ist, um eine Schmelzung erzeugen. Andererseits lässt die hohe Wärmeleitfähigkeit es nicht zu, dass sich das Schmelzbad ausdehnen kann. Typischerweise wird eine hohe Pulsspitzenleistung benötigt, um die Reflektion zu überwinden. Weiterhin wird eine kurze Pulszeit eingesetzt, um ein Überhitzen zu vermeiden. Diese Vorgehensweise resultiert in niedrigen Eindringtiefen (siehe Bild 3). Die Anwendung der Pulsformung verbessert die Eindringtiefe. Zuerst wird die Reflektion mit einem kurzen, energiereichen Puls überwunden, danach wird entsprechend dem Wachstum der Schmelze stufenweise die Leistung reduziert, um ein Überhitzen zu vermeiden

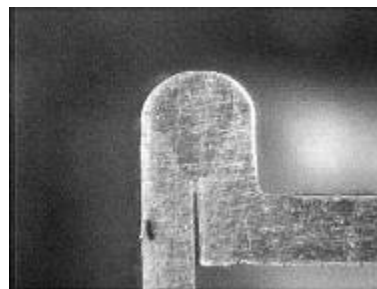
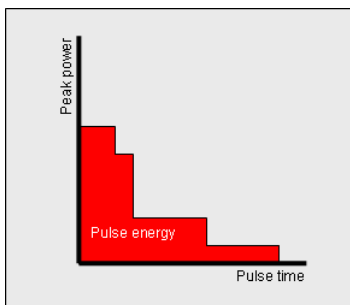


Bild 3: Nahtschweißen in Aluminium (Standard Tiefschweißung)      Bild 4: Nahtschweißen in Aluminium (Pulsformung)

### Glas-Metall-Verbindung

Bei dieser Applikation handelt es sich um das Versiegeln von Glasdurchführungen in einem Hochvakuum. Der Laserversiegelungsprozess ist eine Balance zwischen ausreichender Energie, um ein hinreichend großes Schmelzbad für das Versiegeln des Drahtes zu erzeugen, ohne die Schmelze zu überhitzen. Beim Überhitzen der Schmelze in einer Unterdruckkammer kann es zum Kochen des flüssigen Glases kommen und es bilden sich grosse Blasen (siehe Bild 5).

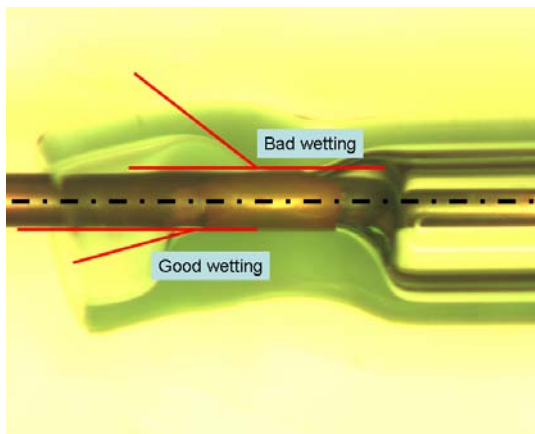
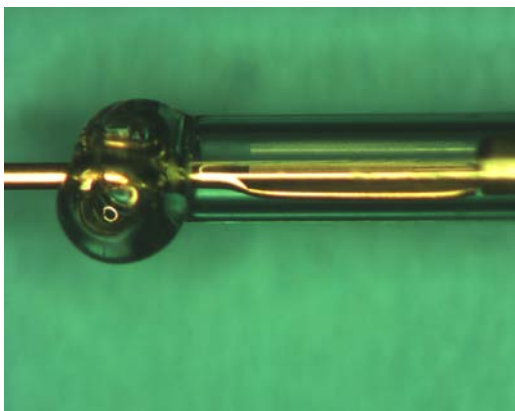


Bild 5: Überhitzen Glas

Bild 6: Gute schlechter Benetzung

Eine gute Benetzung des geschmolzenen Glasmaterials auf der Durchführung ist essentiell für eine vakuumdichte Versiegelung. Die Benetzung hängt von der Temperatur der Schmelze und des Drahtes ab. Proben mit guter und schlechter Benetzung wurden angefertigt (siehe Bild 6). Um eine gute lokale Balance der aufgebracht Energie zu erreichen, wurde ein Galvoscaner verwendet, um den Schweißpunkt über die Probe zu bewegen. Dadurch wurde die Temperatur des Glasrohres gleichmäßig erhöht.

Um die Temperatur auszubalancieren wurde als Grenzwert der lokal eingebrachten Energie die Blasenbildung im Glas bestimmt (Laserprozessparameter: Pulsspitzenleistung, -länge und -frequenz). Die globale Temperatur wird bestimmt durch leckdichte Versiegelung ohne Blasenbildung. Letzteres wird durch eine Optimierung des Galvoscan-Profiles erreicht (siehe Bild 7)

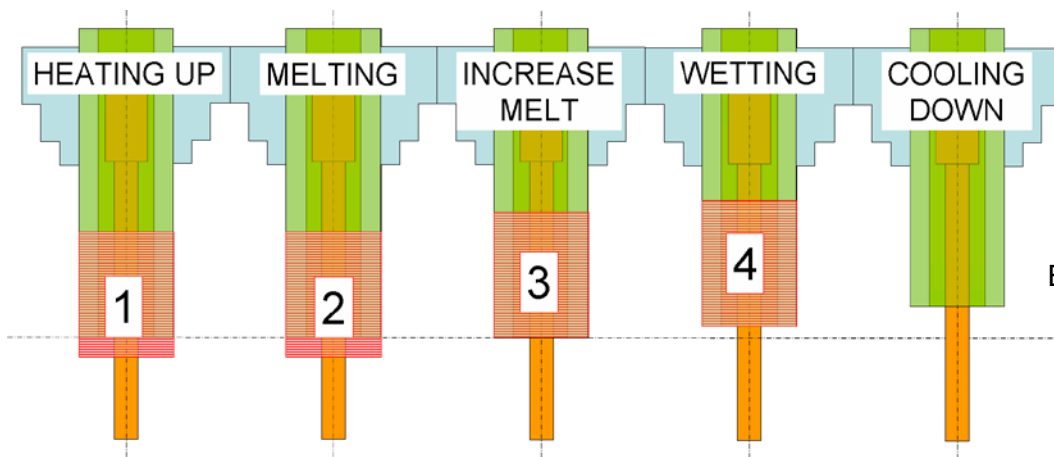


Bild 7: Laserscanner-Programm

Heating up = **Aufheizphase**; Melting = Schmelzvorgang; Increase melt = weiteres Schmelzen; Wetting = **Benetzen**; Cooling down = **Abkühlphase**

Die Scannerdateien bestehen aus 4 gleichen rechteckigen Formen, die über das Glasrohr verfahren werden.

**Scan-Bereich 1** wird auf das Ende des Glasrohres positioniert und erwärmt das Glasrohr bis gerade unterhalb der Schmelztemperatur.

**Scan-Bereich 2** wird auf denselben Bereich wie Scan-Bereich 1 gerichtet und bringt das Ende des Glasrohres zum Schmelzen.

**Scan-Bereich 3** wird nach oben verschoben, um dem Weg der Schmelze zu folgen. Dabei wird das Schmelzvolumen vergrößert. Nach dem Schmelzen des Glasrohres tendiert die Schmelze dazu, sich zurückzuziehen. In dieser Phase berührt die Schmelze den Draht. Zu diesem Zeitpunkt hat noch keine Benetzung stattgefunden.

**Scan-Bereich 4** wird nach oben versetzt, um dem Schmelzbereich zu folgen. Währenddessen wird die Glastemperatur erhöht um die Benetzung zwischen Draht und geschmolzenem Glas zu initiieren. In Experimenten wurde nachgewiesen, dass das der kritische Punkt für die Blasenbildung ist. Wenn die Temperatur entweder auf der Glasoberfläche oder am Interface zwischen Glas und Draht zu hoch ist, entstehen Blasen im Glas.

Im Bereich 5 kühlt sich das Glasrohr ab, Während dieser Phase ist der Laser abgeschaltet.

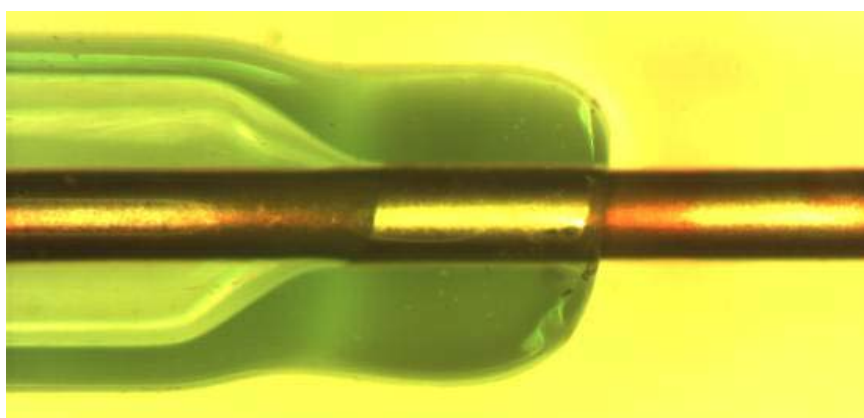


Bild 8: Laserversiegeltes Glasrohr auf Metalldraht - versiegelt mit optimierten Prozessparametern

## Zusammenfassung

Laserschweißanwendungen werden zunehmend komplizierter. Die steigende Tendenz kleinere und preiswertere Produkte herzustellen resultiert oft in der Notwendigkeit, hoch qualitative Lasernähte zu erzeugen unter Verwendung gering geeigneter Werkstoffe. Speziell im Automobilbereich werden oft schwer schweißbare Werkstoffe wie Kupfer und Messing verwendet.

Für einen zuverlässigen Schweißprozess ist es unabdingbar, geeignete Pulsprogramme mit entsprechend ausreichenden Parameterfenstern zu entwickeln. Nd:YAG-Laser, die eine Pulsformung erlauben, können signifikant Parameterfenster vergrößern und somit die Prozesssicherheit erhöhen.

Die Pulsformung ist zurzeit Stand der Technik, um die optimale Amplitudenform über der Zeit zu finden. Als solche bietet sie eine Anzahl von höchstinteressanten Möglichkeiten. So kann die Pulsformung dazu beitragen, eine hohe Einschweißtiefe bei geringer Pulsenergie zu erreichen. Letzteres ist häufig erforderlich beim Nahtschweißen wärmeempfindlicher Bauteile. Weiterhin kann die Pulsformung zur Wärmebehandlung vor und nach dem Schweißen eingesetzt werden. Damit kann die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit verringert und somit Schweißfehler wie Risse, Einschlüsse und Poren reduziert bzw. ganz vermieden werden.

**Miyachi Europe B.V.**  
Schootense Dreef 21  
NL-5708 HZ Helmond



Tel.: +31 492 542 225  
Fax: +31 492 536 222  
Email: [webinfo@mec.miyachi.com](mailto:webinfo@mec.miyachi.com)  
[www.miyachieurope.com](http://www.miyachieurope.com)