

# Beitrag zum Ermüdungsverhalten artfremd und artgleich geschweißter Laserschweißnähte

M. Thaler<sup>1</sup>, H. Huemer<sup>2</sup>, M. Stoschka<sup>1</sup>, R. Ebner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben, 8700 – Leoben, Österreich

<sup>2</sup> MAGNA Powertrain AG & Co KG, 8502 – Lannach, Österreich

<sup>3</sup> MCL – Materials Center Leoben Forschung GmbH, Roseggerstraße 12, 8700 – Leoben, Österreich

**Kurzfassung** Der vorliegende Beitrag widmet sich der bauteilgerechten Auslegung, sowie der betriebsfesten Charakterisierung von Laserschweißverbindungen die ohne Zusatzwerkstoff verschweißt werden. Typische Werkstoffe des Maschinen- und Automobilbaus werden hinsichtlich eines Zusatzwerkstoff freien Schweißprozesses bewertet. Die Auswirkungen veränderter Schweißprozessparameter und lokaler Kräfteinleitungsvariationen werden betrachtet. Mit Hilfe numerischer Schweißsimulationstools werden diese geänderten geometrischen Randbedingungen hinsichtlich der stationären Spannungssituation vergleichend bewertet. Die Auswirkungen auf die Spannungsevolution in Schweißnahtwurzel und Oberfläche werden untersucht. Besonders wird auch auf den kritischen, überschweißten Bereich einer radial geschweißten Verbindung Rücksicht genommen. Die Auswirkung dieses Bereichs auf die Schädigung der Schweißnaht unter dynamischer Belastung wird eruiert. Begleitende Härtemessungen sowie umfassende metallographische Analysen geben einen Beitrag um die lokalen Verhältnisse einzelner Schweißnahtzonen zu klären und dienen somit zur Verifikation von Simulation und Realversuchsergebnissen. Abschließend wird eine rechnerische Bewertung der Schweißverbindungen nach dem Kerbspannungskonzept mit einem fiktiven Ersatzradius von  $r_{ref}=0,05\text{ mm}$  zur Bestätigung konservativer Empfehlungen durchgeführt.

## 1 Einleitung

Die hohe Kosteneffizienz des Laserschweißprozesses bei großen Stückzahlen etabliert diese Fügetechnik zunehmend in der Automobilindustrie. Sehr kurze Taktzeiten sowie die geringe Schädigung des Werkstoffs und damit verbundener minimaler Bauteilverzug sprechen für den Einsatz dieser Fügemethode in der Serienfertigung [BRA 1]. Teure Nacharbeits- und Richtkosten können dadurch ganz entfallen. Besonders die Einführung von Festkörper-Lasern mit hoher Brillanz und definierter Energieeinbringung ermöglichen innovative Fügekonzepte. Besonders bei der Verbindung von artfremden Werkstoffpaarungen wird nach wie vor Zusatzwerkstoff verwendet um eine stoffschlüssige Verbindung der Fügepartner zu gewährleisten. Der Verzicht auf Zusatzwerkstoff beim Laserschweißen birgt großes Kostenpotential bereits bei der Nahtvorbereitung als auch beim oft vergleichsweise kostenintensiven Schweißzusatzwerkstoff.

## 2 Probengeometrie

Der prozessgerechten Auslegung des Fugesitzes kommt bei der Verwirklichung Zusatzwerkstoff freigeschweißter Bauteile eine wesentliche Bedeutung zu. Im Allgemeinen wurde durch die Verwendung von Nickel – Basis Zusatzwerkstoff eine Schmelzzone geschaffen die auf Grund ihrer duktilen Materialeigenschaft ein tolerantes Verhalten gegenüber hohen, verbleibenden Schweißspannungen zeigt. Ein wesentlicher Unterschied zum Schweißen mit Zusatzwerkstoff zeigt sich aber bei der Umsetzung des Zusatzwerkstoff freien Schweißens von artgleichen als auch artfremden Materialkombinationen. Die sich hier ausbildenden Gefügezonen

kennzeichnen sich oft durch ihre hochfesten aber spröden Zonen [STO 1]. Um ein niederes Eigenspannungsniveau in der Schweißnaht einzustellen wurde daher der Bereich der Fügezone freigestellt. Die Verformung dieses Bauteilbereichs wird über sogenannte Dehnstege ermöglicht. Aus dieser Fügellinientopologie resultieren geringes Eigenspannungsniveau der Schweißnaht sowie eine gleichzeitige Reduzierung des Schweißverzuges [THA 1].

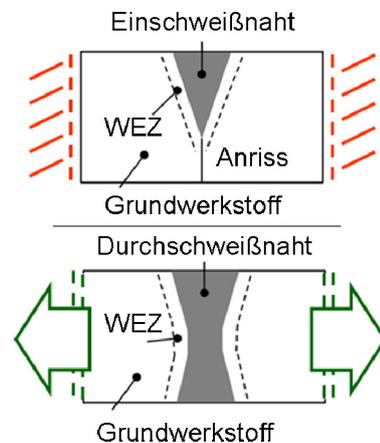


Abb. 1: Designtopologien von Einschweißnaht im konventionellen und Durchschweißnaht im Dehnstegdesign

Des Weiteren wird durch die Einführung des Durchschweißprozesses der beim Einschweißprozess unvermeidbare Wurzelanriss vermieden, welcher die dynamische Festigkeit negativ beeinflusst [EBN 1]. Die bessere Entgasungsmöglichkeit der Schweißnaht in dieser Nahttopologie garantiert für porenfreie, hochwertige Schweißnähte. Die abgeleitete Probengeometrie spiegelt künftiges Fugesitzdesign wieder

und stellt so die Nähe zu realen, geschweißten Strukturen her.

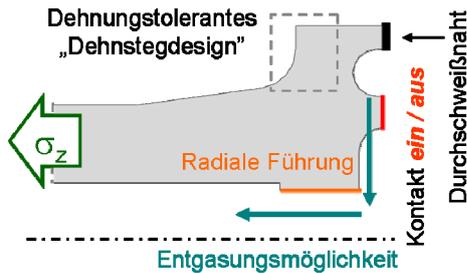


Abb. 2: Querschnitt durch Laserschweißrundprobe

Es wurde eine Rundprobe entworfen die diesen Forderungen gerecht wird. Am Innenring der Schweißprobe kann ein Kontakt mit der gegenüberliegenden Probenseite hergestellt oder unterbunden werden. Dies ermöglicht ein Studium der Auswirkung verschiedener Probensteifigkeiten auf die Spannungsverteilung und dynamische Festigkeit der Probe.

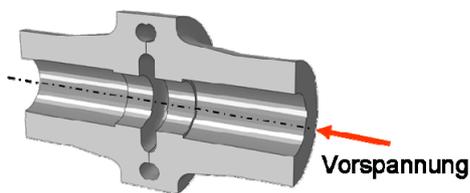


Abb. 3: Schweißanordnung der Radialprobe

### 3 Randbedingungen. Simulation

Simulation und Realversuch wurden unter denselben Randbedingungen durchgeführt. Als Softwarepaket wurde Sysweld© verwendet. Die Berechnung erfolgte angelehnt an die verwendeten Werkstoffe mit dem integrierten 16MnCr5 Datensatz. Die axialen Vorspannkräfte wurden gemessen und in die Simulation übertragen. Die Einbringung der Laserleistung erfolgt möglichst realitätsnah über eine Leistungsrampe. Dabei wird die Laserleistung innerhalb von dreißig Winkelgrad auf hundert Prozent gesteigert. Anschließend folgt ein konstanter Schweißprozess über einen überstrichenen Winkelbereich von einer Umdrehung. Anschließend wird die Laserleistung innerhalb von neunzig Grad auf Null gebracht. Somit wird ein überschweißter Schweißnahtbereich von 120 ° abgebildet.

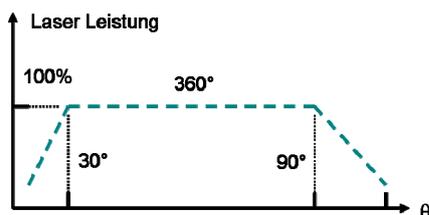


Abb. 4: Einbringung der Laserleistung

Die Kalibrierung des numerischen Schweißprozesses erfolgte an der Gefügeausbildung der realen Probe.

Dazu wurde die Wärmeeinbringung der numerischen Laserstrahlquelle anhand der Verteilung des martensitisch umgewandelten Gefüges justiert.

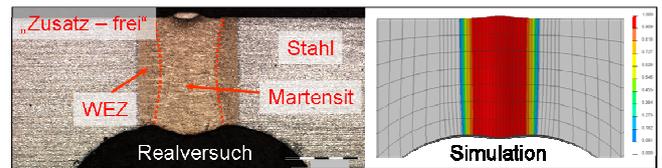


Abb. 5: Kalibrierung der Wärmeeinbringung anhand realer martensitischer Gefügeverteilung

Das Simulationsmodell weist zur Abbildung der extrem hohen Gradienten beim Laserschweißprozess eine hohe Element-Diskretisierung im Bereich der Schweißzone auf. Die Auswertung von relevanten Informationen erfolgte quantitativ im stationären Bereich bei 180 ° überstrichenen Winkel in einem Abschnitt konstanter Prozessführung. Eine Bewertung des überschweißten Probenbereichs wurde somit qualitativ vorgenommen.

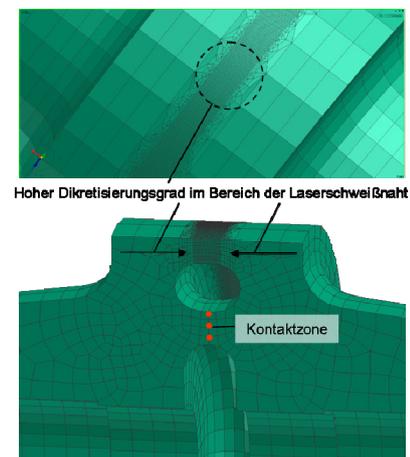


Abb. 6: Hoher Diskretisierungsgrad der numerischen Schweißprobe zur Abbildung hoher Gradienten beim Laserschweißen.

Elemente in der Breite von 0,05 mm bilden die Wärmeinflusszone in Längsrichtung ab. Die Auswertung von Daten erfolgte jeweils im ausgekühlten sowie unverspannten Zustand. Unberücksichtigt dabei bleibt die Ausbildung der real vorhandenen Nahtgeometrie der Schweißnahtwurzel bzw. der realen Oberflächentopologie. Sämtliche numerischen Versuchsergebnisse spiegeln die Spannungssituation an der Probenidealgeometrie wieder. Eine linear-elastische Bewertung der geometrischen Schweißnahtkerbe nach IIW Richtlinien [IIW1] wird im experimentalen Teil dieser Arbeit behandelt.

### 4 Ergebnisse. Simulation

Auf Grund der Dünne dieser Schweißstruktur wurde wesentliches Augenmerk auf die Ausbildung der verbleibenden axialen und tangentialen Schweißspannungen gelegt. Die Auswertung erfolgte dabei normal zum Schweißpfad an der Schweißnaht-

wurzel und Oberfläche in einem Bereich konstanter Prozessführung. Es kann gezeigt werden, dass die Probensteifigkeit durch die jeweilige Bedingung im ein- oder ausgeschalteten Kontaktzustand einen wesentlichen Einfluss auf das sich in der Probe ausbildende Eigenspannungsfeld hat. Die Probensteifigkeit wird durch erlaubten Kontakt erhöht. Eine allgemeine Erhöhung der Spannungssituation kann dabei beobachtet werden.

**Oberflächenspannung** Die deutlichsten Auswirkungen werden dabei bei den **axialen** Schweißesigenspannungen an der Nahtoberfläche beobachtet. Befinden sich diese Spannungen bei verhiindertem Kontakt sogar im Druckspannungsbereich, verschieben sich diese in den ungünstigen Zugspannungsbereich bei erlaubtem Kontakt. Die **tangentiale** Spannungsverteilung weist sowohl bei verhiindertem als auch bei erlaubtem Kontakt ein Zugeigenspannungsfeld auf. Dies wird durch die Kontaktformulierung zu triaxialen Zugeigenspannungen hin verschärft.

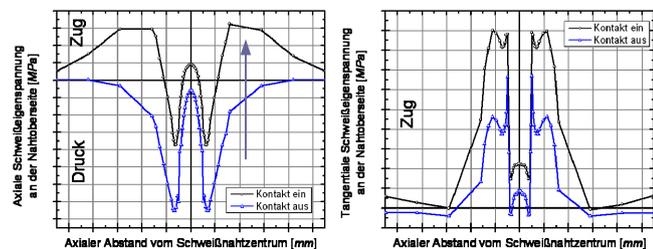


Abb. 7: Axiale und tangentielle Schweißesigenspannungsverteilung quer zum Schweißpfad an der Nahtoberseite

**Wurzelspannung** An der idealisierten Geometrie der Schweißnahtwurzel herrschen größere Zugeigenspannungsfelder als an der Probenoberseite. Sowohl die **axialen** als auch die **tangentiale** Schweißesigenspannungen verschieben sich hin zu größeren Zugeigenspannungen bei aktiver Kontaktformulierung.

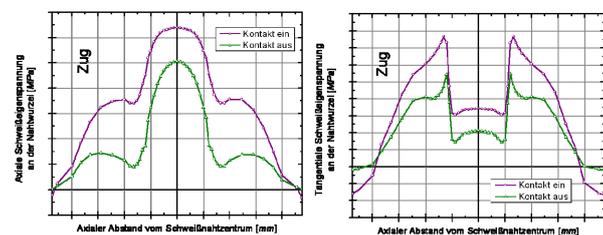


Abb. 8: Axiale und tangentielle Schweißesigenspannungsverteilung quer zum Schweißpfad an der Nahtwurzel

**Überschweißter Bereich** An der überschweißten Nahtzone kann eine erhöhte Spannungssituation sowohl bei den sich ausbildenden axialen und tangentiale Spannungen beobachtet werden. Auch hier weist die Modifikation in aktiver Kontaktformulierung die höheren Eigenspannungen auf. Im Vergleich

zur Nahtzone konstanter Prozessführung weist der durch zweimaliges aufschmelzen gekennzeichnete Bereich ein größeres Werkstoffvolumen mit erhöhtem und somit ungünstigeren Spannungszustand auf.

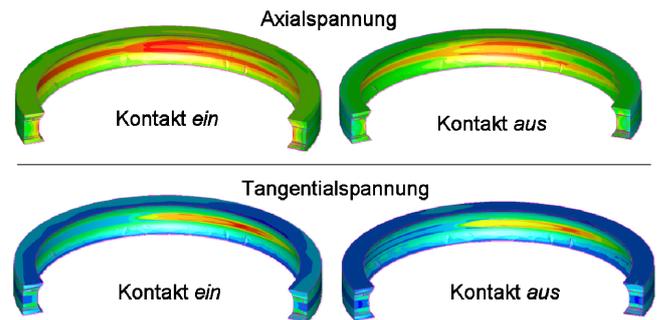


Abb. 9: Spannungssituation im Bereich der Überschweißung

Die Erhöhung der Spannung im Bereich der Überschweißung ist in guter Übereinstimmung mit dem Anstieg des Kontaktdrucks am Innenring der Probe. Dieser bildet sich homogen entlang des Umfangs des Innenrings aus und erfährt eine Überhöhung im Bereich der Überschweißung. Die Entspannung der Probe führt schlussendlich zu einem linearen Rückgang des Kontaktdrucks sowohl im stationären als auch überschweißtem Nahtbereich.

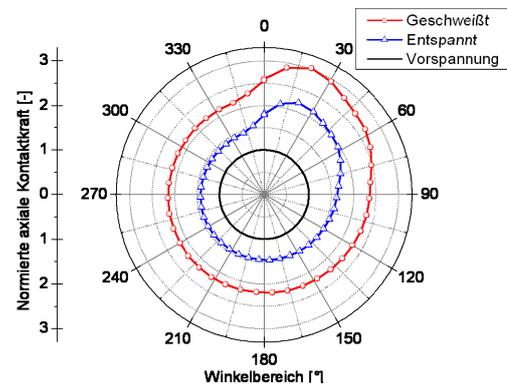


Abb. 10: Verlauf der Kontaktkraft am Probeninnenring

Es kann eine 2,3 fache Steigerung der Kontaktkraft im Bereich der Überschweißung festgestellt werden. Im Bereich konstanter Prozessführung wird eine 1,5 fache Überhöhung der Kontaktkraft gegenüber dem Vorspannzustand erreicht.

### 3 Betriebsfestigkeit. Realversuch

**Artgleiche Materialpaarung** Probenhälften aus Einsatzstahl wurden mit dem Scheibenlaser ohne Verwendung von Zusatzwerkstoff verschweißt. Dabei wurden Schweißparameter gefunden die eine hohe Schweißgeschwindigkeit und damit eine geringe Wärmeeinflusszone im Grundmaterial sowie die Nichtanschweißung des Innenrings garantieren. Eine Verhinderung des Anschweißens des Innenrings stellt bei Proben mit Kontakt ein wesentliches Kriterium dar.

Eine partielle Verschweißung dieses Bereiches würde ansonsten zur Verfälschung des Betriebsfestigkeitsversuchs führen.

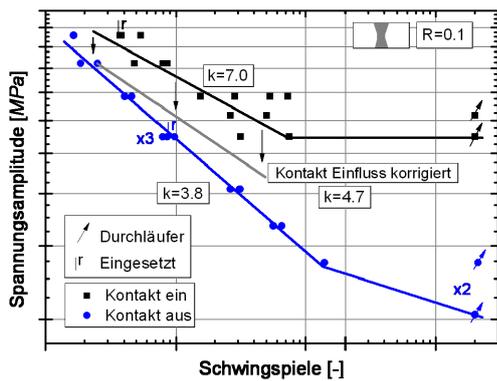


Abb. 11: Betriebsfestigkeitsverhalten artgleicher Laserschweißverbindungen – uniaxiale Zugschwellbelastung

Wesentliche Unterschiede konnten im dynamischen Verhalten von Proben verschiedener Steifigkeit, induziert durch den Kontaktbereich, beobachtet werden. Proben welche einen aktiven Kontakt aufweisen, scheinen höhere dynamische Lasten zu ertragen. Die metallographische Untersuchung von Schweißnähten mit oder ohne Kontakt gab aber keine Hinweise auf eine geänderte Nahtausbildung oder einer damit verbundenen anderwärtigen Erstarrungssituation während des Schweißprozesses. Weitergehende Simulation welche die Spannungsevolution im Bereich der Schweißnahtwurzel bei axialer Zugbelastung abbildete weist einen sich geänderten Kraftfluss innerhalb der Probe bei aktivem Kontakt aus. Der Wurzelbereich der Proben mit Kontakt erfährt bei einer axialen Belastung dadurch eine Entschärfung der Spannungssituation bis hin zum vollständigen Öffnen des Kontaktes bzw. der lokalen Plastifizierung dieses Nahtbereichs.

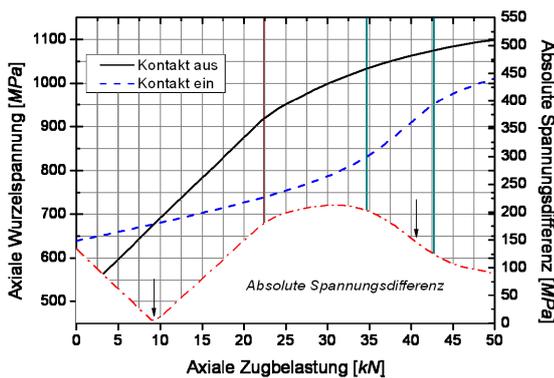


Abb. 12: Tatsächlich von der Schweißnahtwurzel ertragene Spannung bei axialer Zugbelastung

Eine Korrektur des Wöhlerdiagramms um die tatsächlich von der Schweißnaht ertragene Spannung gibt das dynamische Verhalten von Schweißproben ohne Kontakt wieder. Abweichungen diesbezüglich entstehen

durch die Verwendung der Nennwurzelgeometrie sowie abweichenden Materialdaten.

**Artfremde Materialpaarung** Unter denselben Voraussetzungen wurden auch Probenhälften aus Einsatzstahl und Guss miteinander verschweißt. Besonders bei Proben mit Kontakt und somit hoher Steifigkeit konnte eine signifikante Empfindlichkeit gegenüber dem Schweißprozess eruiert werden. Proben ohne Kontaktformulierung zeigten diesbezüglich ein wesentlich toleranteres Verhalten. Dies zeigte sich im Betriebsfestigkeitsversuch durch eine geringere Streuung der Proben ohne Kontakt.

Eine eindeutige betriebsfeste Charakterisierung von Zusatzwerkstoff frei verschweißten Materialpaarungen aus Guss und Einsatzstahl ist auf Grund der hohen Streuung und statistisch unzureichender Probenanzahl zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Als Maßnahmen um der großen Streuung und den geringen ertragbaren dynamischen Festigkeiten entgegenzuwirken wurde ein gezielter Laserstrahlversatz von der Fügekannte vorgenommen. Dabei wurde ausgehend vom Schweißen mit Null-Versatz der Laserstrahl sowohl in den Stahl- als auch in den Gussbereich der Probe versetzt.

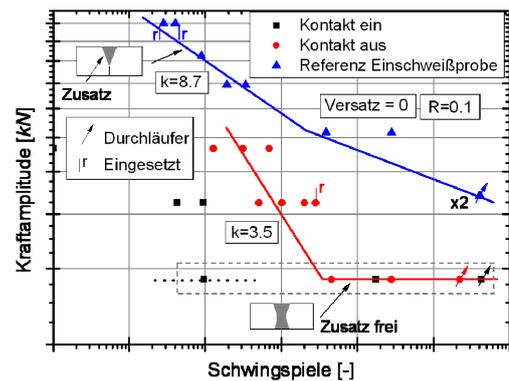


Abb. 13: Betriebsfestigkeitsverhalten artfremder Laserschweißverbindungen – uniaxiale Zugschwellbelastung

Bei festgesetzten Schweißparametern der Streckenenergie und Fokusslage konnte dabei eine wesentliche Steigerung der ertragbaren, dynamischen Festigkeit beim Versatz des Laserstrahles in den Gussbereich festgestellt werden. Es konnten dauerhaft ertragbare Belastungen von referenzierend mit Zusatzwerkstoff geschweißten Proben erreicht werden.

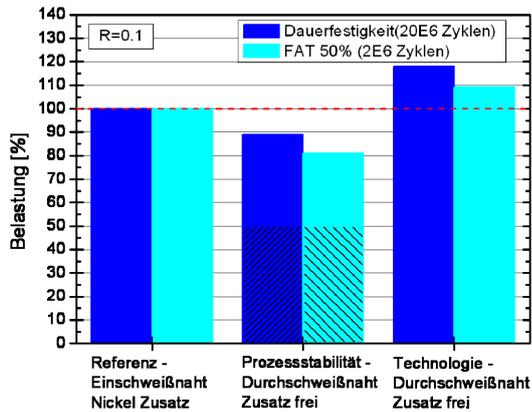


Abb. 14: Potential beim Zusatzwerkstoff freien Schweißen artfremder Laserschweißverbindungen

#### 4 Metallographie. Realversuch

**Artgleiche Materialpaarung** Bei Zusatzwerkstoff frei verschweißten artgleicher Proben konnte eine durchgehend sehr hohe Güte der Laserschweißnaht ausgewiesen werden. Auf Grund der hohen Schweißgeschwindigkeit beim Laserprozess findet eine lokale martensitische Aufhärtung beschränkt auf den unmittelbaren Schmelzbereich statt. Die Ausbildung einer sehr kleinen Wärmeeinflusszone garantiert für geringe Werkstoffschädigung und minimalen Verzug.

**Fraktographie** Untersuchungen ergaben keine Bevorzugung der dynamischen Schädigung im Bereich der Überschweißung. Das betriebsfeste Verhalten von artgleichen Proben wird eindeutig vom Einfluss der geometrischen Wurzelkerbe dominiert. Dies ist in guter Übereinstimmung zu den numerisch berechneten hohen Spannungen an der Schweißnahtwurzel.

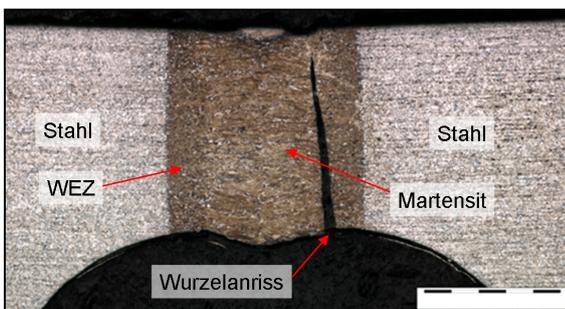
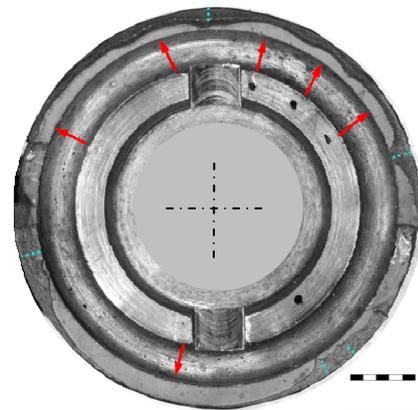


Abb. 15: Nahtausbildung und Schädigung artgleicher Laserschweißverbindungen

Topographische Untersuchungen des Wurzelbereichs offenbaren eine inhomogene Verteilung der Schädigungs- bzw. Rissinitiation. Lokale Überlasten an tangential ausgebildeten Schweißnahteinfällen initiieren vorwiegend das Versagen dieser Laserschweißnähte. Kennzeichnend für diese Stellen ist ihre asymmetrische Kerbgeometrie welche flach hin zur Schweißnaht verläuft aber abrupt, stufenförmig im Bereich der Wärmeeinflusszone endet. Derartige Bereiche stellen Regionen hoher Spannungsüberhöhung dar. Rissinitiation und Wachstum kann an

solchen gefährdeten Stellen beobachtet werden. Treffen die Risswachstumsfronten der jeweiligen Bereiche aufeinander können Sprungstellen identifiziert werden. Erreicht die dynamisch fortschreitende Schädigung einen kritischen Wert kann duktiler Restbruch im Grundwerkstoff der Proben beobachtet werden.



↑ ...Schwingbruch    ↓ ...Restbruch

Abb. 16: Schwing- und Restbruchanteil artgleich geschweißter Probenhälften

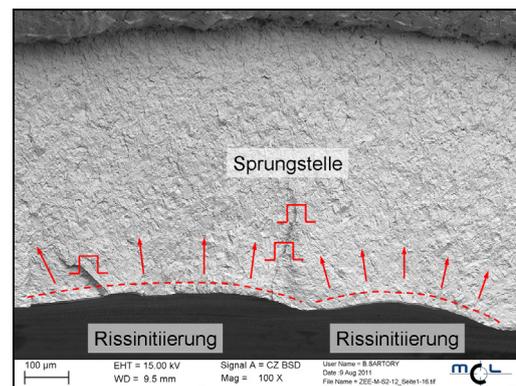


Abb. 17: REM Untersuchung - Rissinitiation an hochbelasteten tangentialen Einfallsbereichen der Nahtwurzel

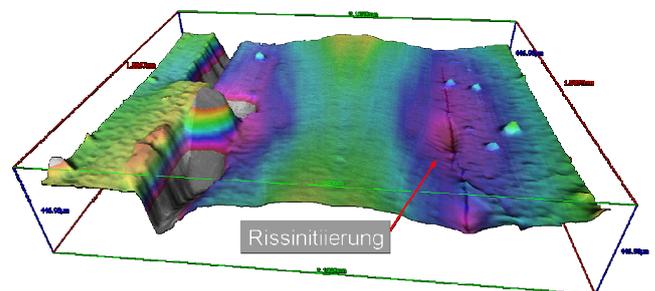


Abb. 18: Nahttopographie - Rissinitiation an hochbelasteten tangentialen Einfallsbereichen der Nahtwurzel

Es konnten mittlere Fehlergrößen im Bereich von 30 µm bis 500 µm in tangentialer Richtung festgestellt werden.

**Härtemessung** Ausgehend vom weichen Grundzustand des unbehandelten Einsatzstahls kann ein großer Anstieg der Härte hin zur Schweißnaht festgestellt werden. Auffallend ist der Einbruch der Härte im Bereich der unmittelbaren Schmelzzone. Der Bereich der Nahtwurzel liegt im Bereich der Maximalhärte. Dadurch erfährt die Nahtwurzel einerseits einen gewissen Schutz durch die hohe Festigkeit und die daran gekoppelte hohe Dauerfestigkeit des Martensits. Andererseits tritt das Bruchversagen unmittelbar und abrupt ein.

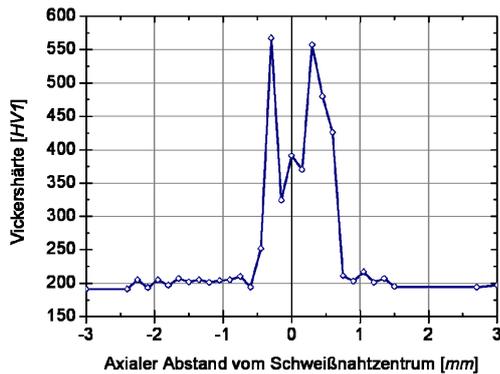


Abb. 19: Härteverteilung von artgleichen, Zusatzwerkstoff frei geschweißten Proben

**Artfremde Materialpaarung Fraktographie** Bei Zusatzwerkstoff frei verschweißten, artfremden Proben konnten vermehrt Ungängen im Bereich der gesamten Schweißnaht gefunden werden. Diese Bereiche beeinflussen die Festigkeit der Schweißnaht wesentlich, was sich im Betriebsfestigkeitsversuch eindeutig an der hohen Streuung sowie der vergleichsweise niederen ertragbaren dynamischen Festigkeit zeigt. Die Nahtausformung der artfremden Proben weicht wesentlich von der artgleich verschweißten Proben ab. Es konnte ein wesentlich sanfterer Nahtübergang an Nahtober- als auch Unterseite festgestellt werden. Auf Grund der vorhandenen Schweißnahtfehler kann keine eindeutige Zuordnung der versagenskritischen Stelle getroffen werden. Rissinitiierung konnte sowohl auf der Seite des Gusses als auch auf der Seite des Stahls festgestellt werden. Zentrale Brüche des austenitisch erstarrten Schweißgutes konnten auf Grund innerer Defekte vermehrt beobachtet werden.

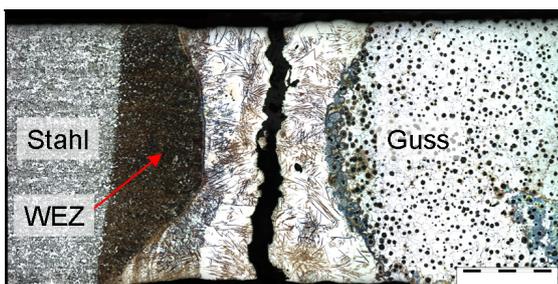


Abb. 20: Nahtausbildung und Schädigung artfremder Laserschweißverbindungen

Untersuchungen der Bruchfläche zeigen eine dendritische Struktur auf. Dies weist auf eine unvollständig stattgefundenen stoffschlüssigen Verbindung des austenitisch umgewandelten Schmelzbereiches hin. Dabei dienen die Randzonen nicht aufgeschmolzenen Materials bevorzugt als Kristallisationskeime für die dendritische Erstarrung aus der Schmelze. Dem Zwang des Temperaturgradienten folgend erfolgt eine sehr rasche Erstarrung hin zur Schweißnahtmitte. Auf Grund der sehr hohen Abkühlgeschwindigkeiten und fehlender Nachlieferung von Schmelze entstehen Erstarrungsflanken mit dendritischer Oberfläche. Stellen an denen solche Erstarrungsfronten aufeinandertreffen weisen keine stoffschlüssige Verbindung auf. Es kann nur von einer mechanischen „Verästlung“ dieser Bereiche gesprochen werden.

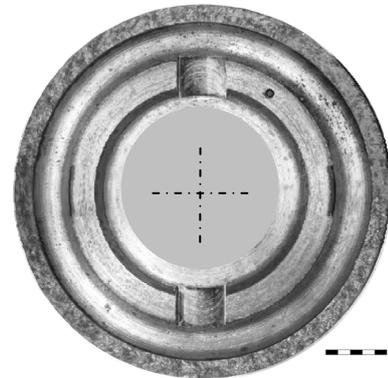


Abb. 21: Bruchfläche artfremd geschweißter Probenhälften

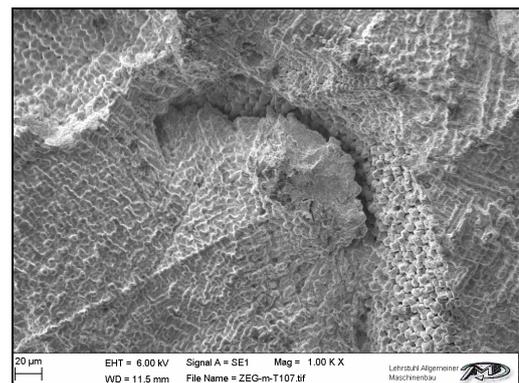


Abb. 22: REM Untersuchung – Ausbildung von Bereichen dendritischer Erstarrungsfronten bei artfremden Proben

Die Prozessstabilität und Schweißtechnologie bei artfremd, Zusatzwerkstoff frei geschweißten Verbindungen ist demnach von enormer Wichtigkeit um diese Technologie erfolgreich auf Bauteile anzuwenden.

**Härtemessung** Sowohl die Stahl- als auch Gussseite weisen wesentlich geringere Härte- werte als die metastabil, austenitisch umgewandelte Schmelz- zone auf. Härteanstiege im Inneren der Schmelzzone werden durch lokale in Martensitnadeln umgeklappte Bereiche beobachtet.

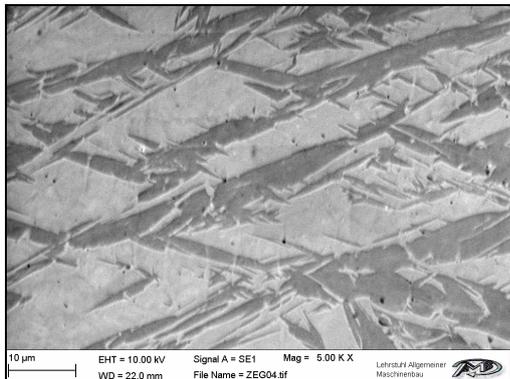


Abb. 23: Lokal in Martensit umgeklappte austenitische Bereiche

Wesentlich höhere Härte- werte zeigen die sich am Rand der Schmelzzone ausbildenden Säume mit fein- nadeliger, martensitischer Struktur auf.

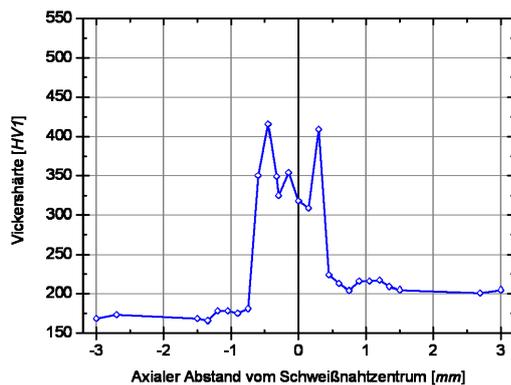


Abb. 24: Härteverteilung von artfremden, Zusatzwerkstoff frei geschweißten Proben

Härte- werte von bis zu 800 HV [BRA 2] werden hier lokal erreicht. Auf Grund der geringen Abmessungen dieser Säume stellen diese aber meist keine versagenskritischen Bereiche der Schweißnaht in den beobachteten Versuchen dar.

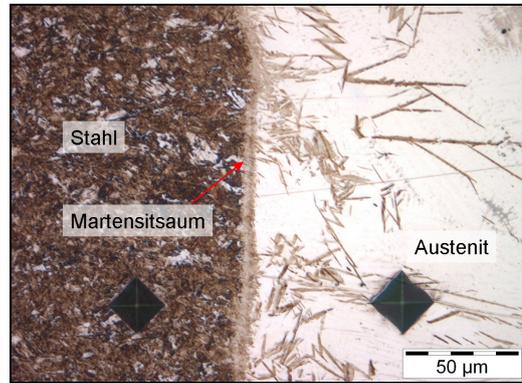


Abb. 25: Ausbildung eines feinen, martensitischen Saumes auf der Stahlseite der Probe

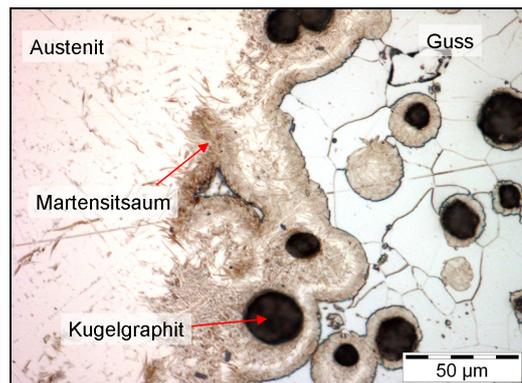


Abb. 26: Ausbildung eines feinen, martensitischen Saumes auf der Gussseite der Probe

#### 4 Rechnerische Bewertung

**Artgleiche Materialpaarung** Die klassischen Berechnungskonzepte müssen besonders bei dünnwandigen, geschweißten Strukturen kritisch betrachtet werden [BAU 1]. Ausgehend von der Geometrie der Nahtwurzel und Oberfläche wurde ein Finite Elemente Modell abgeleitet. Dabei wurden die Übergangsbereiche der Naht hin zur Wärmeeinflusszone mit Übergangsradien von 0,05 mm ausgerundet. Die Berechnung erfolgte linear elastisch mit quadratischen Elementen. Die Elementgröße im kritischen Schweißnahtbereich liegt bei 4,4 µm. Somit wird die Struktur der Wurzelkerbe sehr gut abgebildet. Dieses Vorgehen ist in Übereinstimmung mit Modellierungsrichtlinien des IIW für dünnwandige Strukturen [DVS 1].

Zur Auswertung wurde die auf Nennspannung berechnete Spannung innerhalb des verschweißten Kreisrings mit der lokal höchsten von-Mises Vergleichsspannung in Relation gesetzt.

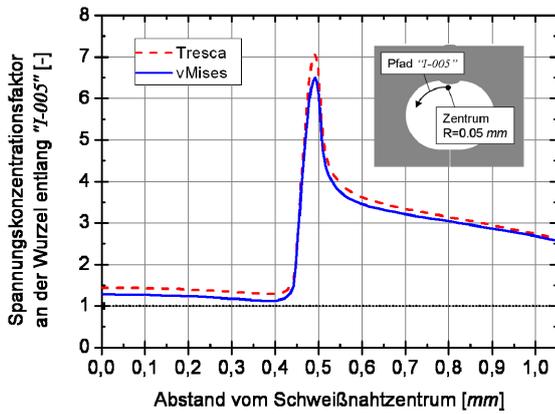


Abb. 27: Bewertung des Spannungsverlaufes entlang der modellierten Wurzelkerbe nach IIW-Richtlinien

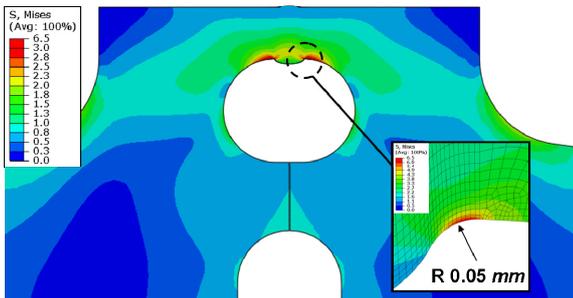


Abb. 28: Bewertung des Spannungsfeldes an der Wurzelkerbe nach IIW Richtlinien

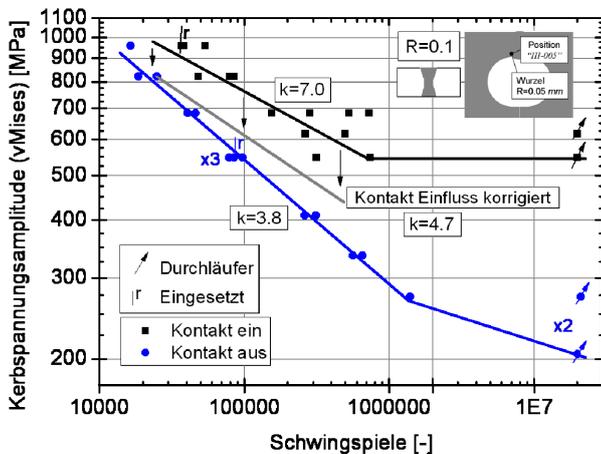


Abb. 29: Bewertung des betriebsfesten Verhaltens artgleicher, Zusatzwerkstoff frei verschweißter Stahlverbindungen

## 5 Zusammenfassung

Die Einführung des Zusatzwerkstoff freien Laserschweißens von artgleichen als auch artfremden Materialkombinationen birgt sehr hohes Kostenpotential in Bezug auf Taktzeiten und Materialkosten. Diese Voruntersuchungen zeigen die eindeutige Anwendbarkeit dieser Technologie auf Zusatzwerkstoff frei verschweißte, artgleiche Stahlverbindungen. Bei artfremden Verbindungen aus Einsatzstahl und Guss zeigt sich ein wesentlich engeres Prozessfenster,

sowie höhere technologische Anforderungen an die Fügeanlagen und die Metallurgie [BÜN 1]. Statistisch geringe Abweichungen im Fügeprozess als auch technologisch optionale Maßnahmen wie Vorwärmung und Nahtverfolgung sind für eine erfolgreiche Einführung des Zusatzwerkstoff freien Laserschweißens von Guss und Stahl unbedingt anzudenken.

Die Möglichkeiten der modernen Schweißsimulation helfen bereits beim Design von Fugesitzen künftiger Bauteile und ermöglichen so den experimentellen Aufwand zu minimieren. Weitergehende Ansätze die numerische Schweißsimulation über die Vergleichsrechnung hinweg einzubeziehen und Schädigungen am Bauteil anhand numerischer Schädigungsrechnung zu ermitteln werden angestrengt. Lokale Ansätze zur Prognose der Lebensdauer wie lokale Kerbspannungen, Kerbspannungsintensität oder auch energiebasierende Methoden [FIS 1] sollen die tatsächlich lokal auftretenden Verhältnisse besser widerspiegeln wie dies zurzeit über Gestaltfestigkeitswerte der Fall ist [THA 2].

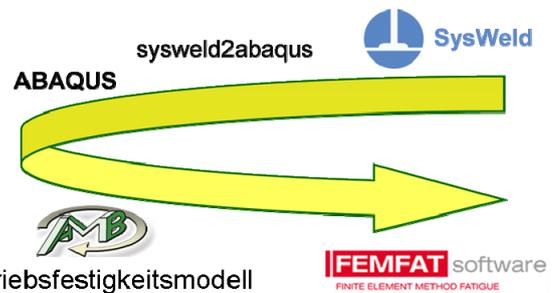


Abb. 30: Geschlossene Simulationskette zur Bauteilauslegung

Eine künftig geschlossen Simulationsschleife hin von der Schweißprozesssimulation zur numerischen Lebensdaueranalyse soll den Entwicklungszeitraum künftiger Komponenten senken und genauere Berechnungsmittel über die zu erwartende Schädigung und damit verbundene Bauteillebensdauer bereitstellen.

## 6 Quellenverzeichnis

[BAU 1] J. Baumgartner, T. Bruder, H. Hanselka, *International Journal of Fatigue*, 2011, Fatigue Strength of Laser Beam Welded Automotive Components Made of Thin Steel Sheets Considering Size Effects

[BÜN 1] A. Bünting, S. Francke, *DVS – Kongress 2010*, Nürnberg, Laserstrahlschweißen von Gusseisen und Einsatzstahl ohne Zusatzwerkstoff

[BRA 1] E. Brandstätter, *Joanneum Research - Forschungsbericht Laserzentrum Leoben*, Laserschweißen von Getriebe- und Antriebskomponenten

[BRA 2] E. Brandstätter, *Joanneum Research - Forschungsbericht Laserzentrum Leoben*, Laserschweißen unüblicher Materialkombinationen

[DVS 1] *Festigkeit geschweißter Bauteile*. Anwendbarkeit lokaler Nachweiskonzepte bei Schwingbeanspruchung, DVS Media, 2009, S. 18

[EBN 1] R.Ebner, *Habilitationsschrift*, Leoben, 1995, Laserstrahlschweißen von Massivbauteilen

[FIS 1] C. Fischer, O. Feltz, W. Fricke, P.Lazzarin, *WELDING IN THE WORLD*, Vol. 55 Nr. 07/08

[IIW1] *IIW document IIW-1823-07*, RECOMMENDATIONS FOR FATIGUE DESIGN OF WELDED JOINTS AND COMPONENTS, A. Hobbacher, 2008

[STO 1] M. Stoschka, M. Thaler, H. Huemer, *ICM 2011*, Mailand, Contribution to the fatigue assessment of laser welded joints

[THA 1] M. Thaler, M. Stoschka, H. Huemer, *IWOTE 2011*, Bremen, Application example of local thermo-mechanical simulation of laser welded joints

[THA 2] M. Thaler, M. Stoschka, H. Huemer, *FEMFAT User Meeting 2011*, Steyr, Integrated simulation of weld seam fatigue