

## Neuere Ergebnisse zum Schweißen von Eisenbasiswerkstoffen mit Faserlasern

Berndt Brenner, Gunther Göbel, Jens Standfuß, Uwe Stamm

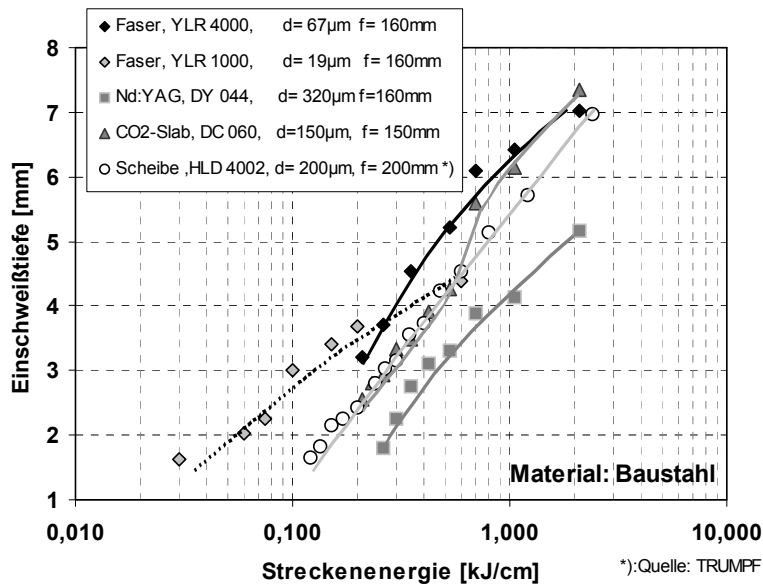
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden

Aus Sicht des Anwenders gibt es bei der Beurteilung der Faserlasertechnologie noch eine Vielzahl offener Fragen, was auch der Einführung dieser Strahlquellen in der Industrie hinderlich ist. Durch die höheren Strahlqualitäten wird etwa eine signifikante Verschiebung der bisher üblichen Parameterfenster ermöglicht, deren Einfluss auf die Rissbildung an heiß- oder kaltrissempfindlichen Werkstoffen jedoch bisher kaum betrachtet wurde. Weiterhin sind kaum Kostenbetrachtungen bekannt, die eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Faserlasereinsatzes für konkrete Anwendungsfälle ermöglichen. Die Betrachtung an Vergütungsstählen und Edelstählen zeigt, dass sowohl hinsichtlich der Kaltriss- als auch Heißrissbildung nur geringe Unterschiede im Vergleich zu CO<sub>2</sub>-Lasern hoher Strahlqualität auftreten. Vorteile des Faserlasers ergeben sich bei Mischverbindungen, bei denen über schlankere, flankenparallele Nähte eine Aufmischung ungünstiger Legierungselemente reduziert werden kann. Dies wird am Beispiel einer Gusseisen-Stahl-Mischverbindung gezeigt. Eine vergleichende Abschätzung der Kosten unter Nutzung beider Lasertypen wird an einem konkreten Beispiel aus dem PKW Antriebsstrang für typische Stückzahlenszenarien am Beispiel Schaltgetriebe durchgeführt.

### 1 Einleitung

Faserlaser stellen im Hochleistungslaserbereich seit ihrer erst kürzlich erfolgten Einführung eine ernstzunehmende Alternative zu etablierten Lasersystemen dar. Untersuchungen zu Schweißergebnissen, die mit diesem Strahlquellentyp in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Einrichtungen durchgeführt wurden, zeigen dabei ein großes Potential dieses Laserprinzips auf. Trotz dieser i. d. R. recht positiven Einschätzungen ist eine breite Einführung dieses Strahlquellentyps im industriellen Umfeld bisher noch nicht erfolgt. Bei näherer Betrachtung der verfügbaren Untersuchungsergebnisse zeigt sich, dass viele aus Sicht des Anwenders wichtige Fragen bisher eher eine untergeordnete Rolle gespielt haben, so dass somit noch erhebliche Unsicherheiten bei der Beurteilung der Technologie bestehen. So wird auf die durch die hohen Strahlqualitäten möglichen höheren Schweißgeschwindigkeiten oft hingewiesen, inwiefern dadurch aber die Rissbildung beeinflusst wird, ist an den für Grundlagenuntersuchungen meist verwendeten gut schweißbaren Werkstoffen nicht erkennbar. Ebenso ist eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wichtig, da bisher kaum Erfahrungen der etablierten Laseranwender bezüglich der konkreten Kosten existieren.

Aufgrund der hohen Strahlqualität von Faserlasern ist eine Steigerung der Einschweißtiefe bei gleichzeitig geringerer Nahtbreite möglich, s. Bild 1. Daher wird die Einführung dieses Lasertyps mittelfristig eher auf Gebiete konzentriert sein, die insbesondere schlanke Schweißnähte bei hohen Schweißgeschwindigkeiten erfordern.



**Bild 1:** Vergleich der Einschweißtiefe für verschiedene Lasersysteme in Abhängigkeit der Streckenenergie

Daher wurde ein Vergleich mit CO<sub>2</sub>-Lasern hoher Strahlqualität durchgeführt, welche bisher in diesen Anwendungsgebieten (PKW-Antriebsstrang etc.) häufig eingesetzt werden. Betrachtet werden dabei einerseits die Kaltrissbildung an Vergütungsstähle sowie der Einfluss von Axialrundnähten als auch die Heißrissempfindlichkeit von Edelstählen sowie der Einfluss auf die Rissbildung an Mischverbindungen. Die anschließende Abschätzung der Kosten wird für die gleichen Lasertypen durchgeführt.

## 2 Einfluss der höheren Strahlqualität auf die Rissbildung

### 2.1 Einflussfaktoren auf die Rissbildung

Eine Aussage, ob und wie sich die Wahrscheinlichkeit für Nahtfehler, speziell Risse, durch den Einsatz eines Faserlasers beeinflussen lässt, ist nicht trivial. Die pauschalisierte Annahme, dass allein durch den geringeren Energieeintrag zwangsläufig die summierte Schrumpfungslast einer Naht geringer wird, und damit die Triebkraft für alle Rissarten zurückgeht, ist zu vereinfachend. Werden Schweißparameter eingestellt, die die höhere Strahlqualität ausnutzen, beeinflusst dies mehrere Faktoren. Die wichtigsten sind dabei die Streckenenergie  $E$ , die Leistungsdichte  $p$ , die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  und die Nahtgeometrie  $G$ . Diese Faktoren wirken sich wiederum auf die Ursachen der Rissbildung aus. Um typische Szenarien bei der Rissbildung an Bauteilen aus Stahl zu betrachten, reicht eine reine Trennung in Heiß- und Kaltrisse nicht aus. Zwar lassen sich letztendlich alle Risse in beide Kategorien einordnen, eine Sonderstellung kommt aber Mischverbindungen und Rissen in sehr steifen Bauteilen zu, da hier zusätzliche Faktoren in die tatsächliche Rissbildung eingreifen. **Tabelle 1** zeigt eine entsprechende Übersicht.

**Tabelle 1** Rissursachen und ihre Beeinflussbarkeit durch die Schweißparameter Streckenenergie  $E$ , Leistungsdichte  $p$ , Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  und Nahtgeometrie  $G$ .

Rissart	Faktoren, welche die Rissneigung begünstigen	Beeinflussbar durch...
Kaltrisse	chem. Zusammensetzung, besonders: Kohlenstoffgehalt	
	Abkühlzeit/-rate	$E, v_s$
	Transiente Spannungsentwicklung	$E, v_s$
	Nahtvolumen/-geometrie	$E$
Heißrisse	chem. Zusammensetzung	
	Größe Temperaturintervall der Sprödigkeit (TIS)	
	Transiente Spannungsentwicklung im TIS	$E$
	Schweißgeschwindigkeit	$v_s$
Risse in Mischverbindungen	chem. Zusammensetzung beider Materialien	
	metallurgische Verträglichkeit, Löslichkeiten etc.	
	Volumenanteile der Fügepartner in der Naht	$G, p, v_s$
	Nahtvolumen und -geometrie	$G, p, v_s$
	Gleichmässigkeit der Mischung	$G, p, v_s$
Risse durch Bauteilspannungen	Steifigkeit des Bauteils, Nahteinspannung	
	Schweißfolge	
	Schrumpfungsbelastung (Dehnungen/Spannungen)	$E, p, v_s$
	Nahtvolumen	$E, p, v_s$

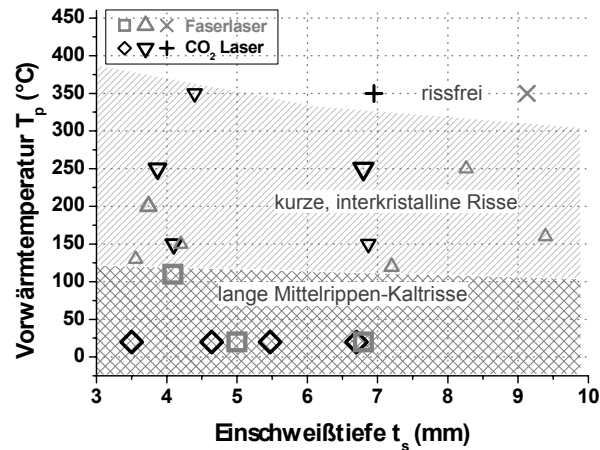
Inwiefern jeweils eine positive oder negative Wirkung hinsichtlich Rissempfindlichkeit zustande kommt, ist jedoch nicht direkt mittels der o. g. Kriterien festlegbar. Eine Beurteilung soll daher anhand von Vergleichsexperimenten erfolgen.

## 2.2 Experimentelle Untersuchung zur Kaltrissneigung

Als erstes wurden Einschweißversuche mit Vorwärmung am im Bereich PKW-Antriebsstrang weit verbreiteten Vergütungsstahl C45 durchgeführt. Eine prozessintegrierte, lokale induktive Vorwärmung ermöglicht dabei das prozessichere, rissfreie Laserstrahlschweißen dieses gut härtbaren Stahls, da bereits eine Kurzzeitwärmebehandlung den Martensitanteil in der Naht senken kann [1]. Das Niveau der Vorwärmtemperatur gibt dabei an, bis zu welchem Grad der Martensitanteil gesenkt werden muss, um eine Aufreißen zu verhindern. Es ist somit als Indikator für die Rissneigung einer Naht nutzbar.

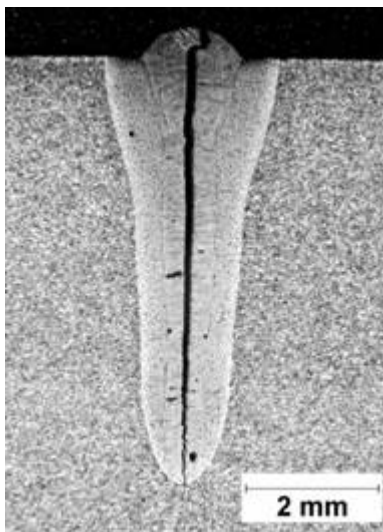
Das Diagramm in Bild 2 zeigt die Rissanfälligkeit für den Vergleich eines diffusionsgekühlten  $\text{CO}_2$ -Lasers ( $\text{SPP} < 3,5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ) mit einem Faserlaser ( $\text{SPP} < 2,5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ) bei Variation von Vorwärmung und Einschweißtiefe. Die Einschweißtiefe wurde dabei mithilfe der Schweißgeschwindigkeit variiert, die Laserleistung blieb in allen Versuchen konstant bei 4 kW. Die entstehende Rissverteilung kann grob in drei Bereiche eingeteilt werden: bei sehr geringen Vorwärmtemperaturen entstehen große Mittelrippenrisse, im Bereich von  $120^\circ\text{C}$  bis  $300^\circ\text{C}$  treten noch kleinere Risse zwischen den Körnern auf und bei noch höheren Vorwärmtemperaturen verschwinden die Risse vollständig.

Obwohl eine geringe Reduktion der absoluten Risslängen im Bereich der kurzen Risse bei Nutzung des Faserlasers sichtbar ist (dargestellt über die Symbolgröße), sind die im Bild 2 gekennzeichneten Grenzen des jeweiligen Rissbereiches für beide Lasertypen gleichermaßen gültig.

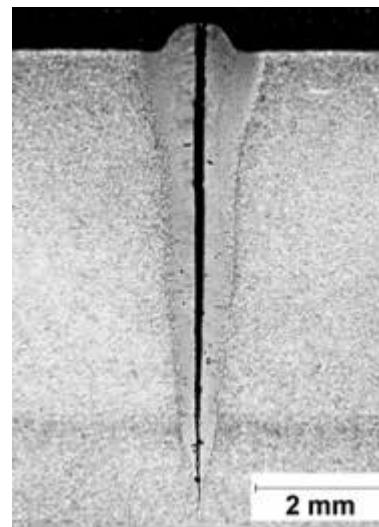


**Bild 2:** Rissbildung in Abhängigkeit von Vorwärmtemperatur und Einschweißtiefe bei Nutzung von CO<sub>2</sub>-Laser bzw. Faserlaser,  $P_L$ : 4 kW,  $v_s$ : variabel

Grundsätzlich ist also keine signifikante Änderung der Rissbildung an diesen Stählen durch Wechsel des Lasertyps von CO<sub>2</sub> auf Faserlaser zu erwarten. Interessante Hinweise auf die Wichtigkeit der o. g. Faktoren ergibt eine Detailbetrachtung der Rissaufweitung (nicht Länge!) der Mittelrippenrisse: Obwohl die Nahtquerschnittsfläche der Faserlasernahte aufgrund der deutlich gesteigerten Schweißgeschwindigkeit signifikant geringer war, traten i. d. R. gleich oder weiter geöffnete Risse auf, als dies bei den CO<sub>2</sub>-Laser Nähten der Fall war, s. Bild 3.



$P_L = 4 \text{ kW}$ ,  $v_s = 1,8 \text{ m / min}$



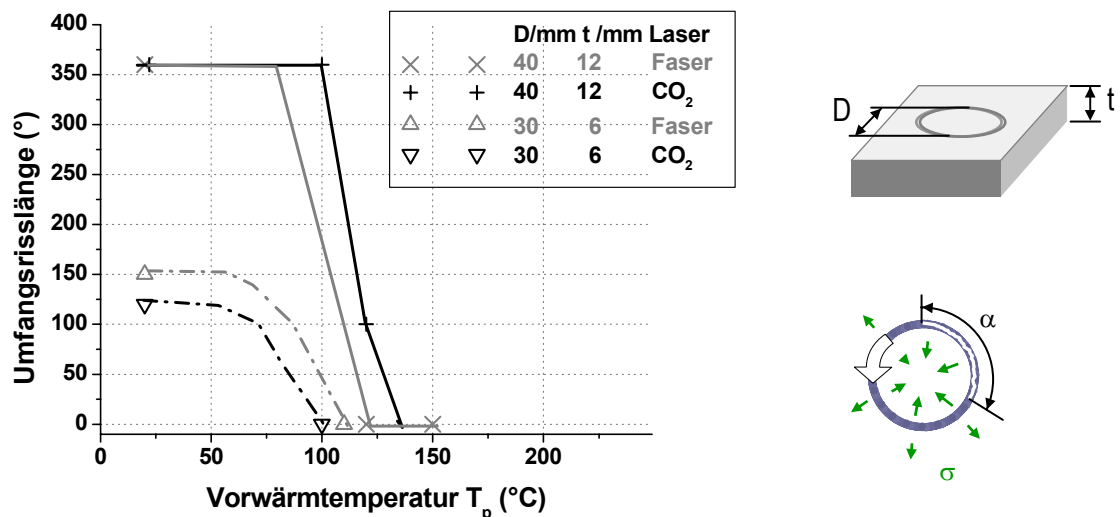
$P_L = 4 \text{ kW}$ ,  $v_s = 3 \text{ m / min}$

**Bild 3:** Vergleich der Mittelrippenrissbildung bei annähernd gleicher Nahttiefe bei Nutzung eines CO<sub>2</sub>-Lasers (links) bzw. eines Faserlasers (rechts)

Dies ist auf den ersten Blick unlogisch, sollte doch eine schmalere Naht entsprechend weniger Schrumpfspannungen in Querrichtung aufweisen und damit weniger aufgeweitet werden. Da die Verringerung der Nahtbreite bei gleicher Tiefe jedoch über eine (verfahrenstechnisch wünschenswerte) Geschwindigkeitssteigerung erreicht wurde, ändert sich auch die Temperaturverteilung und deponierte Wärmemenge und damit die Festigkeitsverteilung in der

Nahtumgebung. Für die Rissbildung ist eine signifikante Aufhärtung der Naht erforderlich, sie setzt also erst deutlich unterhalb der Martensit-Start-Temperatur  $M_S$  ein. Im Experiment war das schlagartige Aufreißen hörbar, meist mehr als 10-15 Sekunden nach Vollendung der Nähte, teilweise auch erst Minuten später. Daher spielt die bis dahin erfolgte plastische Relaxation der Schrumpfspannungen um die Naht eine Rolle. Eine Erklärungsmöglichkeit für die stärkere Rissaufweitung bei schlankeren Nähten ist daher in der gespeicherten elastischen Energie in der Nahtumgebung zu suchen: Ist hier das Umgebungsmaterial kälter geblieben, ist der elastische Spannungsanteil höher, da weniger Schrumpfspannungen plastisch relaxieren können. Kommt es zur Rissbildung, ist die Rissöffnung größer, bis sich ein neues Spannungsgleichgewicht einstellt.

Damit wird deutlich, dass die Wirkung der höheren Strahlqualität auf die Rissbildung komplexer ist, als dies auf den ersten Blick scheint. Besonders die Bauteilgeometrie kann durch ihren Einfluss auf das thermomechanische Verhalten der Naht während der Erstarrung zu wesentlichen Änderungen führen. Daher wurde in einer weiteren Experimentreihe der als kritisch bekannte Fall der Axialrundnähte untersucht. Hier werden die Wirkungen der Rissursachen durch die Summierung der Schrumpfkkräfte entlang der Naht thermomechanisch verstärkt, indem bereits geschweißte Bereiche eine zusätzliche Zugspannung auf im Kreis gegenüberliegende, später geschweißte Bereiche ausüben. Die verwendete experimentelle Anordnung der senkrechten Einschweißung eines Kreises in ein Blech zur Charakterisierung der Rissneigung ist ähnlich dem in der Literatur als Circular-Patch-Test bekannten Heißbristest [2]. Bild 4 zeigt die Darstellung der gemessenen Risslänge entlang der Naht in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur für beide Laserquellen. Da die Wirkung auch vom Durchmesser  $D$  der Naht abhängt, wurden die Ergebnisse an verschiedenen Durchmessern ermittelt und sind entsprechend dargestellt. Als Material wurde wieder der Vergütungsstahl C45 verwendet.

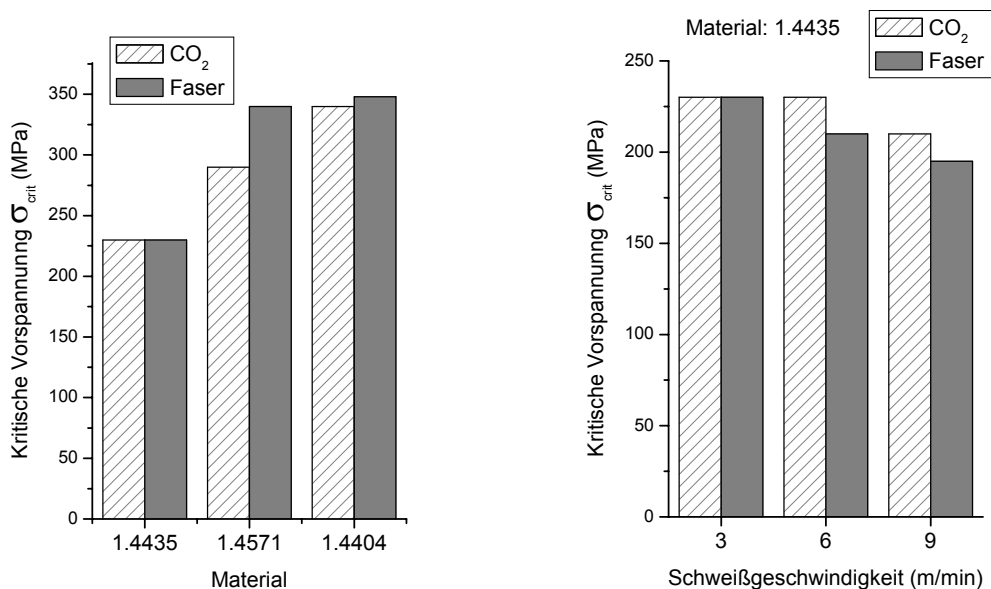


**Bild 4:** Kaltrissbildung an Kreisnähten in Testblechen aus dem Vergütungsstahl C45 bei verschiedenen Vorwärmtemperaturen, Vergleich der Ergebnisse eines CO<sub>2</sub>- bzw. Faserlasers

Auch hier zeigt sich keine Verbesserung der Ergebnisse durch Einsatz eines Faserlasers, die Ergebnisse beider Systeme liegen eng beieinander.

### 2.3 Experimentelle Untersuchung zur Heißrisseigung

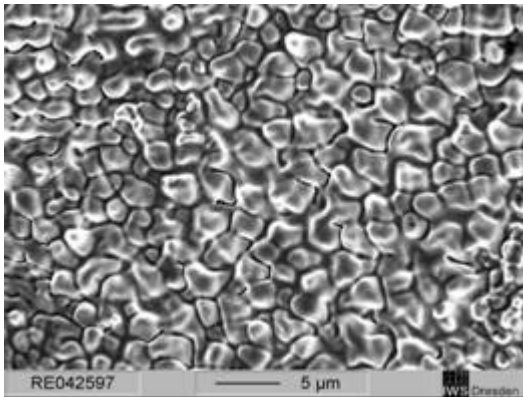
Heißrisse unterscheiden sich zu den in dem vorangegangenen Abschnitt untersuchten Kaltrissen deutlich in ihren Ursachen, ihrem Entstehungszeitpunkt und der Rissform, da sie im Hochtemperaturbereich durch flüssige bzw. geschwächte Korngrenzen entstehen. Insofern sind die bereits getroffenen Aussagen zum Einfluss der Strahlqualität auf die Rissbildung nicht auf diese Rissform übertragbar. Da Heißrisstests mit selbstbeanspruchten Proben aufgrund der kleineren und im Bauteil liegenden Risse deutlich schwerer auszuwerten sind, wurde ein Heißrisstest mit fremdbeanspruchten Proben, der sog. Sigmajig-Test verwendet [3]. Die Probebleche werden dabei zur Analyse in einer Zugvorrichtung auf ein Spannungsniveau  $\sigma$  vorgespannt und anschließend quer zur Zugrichtung geschweißt. Durch Variation von  $\sigma$  lässt sich so ein minimales Spannungsniveau finden, bei dem eine Rissbildung einsetzt, dieses Niveau  $\sigma_{crit}$  wird als Kriterium für die Rissempfindlichkeit verwendet. Als Testmaterialien wurden 4 mm starke Chrom-Nickel-Stahlbleche eingesetzt.



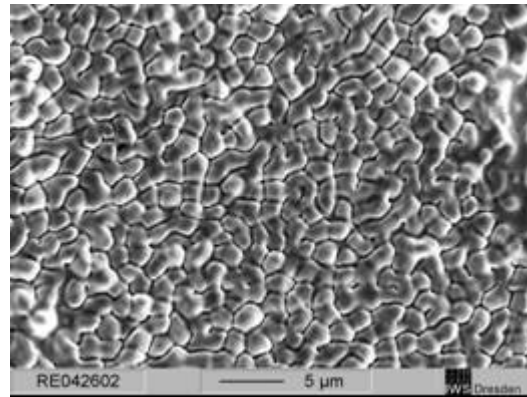
**Bild 5:** Abhängigkeit der kritischen Rissspannung vom Material bzw. Schweißgeschwindigkeit an Chrom-Nickel Stählen im Sigmajig-Heißrisstest

Ähnlich wie bei den Kaltrisseexperimenten wurden die Schweißparameter jeweils an die Möglichkeiten der Lasertypen angepasst. Bei Nutzung des Faserlasers wurde also bei gleicher Leistung eine höhere Schweißgeschwindigkeit verwendet, bzw. bei gleicher Geschwindigkeit eine geringere Laserleistung, so dass jeweils noch eine sichere Durchschweißung erreicht werden konnte. **Bild 5** zeigt einen Vergleich der kritischen Spannungen  $\sigma_{crit}$ , welche zu einem makroskopischen Versagen führten, in Abhängigkeit vom Material bzw. der Schweißgeschwindigkeit. Ähnlich den Kaltrissergebnissen zeigt sich aber auch hier nur eine geringe Änderung der Rissempfindlichkeiten durch Wechsel des Lasers. Eine Betrachtung der Rissflächen unterstützt diese Aussage, alle Rissflächen wiesen ausnahmslos die typischen glatten Heißrisstrukturen auf, die Verringerung der Streckenenergie ergab nur eine geringe Änderung der Struktur, s. **Bild 6**. Damit lässt sich feststellen, dass an den untersuchten Werkstoffen keine

signifikante Änderung des Kalt- oder Heißrissmodus durch den Einsatz höherer Strahlqualitäten eintritt, bisher bekannte Möglichkeiten und Grenzen der Laserbearbeitung mit Strahlquellen hoher Strahlqualität behalten also ihre Gültigkeit.



Faserlaser, 4 kW, 9 m/min

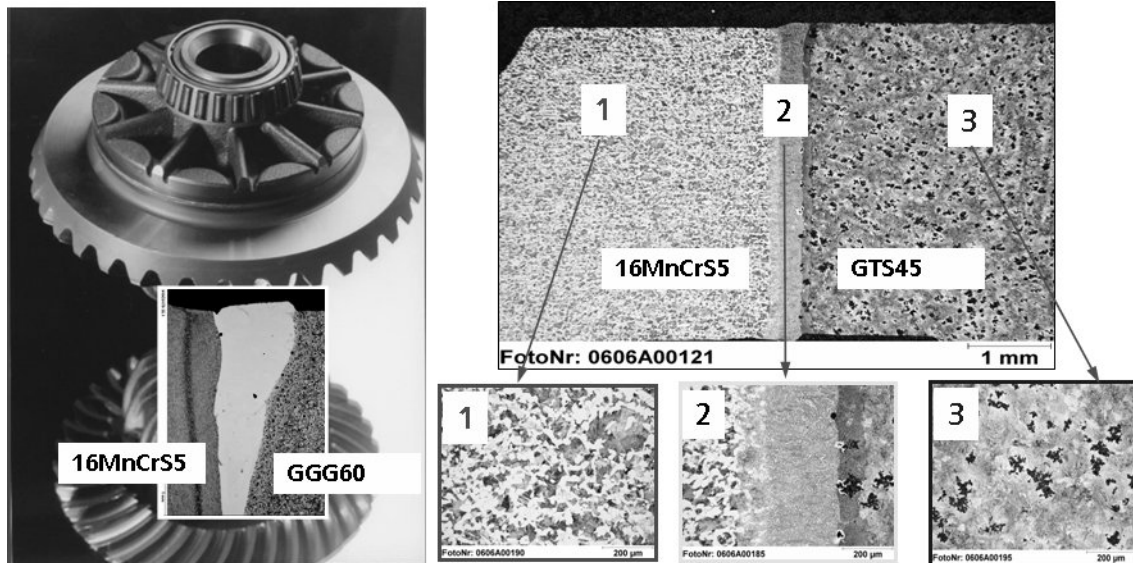


CO<sub>2</sub>-Laser, 6 kW, 9 m/min

**Bild 6:** Riss-Oberflächenstrukturen der Sigmajig-geprüften Proben aus Mat. 1.4435, Reduktion der Streckenenergie (4 kW statt 6 kW für Durchschweißung) hat Einfluss auf die Strukturgröße, jedoch nicht auf den Rissmodus

#### 2.4 Experimentelle Untersuchung zur Rissneigung an Mischverbindungen

Wie bereits in **Tabelle 1** gezeigt, spielen bei Mischverbindungen zusätzliche Faktoren eine Rolle bei der Rissbildung, die sich aus den Anteilen und Verteilungen der Einzelmaterialien ergeben. Inwiefern sich hier positive Veränderungen aus der Nutzung des Faserlasers ziehen lassen, wurde anhand einer Aufgabenstellung aus dem industriellen Umfeld geprüft. Konkret wurde eine Naht am Beispiel Differentialgetriebe untersucht, welche z.Z. in der Produktion mit einem CO<sub>2</sub>-Laser und Zusatzdraht geschweißt wird. Die Schweißungen in der Produktion erfolgen dabei für das Verbinden eines einsatzgehärteten Tellerrades mit dem Ausgleichsgetriebegehäuse aus globularem Gusseisen (**Bild 7**, links) unter Verwendung eines austenitischen Zusatzdrahtes. Aufgrund der Prozessparameter und der erforderlichen Fügestellengestaltung als Y-Nahtvorbereitung ergibt sich die charakteristische V-förmige Nahtgestalt. Bei Schweißungen mit dem Faserlaser an Erprobungsteilen (16MnCr / GTS45) ergeben sich extrem flankenparallele Schweißnähte (**Bild 7**, rechts). Damit ist es möglich, über die gesamte Schweißnahttiefe gleiche Anteile der beiden, insbesondere hinsichtlich des Kohlenstoffgehaltes, unterschiedlichen Werkstoffe aufzuschmelzen. Das somit sehr genau über die Laserstrahlpositionierung einstellbare Mischungsverhältnis im Schweißgut ermöglicht die gezielte Einstellung des Restaustenitanteils über den Kohlenstoffgehalt im Schweißgut und so die Erzeugung eines rissfreien und duktilen Schweißgutes (**Bild 7** rechts, Ausschnitt 2). Zusätzlich können aufgrund des definiert geringen Anteils an Gusseisen im Schweißgut Heißrisse trotz eines Schwefelgehaltes von ca. 0,2% im GTS45 unterdrückt werden.



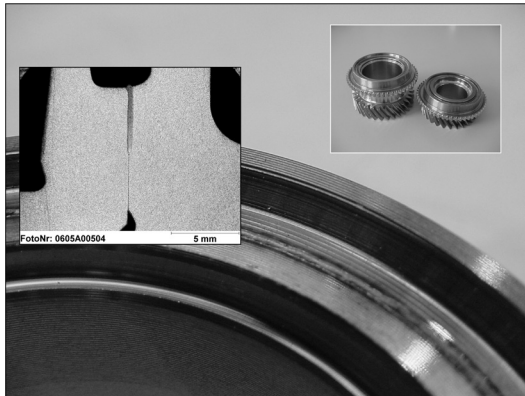
**Bild 7:** Mischverbindung Gusseisen-Einsatzstahl, Vergleich von Serienstand CO<sub>2</sub>-Laser mit ZSW (links) und Faserlaser ohne Zusatzwerkstoff im Laborversuch (rechts)

Ebenso ist aufgrund der niedrigen Streckenenergie und der damit verbundenen geringen Ausdehnung der WEZ auf der Seite des Gusseisens die Graphitauflösung im Vergleich zu Serienschweißungen mit CO<sub>2</sub>-Laser reduziert, was sich in einer geringeren Ausdehnung der martensitischen WEZ in diesem Bereich äußert (Bild 7 rechts, Ausschnitt 2). Somit besteht für diesen Anwendungsfall beim Einsatz von Faserlasern die Möglichkeit, die Fertigungskosten deutlich zu reduzieren. Möglich wird dies neben dem Wegfall des Einsatzes von Zusatzwerkstoff auch aufgrund von reduzierten Werkstoffkosten für das Differentialgehäuse (GTS anstelle GGG) sowie einer deutlich erhöhten Schweißgeschwindigkeit von 4 m/min mit einem 4kW Faserlaser anstelle 1,7 m/min mit einem 6kW-CO<sub>2</sub>-Laser.

### 3 Abschätzung der Prozesskosten am Fallbeispiel Schaltrad

Eine breite Anwendung finden derzeit CO<sub>2</sub>-Laser hoher Strahlqualität zum Schweißen verzugsgefährdeter Bauteile im Bereich PKW-Antriebsstrang, hauptsächlich im Bereich der Getriebefertigung. Mit einem Anteil von über 70% überwiegen in Europa manuelle Schaltgetriebe und deren automatisierte Derivate. Für derartige Getriebe werden Schalträder u.ä. Bauteile in sehr hohen Stückzahlen verschweißt. Als Beispiel sei das VW-Werk Baunatal genannt, bei ca. 2,9 Mio. Getrieben im Jahre 2003 sind dies ca. 30.000 geschweißte Schalträder täglich. Um das Einsatzpotenzial von Faserlasern im Vergleich zu den derzeit genutzten CO<sub>2</sub>-Lasern zu ermitteln, müssen neben der Schweißnahtqualität (Bild 8, links) auch resultierenden bauteilbezogenen Fertigungskosten abgeschätzt werden, wofür die in Bild 8 rechts stehenden experimentell geprüften Annahmen für das Kostenszenario berücksichtigt wurden. Unter Berücksichtigung der herstellerseitig angegebenen Kosten und Verbrauchsdaten (siehe [4]) ergeben sich für Faserlaser deutlich geringere Betriebskosten aufgrund ihres im Vergleich zu CO<sub>2</sub>-Lasern deutlich besseren Wirkungsgrades (Bild 9). Diese Kosten sind aber nur ein Bruchteil der Gesamtstundenkosten, da aufgrund des erforderlichen Investitionsvolumens für Schweißanlage und Strahlquellen die Fixkosten deutlich stärker ins Gewicht fallen. Für die stückzahlbezogenen Kosten ist daher sowohl die aufgrund der erreichbaren Schweißgeschwindigkeit gegebene Kapazität (Bild 9, links) als auch

das erforderliche Produktionsvolumen für die unterschiedlichen Szenarien zu berücksichtigen. Für Produktionsumfänge von bis zu 2.0 Mio. Schweißteilen pro Jahr ergeben sich bei den gewählten Annahmen geringe Vorteile für Faserlaser mit einer Leistung von 1,5 kW (Bild 9, rechts).

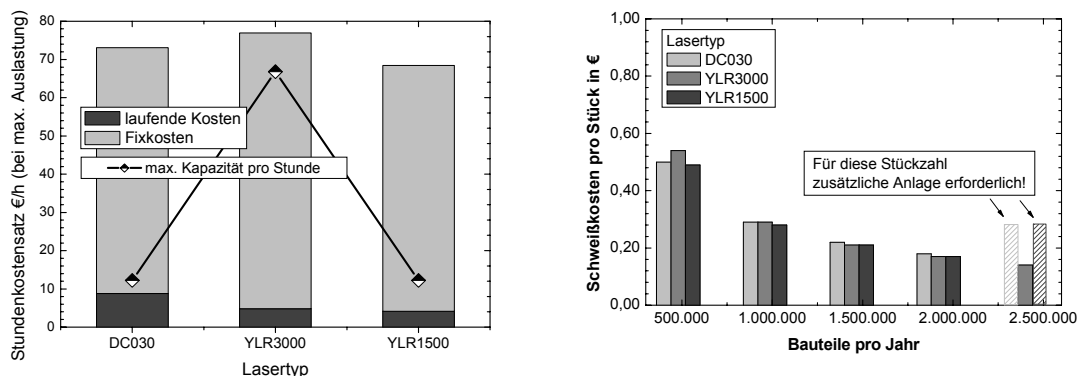


- Erforderliche Schweißtiefe ca. 4,0 mm
- Schweißdurchmesser 60 mm
- Schweißgeschwindigkeit:
  - 6,0 m/min für Faserlaser 3 kW
  - 2,5 m/min für 3 kW CO<sub>2</sub>-Laser und 1,5 kW Faserlaser
- 500 bis 2500 Schaltgetriebe pro Tag mit 4 geschweißten Schalträdern
- Somit 480.000 bis 2.4 Mio. Teile pro Jahr
- Schweißanlage für Schaltgetriebe ELC160 (Fa. EMAG LaserTec)

**Bild 8:** Schaltrad, lasergeschweißt mit Faserlaser und Ansätze für Kostenszenario

Für einen Schweißteilebedarf von mehr als 2.0 Mio. Stück pro Jahr kommt der Vorteil eines 3 kW Faserlasers aufgrund seiner theoretisch erreichbaren hohen Schweißgeschwindigkeit zum Tragen, da für diesen Fall auf die Installation einer zusätzlichen Schweißanlage verzichtet werden kann (Bild 9, rechts).

Damit ergeben sich insbesondere für Bauteile mit relative langen Schweißnähten und hohen Stückzahlen potenziell erhebliche Kostenvorteile bei Nutzung von Faserlasern hoher Strahlqualität aufgrund der bei vergleichbarer Laserleistung deutlich höheren Schweißgeschwindigkeit. Als mögliche zukünftige Anwendung kann das bereits erläuterte Beispiel des Laserstrahlschweißens von Differentials genannt werden (Bild 7).



**Bild 9:** Vergleich der Stundenkostensätze und theoretischer Kapazität für unterschiedliche Laser (links) und Bauteilstückkosten für unterschiedliche jährliche Stückzahlen (rechts)

Klärungsbedarf besteht bei den genannten Beispielen hinsichtlich der prozesssicheren Umsetzbarkeit der hohen Fokussierbarkeit der Faserlaser u. a. bezüglich der erforderlichen Positionier- und Bauteilgenauigkeit sowie der Prozessstabilität im Hinblick auf die Bauteilreinigung, tolerierbare Spaltmaße, etc..

#### 4 Zusammenfassung

Ein Vergleich der Schweißergebnisse von Faserlasern und CO<sub>2</sub>-Lasern hinsichtlich der Gefahr der Rissbildung zeigte ein Potenzial der neuen Laserquellen zur Verringerung der Rissbildung bei Mischverbindungen. Eine grundsätzliche Änderung des Rissverhaltens bei Wechsel des Lasertyps konnte nicht festgestellt werden, Experimente zur Kaltrissbildung von Linien- bzw. Axialrundnähten an Vergütungsstählen, bzw. zur Heißrissbildung an Edelstählen zeigten keine signifikanten Unterschiede. Der Vergleich wurde dabei gezielt zu Lasern mit bereits hoher Strahlqualität gezogen, da deren Anwendungsgebiete am ehesten für den Einsatz des Faserlasers interessant sind. Vergleiche mit Lasern deutlich schlechterer Strahlqualität wurden daher nicht durchgeführt.

Eine Kostengegenüberstellung zeigt, dass bei aktuell gültigen Marktpreisen hinsichtlich Anschaffung und Betrieb die Anwendung des Faserlasers mit steigenden Stückzahlen wirtschaftlich immer attraktiver wird und sich Kostenvorteile gegenüber herkömmlichen Systemen erzielen lassen. Für die Kostenbetrachtung ist allerdings die Berücksichtigung der Gesamtmaschinenkosten sowie des erforderlichen Produktionsvolumens im Einzelfall entscheidend.

#### 5 Literatur

- [1] Brenner, B., "Method for beam welding of hardenable steels by means of short time heat treatment"; Patent WO9810884 (1998)
- [2] Nelson, T. W., „Evaluation of the Circular Patch Test for assessing weld solidification cracking“, Welding Journal, New York, Band 76 (1997) Heft 3, Seite 110s-119s
- [3] Goodwin, G. M., "A quantitative test for hot cracking", Advanced Materials & Processes incorporating Metal Progress, Band 133 (1988) Heft 2, Seite 48-50
- [4] Standfuß, J., „Laserstrahlschweißen mit Faserlasern im Getriebebau“, 2. Internationaler Workshop »Faserlaser« Dresden (2006)