

# **Einfluss des Laserschneidens auf das Ermüdungsverhalten eines metastabilen austenitischen Stahls**

## **Influence of Laser Cut Process on Fatigue Behaviour of Sheet Metal Made of Austenitic Stainless Steel**

D. Pessoa, A. Mahrle, P. Herwig, A. Wetzig, M. Zimmermann  
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Dresden

**Kurzfassung** – Das Laserstrahlschneiden stellt ein innovatives Verfahren dar, welches im Vergleich zu konventionellen Schneidprozessen eine Vielzahl an Vorteilen aufweist, aber mit zunehmender Blechdicke auch ein entscheidenden Nachteil, nämlich eine Zunahme der Oberflächenrauheit der Schnittkanten. Um den Einfluss des Laserstrahlschneidprozesses auf das Ermüdungsverhalten bewerten zu können und daraus Optimierungsstrategien abzuleiten, gilt es die Oberflächengeometrie und die oberflächen-nahe Mikrostruktur im Hinblick auf die Schwingfestigkeit zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden laserstrahlgeschchnittene Ermüdungsproben verschiedener Blechdicken (2, 4 und 6 mm) aus dem metastabilen Austenitstahl AISI 304 mithilfe eines Festkörper-Scheibenlasers hergestellt. Ermüdungsversuche wurden an einem Resonanzpulsationsprüfstand für Spannungsverhältnisse von  $R = -1$  und  $R = 0,1$  durchgeführt. Zur Charakterisierung der Einflüsse von Makrodefekten und das für den Laserschnitt charakteristische Oberflächenrelief wurden die Ermüdungsproben fraktographisch analysiert. Der signifikante Abfall der Schwingfestigkeit ließ sich so charakteristischen Schnittkantenmerkmalen zuordnen.

**Stichwörter:** Laserstrahlschneiden, Ermüdungsverhalten, metastabiler Austenitstahl, Kerbeffekt

**Abstract** – Laser cutting is an attractive and innovative manufacturing process, which has many advantages compared to conventional cutting methods. However, increasing the work piece thickness a significant roughness increasing along the kerf surface is observed. In order to evaluate the influence of laser cutting processes on fatigue behavior and optimize the cutting parameters, the impact of the geometrical surface characteristics and microstructural changes after laser cutting are investigated. For this purpose specimens are cut out by high-power solid-state disk laser from sheets with 2, 4, 6 mm thickness of the metastable austenitic stainless steel of type AISI 304. Cyclic tests are performed using a resonance frequency test system at two different stress ratios ( $R = -1$  and  $R = 0.1$ ) followed by fractographic analysis in order to evaluate the influence of the surface roughness and surface-related macro defects on crack initiation. The reduction of fatigue strength of parts cut by laser is quantified and the most critical characteristic responsible for this detrimental effect is identified.

**Keywords:** Laser cutting, fatigue behavior, metastable austenitic stainless steel, notch effect

## **1 Einleitung**

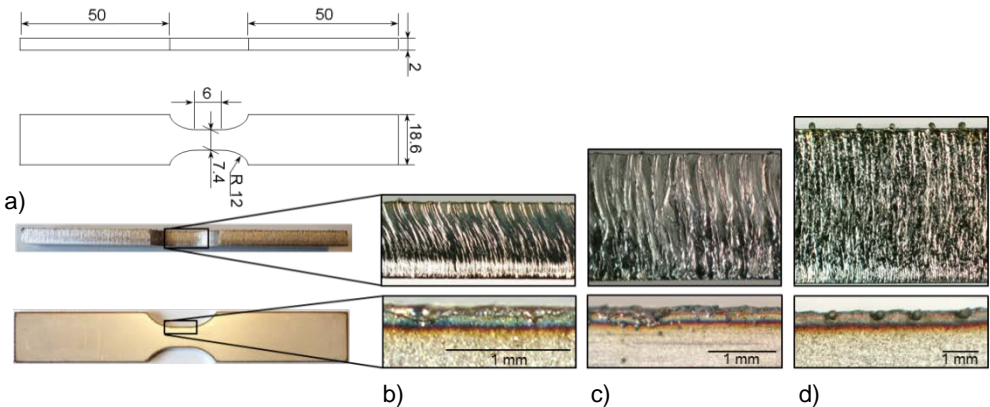
Laserstrahlschneiden zählt zur Gruppe der thermischen Trennverfahren zur Bearbeitung plattenförmiger Materialien, welches sich vor allem durch eine hohe Materialausnutzung, hohe Schnittgeschwindigkeiten, hohe Flexibilität und eine geringe Materialdeformation im Bereich der Schnittkante auszeichnet. Gleichwohl führt eine zunehmende Materialdicke zur Ausbildung einer verstärkten Oberflächenrauheit auf der Schnittfläche, was sich negativ auf die mechanische Festigkeit, insbesondere die Schwingfestigkeit, auswirken kann. Um den Schneidprozess nicht nur hinsichtlich Prozessgeschwindigkeiten und -zuverlässigkeit zu optimieren sondern auch den Einfluss des Laserstrahlschneidens auf die zyklische Festigkeit zu minimieren, muss die Wechselwirkung von Prozessparametern und geometrischen und mikrostrukturellen Veränderungen im Schnittkantenbereich bekannt sein. So weiß man z.B., dass eine hohe Prozessgeschwindigkeit und niedrige Laserleistung geringer ausgebildete Oberflächenreliefs zur Folge hat. Jedoch kommt es bei dieser Prozessstrategie auch zu einer inhomogeneren Ausbildung der Laserschnittkante [1]. Im Fall des metastabilen Austenitstahls AISI 304 führt der Einsatz von Faserlasern ab einer Blechdicke von 4 mm zu signifikanten Oberflächenrauheiten, demgegenüber ist für CO<sub>2</sub>-Laser dieser Effekt erst ab ca. 8 mm Blechdicke zu beobachten [2]. Weiterhin spielt neben dem Laserverfahren auch die Materialzusammensetzung und die ursprüngliche Oberflächenqualität eine Rolle (siehe u.a. [3,4]).

Am Beispiel von 25 mm dicken Stahlplatten konnte gezeigt werden, dass Cu- und Ni-Anteile die Schnittqualität positiv beeinflussen.

Der Anteil der Ermüdungsrissinitiierungsphase an der Gesamtlebensdauer einer zyklisch beanspruchten Probe bzw. Bauteils hängt neben dem Beanspruchungsniveau auch wesentlich vom Ausgangszustand des Materials (defektbehaftet oder quasi defektfrei), der geometrischen Gestaltung (makroskopische Kerben) und nicht zuletzt der Oberflächenqualität ab. Diese Einflussfaktoren gilt es im High Cycle Fatigue (HCF)- und Very High Cycle Fatigue (VHCF)-Bereich separiert zu bewerten, um damit den dominierenden versagensrelevanten Kerbeffekt zu identifizieren und damit eine Grundlage zur werkstoff- bzw. festigkeitsorientierten Prozessoptimierung zu schaffen [5]. Austenitische Edelstähle sind aufgrund der guten Umformbarkeit der meist verwendete Werkstofftyp unter den nichtrostenden Stählen und weisen unter bestimmten Bedingungen eine verformungsinduzierte Umwandlung von Austenit in den festeren  $\alpha'$ -Martensit auf. Die Phasenumwandlung kann genutzt werden, um lokal statische und zyklische Festigkeitseigenschaften eines Blechformteils mit Hilfe des Produktionsprozesses zu optimieren.

## 2 Schneidprozess und Experimentelles

Um den Einfluss des Laserschneidprozesses auf die Schwingfestigkeit des metastabilen Austenitstahls AISI 304 zu untersuchen, wurden Ermüdungsproben mit Hilfe eines Hochleistungs-Festkörperscheibenlasers aus Blechen mit Dicken von 2, 4 und 6 mm herausgeschnitten. Die Probengeometrie ist exemplarisch für das 2 mm Blech in **Bild 1a** dargestellt. Bei dem verwendeten Scheibenlaser handelt es sich um das Modell Trumpf TruDisk 5001; die wesentlichen Prozessparameter sind in **Tabelle 1** aufgeführt. Die Daten zum Laserstrahl beziehen sich hierbei auf die in der Regel unveränderlichen Kenndaten des Lasertyps. Bei der Strahlqualität  $M^2$  handelt es sich um einen Parameter, der die Verteilung der Strahlintensität im Laserstrahlquerschnitt in der Fokallage beschreibt. Die in der Kategorie „Schneidprozess“ in Tabelle 1 aufgelisteten Parameter Fokallage und Schnittgeschwindigkeit bestimmen maßgeblich die Schnittqualität.



**Bild 1:** a) Geometrie der Ermüdungsprobe für ein 2 mm dickes Blech und Oberflächenrelief bzw. Gratanhftung nach dem Laserschneid für b) 2 mm, c) 4 mm und d) 6 mm Blechdicke.

**Figure 1:** Geometry of fatigue specimens for a sheet with 2 mm thickness and surface relief and burr, respectively, after laser cutting of b) 2mm, c) 4 mm and d) 6 mm sheet thickness.

Während des Schneidprozesses kommt es nicht nur zur Ausbildung eines Oberflächenreliefs über dem gesamten Querschnitt der Schnittkante sondern es entsteht bei nicht optimierten Schneidparametern auch eine Gratanhftung in Form eines Schmelztropfens an jener Schnittkante, in deren Richtung das aufgeschmolzene Material ausgetrieben wird. Um diese Effekte separiert voneinander bewerten zu können, wurden die Ermüdungsproben in drei verschiedenen Zuständen getestet – unbearbeiteter Laserschneid (lasergeschnitten), Laser-

schnitt mit abgearbeiteter Gratanhaltung (ohne GA) und elektro-chemisch polierte Oberfläche (poliert). Letzterer Zustand repräsentiert das Ermüdungsverhalten des Grundwerkstoffs. Der Einfluss der Blechdicke auf die Oberflächenqualität im unbearbeiteten Laserschnittzustand wird in **Bild 1b-d** illustriert.

**Tabelle 1:** Zur Herstellung der Ermüdungsproben verwendete wesentliche Prozessparameter  
**Table 1:** Most relevant process parameters used to cut the fatigue specimens

Gruppe	Blechdicke	2 mm	4 mm	6 mm
Laser Strahl	Wellenlänge	1 $\mu\text{m}$		
	Strahlqualität, $M^2$	10		
	Ausgangsleistung	3 kW		
Schild / Ausstoßgas	Prozessgas	99,99% $\text{N}_2$		
	Gasdruck	11 bar	14 bar	14 bar
	Form der Düse	konisch konvergent		
	Durchmesser der Düse	2,3 mm	4 mm	4 mm
	Abstand Düse / Werkstück	0,8 mm	0,5 mm	0,5 mm
Schneidparameter	Fokusslage	0	-2,6 mm	-2,5 mm
	Schneidgeschwindigkeit	16 m/min	5 m/min	2,25 m/min

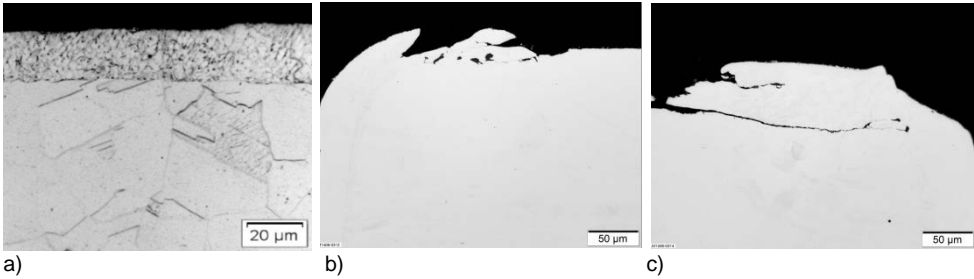
Zur quantitativen Beschreibung der in Bild 1b-d dargestellten Oberflächenreliefs der laserstrahlgeschnittenen Proben wurden Rauheitsmessungen mit Hilfe eines Tastschnittgeräts durchgeführt. In Tabelle 2 sind die Werte für die mittlere Rauheit  $R_a$ , die gemittelte Rautiefe  $R_z$  und die maximale Rautiefe  $R_{\text{max}}$  angegeben. Die Messungen erfolgten in drei verschiedenen Ebenen mit jeweils einem Abstand von 1 mm von der Blechober- bzw. -unterkante (Positionen 1 bzw. 3 in Tabelle 2) und entlang der neutralen Faser des Blechs (Position 2 in Tabelle 2). Die Messergebnisse zeigen, dass die Rauheit mit zunehmender Blechdicke ausgeprägter wird und auch über der Kantenbreite nicht konstant verläuft, sondern ausgehend von der Lasereintrittskante hin zur Materialaustriebseite rauer wird.

**Tabelle 2:** Messung der Rauheit für die Probendicken 2 mm, 4 mm und 6 mm auf drei unterschiedlichen Positionen

**Table 2:** Roughness measurements on the three different specimen thicknesses 2 mm, 4 mm and 6 mm at three different positions

Probe	Position	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]
2 mm dick	1	0,9	6,2	7,3
	2	1,2	8,4	10,7
	3	2,2	14,0	15,0
4 mm dick	1	4,1	20,8	22,9
	2	5,1	29,7	35,8
	3	5,3	32,6	42,4
6 mm dick	1	3,0	18,2	21,6
	2	5,0	27,5	33,3
	3	6,1	35,1	55,7

Während des Schneidprozesses wird ein Teil des Materials aufgeschmolzen. Die Schmelze wird aus dem Schneidspalt ausgetrieben und es bildet sich neben den geometrischen Effekten im oberflächennahen Bereich auch eine Wärmeeinflusszone aus. In **Bild 2a** ist ein angeätzter Querschliff durch eine Laserschnittkante eines 2 mm dicken Bleches zu sehen. Zu beobachten ist eine signifikante Kornfeinung von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von ca. 20  $\mu\text{m}$ . Diese geht einher mit einem Anstieg der Härte um ca. 20% im Vergleich zum Grundwerkstoff auf 250 HV.



**Bild 2:** a) Mikrostruktur einer 2 mm dicken Probe im oberflächennahen Bereich einer Laserschnittkante und Gratanhftung an b) der linken oberen Kante und c) der rechten oberen Kante einer 4 mm dicken Probe.

**Figure 2:** Microstructure of a sample with 2 mm thickness in the near-surface area of a laser cut edge and burr for a 4 mm thick sample at b) its left upper corner and c) its right upper corner.

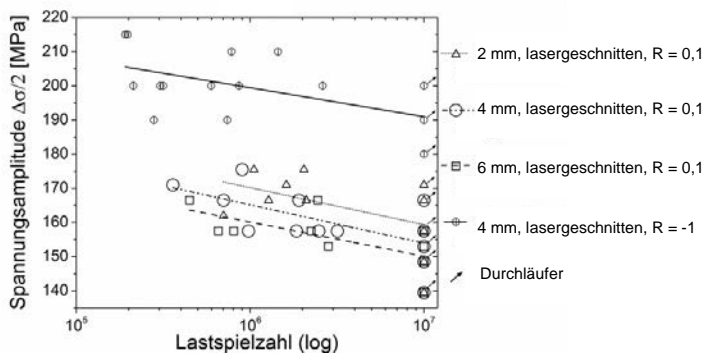
Bei nicht ausreichend angepasster Einstellung der Schneidparameter erstarrt ein Teil des ansonsten durch das Schneidgas ausgetriebenen Schmelzgutes an der Kante senkrecht zur unteren Schneidkante, siehe hierzu auch **Bild 2b und c**. Deutlich zu erkennen ist insbesondere in den Detailaufnahmen des Querschliffs der Laserkante des 4 mm dicken Bleches die geometrische Unstetigkeit der Gratanhftung, die zumeist nicht vollständig mit dem Blech verbunden ist und deren ausgeprägter makroskopischer Kerbeffekt in seiner Ausdehnung und Form bereits einem technischen Anriss gleich kommt.

Die Durchführung der Ermüdungsversuche erfolgte an einem Resonanzpulsationsprüfstand der Firma Russenberger bei einer Prüffrequenz von rund 120 Hz. In Ergänzung zu den Versuchen bei einem Spannungsverhältnis  $R = 0,1$  wurden für die 4 mm dicken Proben auch Versuche bei reiner Wechsellast durchgeführt. Die Proben wurden während des gesamten Versuchs mittels Pressluft gekühlt, und exemplarische Temperaturmessungen zu Beginn der Versuchsreihe zeigten, dass es zu keiner unerwünschten Temperaturerhöhung infolge der hohen Prüffrequenzen kam. Ein Abfall der Prüffrequenz um  $\Delta f > 5$  Hz galt als Abschaltkriterium. Proben die bis zum Erreichen einer Grenzlastspielzahl von  $N = 10^7$  keine Änderung der Prüffrequenz jenseits der gesetzten Grenze zeigten und keine äußere Rissinitiierung aufwiesen, wurden als Durchläufer gewertet. Die fraktographischen Untersuchungen an den Ermüdungsproben wurden an einem Rasterelektronenmikroskop des Typs JSM 6610 der Firma JEOL durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

In **Bild 3** sind die Ergebnisse der Schwingversuche an Ermüdungsproben unterschiedlicher Blechdicke ohne Oberflächennachbehandlung im Anschluss an den Laserschnitt gegenübergestellt. Aufgrund der bisher nur begrenzt verfügbaren Anzahl an Versuchsergebnissen sind die Unterschiede im Ermüdungsverhalten nicht eindeutig zu unterscheiden. Gleichwohl ist ein Trend erkennbar, der einen Einfluss der Blechdicke auf die Schwingfestigkeit vermuten lässt. Es deutet sich an, dass mit zunehmender Blechdicke die Schwingfestigkeit abnimmt. Die hier dargestellten Ergebnisse lassen jedoch noch keine Unterscheidung des Einflusses der Oberflächenrauheit und der Gratanhftung zu. Auffällig erscheint hingegen, dass die Versuche bei reiner Wechsellast eine höhere Streuung aufweisen als die Versuche bei einem Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$ .

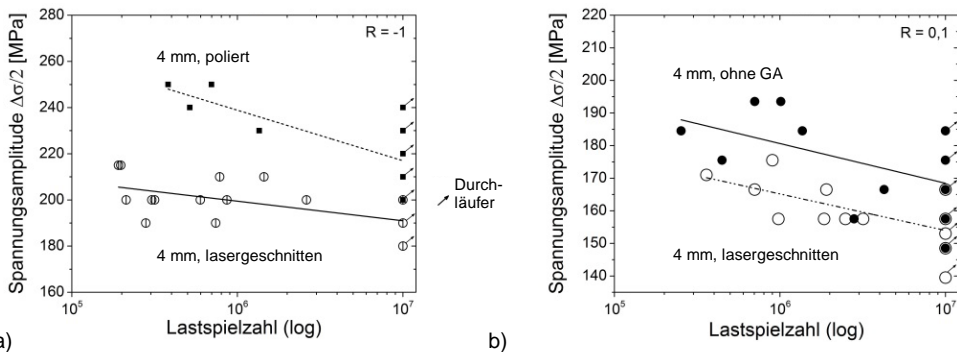
Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an lasergeschnittenen Proben mit den eingangs definierten unterschiedlichen Oberflächenqualitäten liefert eine eindeutige Aussage zu den dominierenden Kerbeffekten, siehe hier die in **Bild 4** dargestellten Wöhlerdiagramme.



**Bild 3:** Wöhlerkurven für 2, 4 und 6 mm dicke Proben bei  $R = 0,1$  und von 4 mm dicken Proben bei  $R = -1$  im lasergeschnittenen Zustand ohne Nachbearbeitung der Oberfläche.

**Figure 3:** Fatigue test results of specimens with 2, 4 and 6 mm thickness tested at  $R = 0,1$  and specimens with 4 mm thickness at  $R = -1$  in the as-cut condition without surface post-processing.

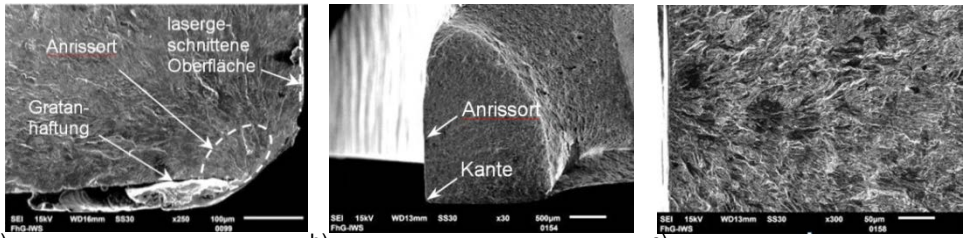
Die in Bild 4a dargestellten Proben ohne Nachbearbeitung weisen gemäß einer Auswertung der Ermüdungsversuche bei reiner Wechsellast nach Dixon und Mood [6] für die Grenzlastspielzahl von  $N = 10^7$  bei einer 50-prozentigen Ausfallwahrscheinlichkeit eine Schwingfestigkeit von 195 MPa auf; für die nachträglich elektro-chemisch polierten Proben ergibt sich eine Schwingfestigkeit von 233 MPa (Bild 4a). Das Laserstrahlschneiden des AISI 304 führt demnach zu einer Reduzierung der Schwingfestigkeit um ca. 16%. Vergleicht man nun die Schwingfestigkeiten der Proben mit Laserschnittkante ohne Nachbearbeitung mit Versuchen, bei denen lediglich die Gratanhftung entfernt wurde (siehe Bild 4b), so kommt man für die Grenzlastspielzahl von  $N = 10^7$  bei einer 50-prozentigen Ausfallwahrscheinlichkeit auf Schwingfestigkeiten von 158 MPa zu 174 MPa bei einem Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$  und damit einem Festigkeitsgewinn von etwa 10% durch die Nachbearbeitung.



**Bild 4:** Ergebnisse der Ermüdungsversuche für 4 mm dicke Proben a) im lasergeschnittenen Zustand und elektrochemisch poliert (Grundwerkstoff) bei  $R = -1$  und b) im lasergeschnittenen Zustand und mit abgearbeiteter Gratanhftung bei  $R = 0,1$

**Figure 4:** Fatigue test results of specimens with 4 mm thickness a) in the as-cut condition and electrochemically polished (base material) tested at  $R = -1$  and b) in the as-cut condition and without re-solidified drops tested at  $R = 0.1$

Ein Vergleich der Bruchflächen der lasergeschnittenen Ermüdungsproben mit und ohne abgearbeiteter Gratanhftung zeigen deutlich, dass die Rissinitiation mit den jeweiligen Kerbeffekten verknüpft ist. Im ursprünglichen Zustand führt die Gratanhftung zur versagensrelevanten Rissbildung, bei abgearbeitetem Grat verlagert sich die Rissinitiation in den Bereich des Oberflächenreliefs der Laserschnittfläche und damit weg von der eigentlichen Probenkante, siehe hierzu **Bilder 5a und 5b**.



**Bild 5:** Bruchflächen von 4 mm dicken Proben a) im lasergeschnittenen Zustand geprüft bei  $\Delta\sigma/2 = 200$  MPa und  $R = -1$  bis zum Versagen bei  $2,6 \times 10^6$  Lastspielen und b) und c) ohne Grat-haftung geprüft bei  $\Delta\sigma/2 = 220$  MPa und  $R = -1$  bis zu einer Bruchlastspielzahl von  $4,5 \times 10^5$ .

**Figure 5:** Fracture surfaces of specimens with 4 mm thickness a) in the as-cut condition tested at  $\Delta\sigma/2 = 200$  MPa and  $R = -1$  up to failure at  $2,6 \times 10^6$  load cycles and b) and c) without re-solidified drops tested at  $\Delta\sigma/2 = 220$  MPa and  $R = -1$  up to a number of cycles until failure of  $4,5 \times 10^5$ .

Es macht wenig Sinn an ein vor allem auf Prozessgeschwindigkeit und -effizienz ausgelegtes Verfahren, wie dem Laserschneiden, eine nachgeschaltete Oberflächenbehandlung anzuschließen. Diese wird aber bei einer optimalen Abstimmung der Prozessparameter überflüssig, da bereits durch eine Prozessoptimierung die Gratbildung vermeidbar ist. Bestehen bleibt damit die weniger stark ausgeprägte Schwingfestigkeitsreduzierung durch das Oberflächenrelief. Weiterführenden Untersuchungen sollen aufklären, inwieweit die metallurgischen Veränderungen einerseits und eine mögliche Kompensation der durch das Laserschneiden induzierten Kerbeffekte durch eine verformungsinduzierte Martensitbildung im Kerbgrund andererseits einen entscheidenden Einfluss auf das Ermüdungsverhalten haben.

## 4 Zusammenfassung

Am Beispiel eines metastabilen Austenitstahls wurde der Einfluss einer Laserschnittkante auf das Ermüdungsverhalten in Abhängigkeit von der Blechdicke untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich ein mit zunehmender Blechdicke stärker ausgeprägtes Oberflächenrelief an der Schnittfläche ausbildet und dieses eine Reduzierung der Schwingfestigkeit zur Folge hat. Ein signifikanter Abfall konnte jedoch auf die Kerbwirkung der Grat-haftung an der Laserschnittkante bei nicht optimierten Schneidparametern zurückgeführt werden. Je nach Dominanz des jeweiligen Kerbeffekts tritt die Rissinitiierung entweder an der Laserschnittkante oder im mittleren Bereich der Schnittfläche auf. Zukünftige Arbeiten müssen aufklären, inwieweit die Schwingfestigkeit auch durch die mikrostrukturellen Änderungen, wie eine lokale Kornfeinung und Aufhärtung sowie eine mögliche verformungsinduzierte Martensitbildung an Kerben, beeinflusst wird.

**Danksagung** – Dem National Council for Scientific and Technological Development (CNPQ) Brazil wird für die finanzielle Unterstützung gedankt.

### Literatur

- [1] D. J. Thomas: The influence of mechanical and CO<sub>2</sub> laser cut-edge characteristics on the fatigue life performance of high strength automotive steels, J. Mat. Proc. Techn. 211 (2011), S. 263-274.
- [2] S. Stelzer, A. Mahrle, A. Wetzig, E. Beyer: Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO<sub>2</sub> laser beams, Physics Procedia 41 (2013), S. 399-404.
- [3] M. Manohar: CO<sub>2</sub> laser beam cutting of steels: Materials issues, J. of Laser Applications 18 (2006), S. 101-112
- [4] M. Manohar, R. L. Bodnar: Effect of steel composition on the laser cutting behavior of 25-mm-thick plates, J. of Laser Application 17 (2005), S. 211-218
- [5] M. Cremer, M. Zimmermann, H.-J. Christ: High-frequency cyclic testing of welded aluminium alloy joints in the region of very high cycle fatigue (VHCF), Int. J. of Fatigue 57 (2013) S. 120-130.
- [6] W. J. Dixon, A. M. Mood: A method for obtaining and analyzing sensitivity data, J. of the American Statistical Association 43 (1948), S. 108-126.