

Drei in einem Kopf

Ein Laserkombikopf integriert die Verfahren zum Schneiden, Messen und Schweißen

Bei der Herstellung von Blechbaugruppen lassen sich durch die Integration von mehreren Laserverfahren in einer Maschine unproduktive Nebenzeiten senken und die produzierbare Variantenvielfalt erhöhen. Ein Laserkombikopf, der schneiden, messen und schweißen kann, macht dies möglich. Denn was man nicht im Kopf hat ...

Um von den prozesstechnischen Vorteilen der Lasertechnik hinsichtlich Produktivität, Qualität und Flexibilität zu profitieren, wurden beim Einsatz von Hochleistungs-Laserstrahlquellen zum Schneiden und Schweißen in der Blechbearbeitung noch vor wenigen Jahren hohe Fixkosten und Anschlussleistungen in Kauf genommen. Mit den heutigen Scheiben- und Faserlasern werden aufgrund

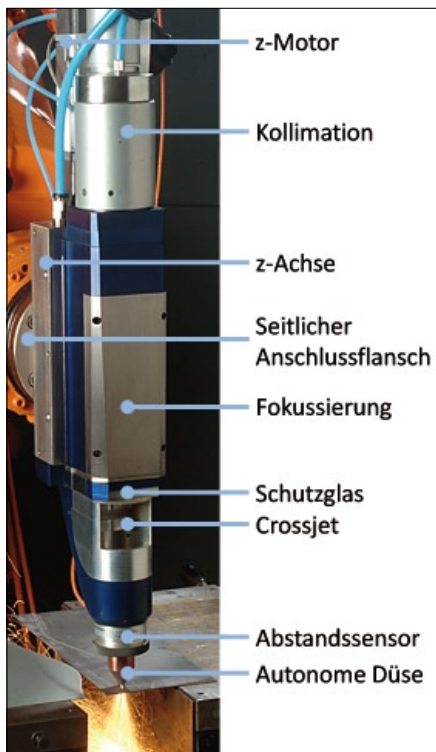


ABBILDUNG 1: Kombikopf F2-Y für Standardroboter.

ihrer höheren Systemeffizienz und -verfügbarkeit und der signifikanten Reduzierung von Stellfläche, Betriebskosten und Wartungsaufwand weitere attraktive Potenziale zur Ressourcenschonung und Energieeffizienz erschlossen.

Die Kosten pro Bauteil sinken nachwievor maßgeblich mit dem Teiledurchsatz. Diese Rechnung setzt allerdings voraus, dass die Fertigungsanlage ausreichend ausgelastet wird. Angesichts der heutigen Produkt- und Variantenvielfalt und der stetigen Produktveränderung ist die wirtschaftliche Auslastung einer Maschine aufgrund der sinkenden Losgröße häufig nur noch dann zu gewährleisten, wenn sie sich flexibel ohne signifikante Nebenzeiten auf wechselnde Produktformate und Bearbeitungsaufgaben einstellen kann. Ein Beispiel ist die Kombination der Prozessschritte Schneiden und Schweißen in einer Maschine – zusätzlich ergänzt durch die Möglichkeit der prozessintegrierten Bauteilvermessung [1].

Der Kombikopf

Die Kombination des Laserschneidens und Laserschweißens mit einem Bearbeitungskopf erlaubt ohne einen Eingriff in die Anlage eine höhere Flexibilität in der Anlagenbelegung, die freie Optimierung der Fertigungsfolge und die Reduzierung von Umspann-, Lager- und Transportzeiten. Hierzu hat das Fraunhofer ILT einen Kombikopf (Abb.1) entwickelt, der von der Laserfact GmbH in ein industrielles Produkt überführt wurde und sowohl für fasergekoppelte Strahlquellen mit 1µm Wellenlänge als auch für CO₂-Laser vermarktet wird.

Mit dem Kombikopf ist es möglich, Laserschneid- und -schweißoperationen in einer Maschine ohne Wechsel des Bearbeitungskopfes durchzuführen. Durch eine automatische Anpassung von Prozessgasart und -volumenstrom, von Fokus- und Düsenabstand, sowie von Laserleistung und Geschwindigkeit

DIE AUTOREN

DIRK PETRING

Dr. Dirk Petring promovierte 1994 an der RWTH Aachen auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Modellierung des Laserstrahlschneidens, nachdem er bereits 1986 am Fraunhofer ILT die Gruppe „Schneiden“ gegründet hatte, die 1989 unter seiner Leitung zur Abteilung „Trennverfahren“ ausgebaut wurde. 1998 übernahm er zusätzlich die Verantwortung für das Makrofügen und leitet heute die Gruppe Makrofügen & Schneiden. Daneben ist er seit 2006 Mitbegründer und Gesellschafter der Laserfact GmbH.



FRANK SCHNEIDER

Dr. Frank Schneider ist am Fraunhofer ILT Ansprechpartner für das Leistungsangebot „Laserschneiden“.

HARALD DICKLER

Harald Dickler ist Mitbegründer und geschäftsführender Gesellschafter der Laserfact GmbH.

Dr. rer. nat. Dirk Petring
Makrofügen, Schneiden
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik
Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Germany
Tel.: +49 (0)241 8906 210
Fax: +49 241 8906 121
E-Mail: dirk.petring@ilt.fraunhofer.de
Website: www.ilt.fraunhofer.de

keit realisiert er einen schnellen Prozesswechsel. Die sogenannte „autonome Düse“ liefert dazu den Gasstrahl fürs Schneiden und das Schutz- und Prozessgas fürs Schweißen. Das Konzept dieser coaxialen Düse gestattet anstelle des sonst beim Schneiden erforderlichen Druckraumes einen offenen Bereich zwischen Düse und Optik und da-

mit die Integration eines Cross-Jets (vgl. Abb. 1). Dieser Cross-Jet ist insbesondere während des Schweißprozesses, bei dem nur ein geringer Gasvolumenstrom aus der koaxialen Düse zulässig ist, unverzichtbar, um die Optik bzw. das Schutzglas unterhalb der Optik vor Rauch und Schmelzspritzern zu schützen. Zudem können mit der autonomen Düse Schneidgasdrücke von über 20 bar aufgebaut werden, ohne dass eine hochdruckfeste Optik erforderlich ist. Die Konstruktion des Optikmoduls konnte sich also vollständig auf die Optimierung seiner optischen Funktionen konzentrieren.

Der Kombikopf ist modular aufgebaut (siehe Abb. 1). Die Standardversion F2-Y verfügt über ein vollintegriertes, gekapseltes Optikmodul mit Schnellwechseleinrichtungen für Schutzglas und Fokussiereinheit ($f=200\text{--}300\text{mm}$). Zwischen autonomer Düse und Schutzglasschublade sorgt das Mehrstrahl-Crossjetmodul für den effektiven Optikschatz. Ein ebenfalls integrierter dynamischer z-Achsen-Antrieb dient der automatischen Abstandsregelung, die ihre Messwerte von einem in der Düse integrierten kapazitiven Abstandssensor erhält.

Bei Umorientierungen des Kopfes um Werkstückkanten führen die Handachsen des Roboters ruckartige Bewegungen und Richtungswechsel aus, die die Lichtleitfaser insbesondere im Bereich des Fasersteckers durch Torsion, Biegung und „Peitscheneffekte“ stark beanspruchen können. Diese Belastung der Faser wird vermieden, wenn der Roboter zumindest in den handnahen Achsen über eine achsenintegrierte Strahlführung verfügt. In diesem Fall kann der Faserankopplungspunkt und die Strahlkollimation in einen vom Kopf weiter entfernten, unkritischeren Bereich innerhalb der Strahlführung des Roboters verlagert werden. Der kollimierte Laserstrahl wird dann mit Umlenkspiegeln durch die letzten 2 oder 3 Rotationsachsen des Roboters zur Fokussierungsoptik des Bearbeitungskopfes geleitet.

Für achsenintegrierte Strahlführungen wurde die Kombikopfversion F2-X entwickelt, bei der über einen Anschlussflansch eine mechanisch und optisch koaxiale Anbindung an die letzte Rotationsachse des Roboters gestattet ist. Die integrierte z-Achse zur freien Positionierung und für die Abstandsregelung wurde so umgestaltet, dass sie den Kopf relativ zum koaxialen Flansch bewegt und nicht entlang einer seitlichen Anbindung. Um eine ausreichende Dynamik bei der Umorientierung um Kanten zu erzielen, sind kurze Werkzeuglängen von Vorteil.

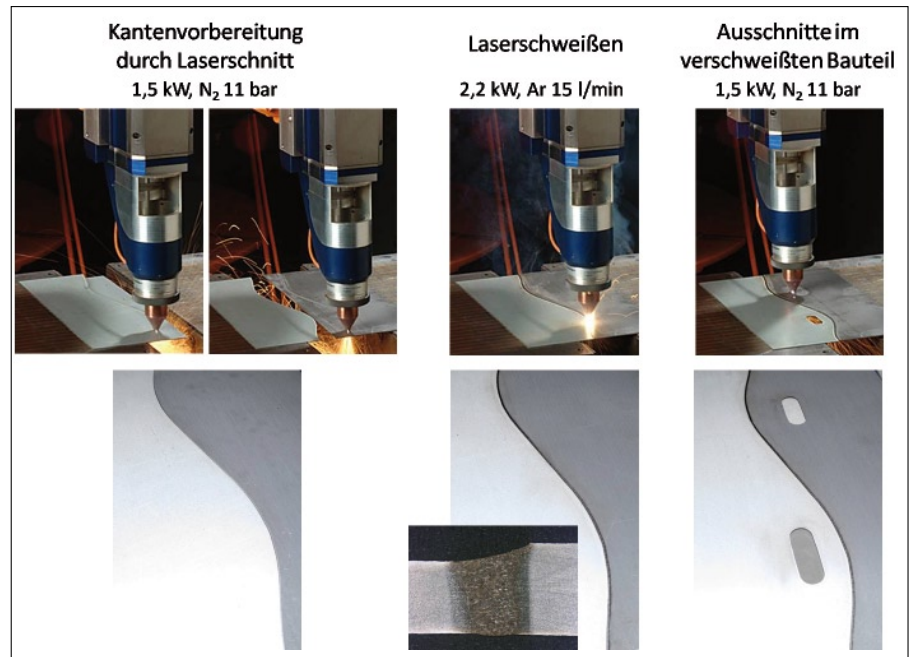


ABBILDUNG 2: Schneiden und Schweißen von nicht-linearen Tailored-Blanks aus verzinktem Stahl (1mm/1.2mm) mit dem Konzept identischer Bahnfolge mit Knickarm-roboter bei 8m/min.

Entsprechend wurde dieser Kombikopf gegenüber der Standardversion mit seitlicher Anbindung verkürzt. Dafür wurden nicht nur die z-Achse, sondern auch die Fokussiereinheit, ihre Justierelemente sowie die Medienanschlüsse angepasst. Der untere Teil des Kopfes konnte aufgrund des modularen Aufbaus unverändert beibehalten werden.

Schalten zwischen Schneiden und Schweißen

Beim Prozesswechsel werden die Fokusslage und der Düsenabstand relativ zur Werkstückoberfläche gleichzeitig verändert. Beim Wechsel vom Schneiden zum Schweißen wird der gesamte Kopfabstand vergrößert. Die koaxialen Strömungseigenschaften der autonomen Düse lassen dabei einen weiten Variationsbereich für die Wahl des Schweißabstandes zu, so dass ausgehend von den optimierten Schneidparametern auch optimierte Schweißparameter einstellbar sind. So gibt es im Prinzip keine Unterschiede zwischen den Parametereinstellungen und Prozessfähigkeiten des Kombikopfes im Vergleich zu Standardschneid- und Standard-schweißköpfen.

Gelegentlich wird die Meinung vertreten, dass adaptive Optiken oder motorisierte Düsen erforderlich wären, um beim Wechsel zwischen Schneid- und Schweißprozess den Düsenabstand und die Fokusslage relativ zum Werkstück unabhängig voneinander zu verändern. Bei den bisherigen Anwendungen hat sich jedoch gezeigt, dass mit der autono-

men Düse und bei korrekter Auslegung von Kollimations- und Fokussierungsoptik eine feste Einstellung des Fokussabstandes von der Düsen spitze gefunden werden kann, bei dem sowohl das Schneid- als auch das Schweißergebnis mindestens den mit reinen Schneid- oder Schweißköpfen erzielten Einzelergebnissen entspricht. Lediglich Kopf-abstand, Gasart und -volumenstrom (bzw. -druck), Laserleistung und Prozessgeschwindigkeit werden automatisch durch die entsprechend programmierte Maschinensteuerung angepasst. Die Einsparung weiterer optischer und mechatronischer Elemente reduziert die Komplexität des Kombikopfes auf das erforderliche Maß und gewährleistet eine maximale Robustheit des Systems.

Vorteile der integrierten Prozesskette

Die Kombinationsbearbeitung ermöglicht verkürzte, integrierte Prozessketten, eine hohe Maschinenauslastung, eine flexible und wirtschaftliche Fertigung von Varianten sowie Einsparungen bei der Handhabung, Positionierung und Fixierung von Teilen. Ein Umrüsten der Maschine, wie es üblicherweise für einen Prozesswechsel erforderlich ist, entfällt vollständig.

Daneben gibt es technologische Vorteile, die sich insbesondere aus dem identischen Tool-Center-Point (TCP) für die Schneid- und die Schweißoperationen sowie der Freiheit in der Auswahl der optimalen Prozessfolge aus Schneid- und Schweißschritten ergeben.



ABBILDUNG 3: Kombiniertes CO₂-Laserschneid- und -schweißsystem in der Verzinkungslinie der ThyssenKrupp Steel in Bochum.

Manchmal ist es sinnvoller, Ausschnitte, Optionslöcher oder Funktionskanten erst nach dem Fertigschweißen eines Bauteiles einzubringen, um eine ausreichende Form- und Lagegenauigkeit der Schnittkanten sicherzustellen. In anderen Fällen ist eine präzise Fügekantenvorbereitung durch Laserschneiden vor dem Laserschweißen – aber bereits in der gleichen Aufspannung – die ideale Prozessfolge. Der identische TCP führt in beiden Fällen zu verkürzten Toleranzketten und die integrierte Prozesskette gestattet einen höheren Teiledurchsatz. Wenn die Kantenvorbereitung direkt vor dem Schweißen mit dem Kombikopf durchgeführt wurde, erübrigt sich sogar eine sensorgestützte Schweißfugenverfolgung. Der konstante TCP und eine unveränderte Einspannung der Komponenten gewährleisten, dass die genauen Koordinaten der Schweißbahn entlang der lasergeschnittenen Kanten im Maschinensystem bekannt sind und daher exakt abgefahren werden.

Das Konzept identischer Bahnfolge

Immer wenn Schneid- und Schweißoperationen bei der Kombinationsbearbeitung identische Bahnfolgen in unveränderter Einspannung nutzen können, werden aufgrund der präzisen Prozessfolge die Bearbeitungsergebnisse problemlos reproduzierbar. Auf diese Weise können selbst Maschinen mit eingeschränkter Bahngenauigkeit aber ausreichender Wiederholgenauigkeit, wie z.B. Knickarmroboter, mit höheren Geschwindigkeiten als sonst üblich betrieben werden.

Anhand der Herstellung von nicht-linearen Tailored Blanks mit dem Kombikopf wird das Konzept identischer Bahnfolge (englisch: IPC = Identical Path Concept) anschaulich [1]. Abbildung 2 zeigt ein Tailored Blank, das mit einem 6-Achsen-Knickarmroboter hergestellt wurde. Wie im Bild von links

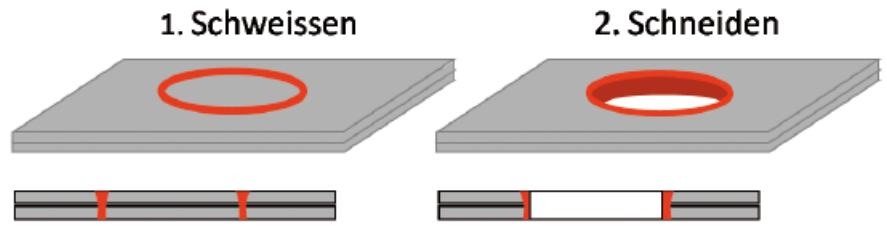


ABBILDUNG 4: Herstellung einer versiegelten Überlapp-Durchgangsbohrung durch Laserschweißen einer Überlappnaht und anschließendes Laserschneiden der Bohrung am Innenrand der Naht.

nach rechts dargestellt, werden die Kanten zunächst durch Laserschneiden vorbereitet, dann zusammengeschoben und danach entlang derselben Bahn verschweißt. Selbst die bei einer Schneid- und Schweißgeschwindigkeit von 8 m/min stark eingeschränkte Genauigkeit eines Standardroboters liefert konstant gute Schweißverbindungen, weil nur die Wiederholgenauigkeit mit identischer Bahnkontur erforderlich ist. Zum Schluss werden noch optionale Ausschnitte in das fertig geschweißte Bauteil in beide Fügepartner eingebracht. Die Ausschnitte erhalten durch die gewählte Prozessfolge eine bestmögliche Positionierung und Ausrichtung und können auch über die Schweißnaht hinweg ausgeführt werden.

Eine andere Anwendung des Konzeptes identischer Bahnfolge ist die Bearbeitung von Bandenden zur Herstellung „endloser“ Metallbänder z.B. in Inspektions- und Beschichtungslinien während der Veredelung des Materials (siehe Abb. 3). Dabei besäumt der Kombikopf zunächst das Bandende des vorlaufenden Coils und dann den Bandanfang des anschließenden Coils. Danach wird das Coilende an den Coilanfang gestoßen und der gleiche Kopf schweißt die Bandkanten stoffschlüssig zusammen. Nachfolgend erfolgen noch zwei Taillierungsschnitte an den Bandseiten, um eventuelle Band-

überstände zu egalisieren und damit einen gleichmäßigen Lauf des Bandstoßes durch die Rollengerüste der Linie zu gewährleisten. Diese Anwendung ist seit 3 Jahren bei ThyssenKrupp Steel in Deutschland und mittlerweile auch in den USA im Einsatz [2].

Eine weitere Möglichkeit der Kombibearbeitung besteht in der Herstellung versiegelter, spaltkorrosionsfreier Überlappbohrungen (siehe Abb. 4). Dabei wird im ersten Prozessschritt die Kreisbahn im Überlapp lasergeschweißt und im direkten Anschluss der Innenrand der Kreisnaht durch Laserschneiden besäumt. Hier gestattet das Konzept identischer Bahnfolge unter Berücksichtigung eines Radius-Offsets mit dem konstanten TCP der Kombibearbeitung eine präzise Positionierung des Besümschnittes zur Schweißnaht ohne Nahtsensorik. Auf ähnliche Weise können Funktionselemente wie Muttern, Bolzen oder Montageplatten exakt in die Baugruppe eingepasst werden.

Das Konzept korrigierter Koordinaten

Bei der 3-D-Bearbeitung muss das Konzept identischer Bahnfolge in die dritte Dimension ausgedehnt werden. Während bei der 2-D-Bearbeitung die Schnittkontur und damit auch der Fügestoß in der Blechebene

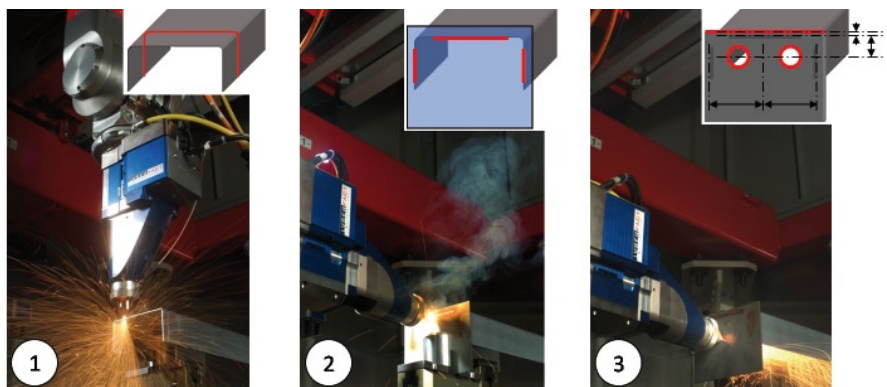


ABBILDUNG 5: Konzept korrigierter Koordinaten beim Schneiden und Schweißen einer Profil-Flansch-Verbindung. 1: Schneiden des Profils auf Längenmaß mit simultaner Konturvermessung, 2: Schweißen der Profil-Flansch-Verbindung im verdeckten T-Stoß mit korrigierten Koordinaten, 3: Schneiden von Flanschkannten und -aperturen im korrigierten Koordinatensystem.

durch die lateralen Schnittkantenkoordinaten bereits wohldefiniert ist, beinhaltet die 3-D-Bearbeitung zusätzlich die Höhenkontur der geformten Oberfläche und die Umorientierung des Bearbeitungskopfes senkrecht zu dieser Oberfläche. Häufig ist diese Kontur nicht genau definiert, sondern variiert von Bauteil zu Bauteil aufgrund von Toleranzen in der Vorfertigung durch Tiefzieh- oder Biegeprozesse oder in der Spannvorrichtung. Dadurch können Abweichungen der Lage der Füge Stoßkanten von den Sollkoordinaten auftreten – was bei I-Nähten am Stumpfstoß zu entsprechendem Kantensversatz und bei verdeckten T-Stößen zu einem Naht-Steg-Versatz führen kann.

Auch hierfür bietet die Kombinationsbearbeitung aufgrund des konstanten TCP und der unveränderten Einspannsituation eine wirkungsvolle Lösung. Zur Kompensation der Geometrieabweichungen werden die erforderlichen Informationen über die Abweichung der Höhenkontur des Bauteils während des Schneidvorganges mit der kapazitiven Abstandssensorik des Kombikopfes gemessen. Während sie für die Regelung des Düsenabstandes sorgt, werden die Höhenkoordinaten der kopfinternen Achse zusammen mit den aktuellen Bahnkoordinaten der Maschine aufgezeichnet. Diese Werte dienen der Berechnung der realen Bauteilkontur und werden automatisch zur entsprechenden Korrektur des sich an den Schneidvorgang anschließenden Schweißprogrammes verwendet. So lassen sich komplexe Blechbaugruppen in einer integrierten Prozesskette zuschneiden, vermessen, schweißen und fertigzuschneiden.

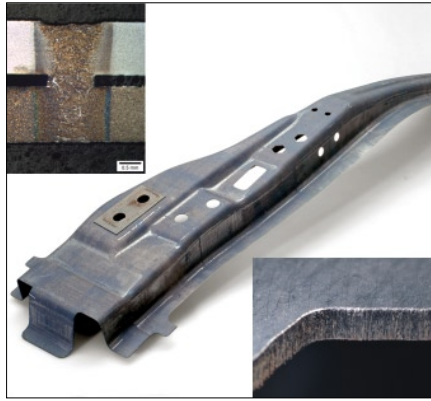


ABBILDUNG 6: Durch kombiniertes Schneiden und Schweißen bearbeitete B-Säule mit Querschnitt der Überlappungsschweißnaht im Verstärkungsblech und Detail der Schnittkonturen.

In Abbildung 5 wird das Konzept korrigierter Koordinaten (englisch: CCC = Captured Coordinates Concept) anhand der kompletten Prozesskette für eine Profil-Flansch-Verbindung demonstriert [1]. Sie beinhaltet das Besäumen des U-Profiles mit simultaner Aufzeichnung der Höhenkoordinaten auf Basis der Daten der kapazitiven Abstandssensorik, das Schweißen des verdeckten T-Stoßes von Flansch und Profil mit dem korrigierten Bahnprogramm und das passgenaue Schneiden kreisförmiger Bohrungen in den Flansch mit exakter Position relativ zur Profilquerschnittsfläche, ebenfalls auf Basis der vorher gesammelten Profil-Messdaten.

Beispiel B-Säule

Eine zunehmend wichtige lasertechnische Anwendung besteht in der Fertigung von Fahrzeugkomponenten aus ultrahochfesten Stahlwerkstoffen. Sie wird getrieben durch den Einsatz von pressgehärteten MnB-Stählen insbesondere für crash-relevante Komponenten. Ziel ist die Gewichtsreduzierung bei gleichzeitiger Verbesserung der Festigkeit des Bauteils. Ein bekanntes Beispiel ist das Besäumen der Außenkontur und das Löcherschneiden an B-Säulen aus 22MnB5 mit Laserstrahlung. Mechanische Schneidverfahren scheiden angesichts der Werkstoffeigenschaften im pressgehärteten Zustand aus. Mit der Verfügbarkeit der 3-D Kombibearbeitung können nun zusätzliche Schweißschritte in die Prozesskette ohne Kopf- oder Anlagenwechsel integriert werden.

Abbildung 6 illustriert eine typische Prozessfolge in der B-Säule: Zunächst werden die Löcher eingebracht, danach erfolgt der äußere Besäumschnitt. Im Anschluss wird

ein Verstärkungsblech aufgeschweißt, in das schließlich noch Löcher durch den Überlappverbund aus Säulen- und Verstärkungsblech geschnitten werden. Alle Schritte erfolgen in einer Aufspannung, so dass hohe Toleranzanforderungen bis zum letzten Prozessschritt eingehalten werden können.

Zur Realisierung dieser Prozesskette wurde der Laserportalroboter RLP16 von Reis Robotics mit dem Kombikopf F2-X ausgestattet (siehe Abb. 7). Zudem wurde der Faserlaser YLR4000SS von IPG mit einer Prozessfaser mit einem Durchmesser von 100 µm an das integrierte Strahlführungssystem angebunden und mit einer maximalen Leistung von 2.5 kW betrieben.

Die großen Konturen wurden mit Geschwindigkeiten von 1.5 m/min, die Löcher mit 3–9 m/min geschnitten, abhängig von ihrem Radius und der Materialdicke. Die Schweißgeschwindigkeit betrug 3 m/min für die Überlappnaht aus Verstärkungsblech (1.3mm) und Säulenblech (1.4 mm). Die gesamte Bearbeitungszeit lag selbst mit der niedrig gewählten Maximalleistung von 2.5 kW bei einer Minute.

Fazit

Durch die Integration von Laserschneid-, -mess- und -schweißprozessen in einer flexiblen, ressourceneffizienten und rekonfigurierbaren Fertigungsumgebung auf Basis der Kombinationsbearbeitung entstehen neue Möglichkeiten für intelligente Prozessketten.

DAS UNTERNEHMEN

Laserfact GmbH Aachen

Die Laserfact GmbH entwickelt, baut und liefert seit dem Jahr 2006 Strahlwerkzeuge für die flexible Fertigung mit Lasern. Maxime von Laserfact ist die Bereitstellung von Bearbeitungsköpfen, die in der industriellen Laseranwendung besonders zuverlässig, wirtschaftlich und flexibel arbeiten. Die Lösungen von Laserfact erreichen durch intelligentes Optik- und Düsendesign und soliden Maschinenbau Spitzenleistungen mit verblüffender Einfachheit in Gestaltung, Bedienung und Anwendung.

www.laserfact.de

DAS INSTITUT

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT Aachen

Mit über 300 Mitarbeitern und rund 11 000 m² Nutzfläche zählt das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT weltweit zu den bedeutendsten Auftragsforschungs- und Entwicklungsinstituten seines Fachgebietes. Unter einem Dach bietet das Institut Forschung und Entwicklung, Systemaufbau und Qualitätssicherung, Beratung und Ausbildung in den Technologiefeldern Laser & Optik, Lasermaterialbearbeitung, Medizintechnik & Biophotonik sowie Lasermesstechnik. Dazu stehen zahlreiche industrielle Lasersysteme verschiedener Hersteller sowie eine umfangreiche Infrastruktur zur Verfügung.

www.ilt.fraunhofer.de

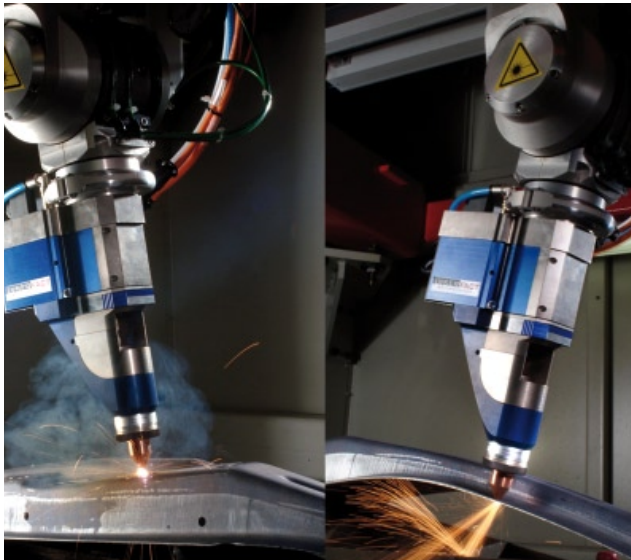


ABBILDUNG 7: Kombikopf F2-X im Einsatz: Schneiden der Außenkontur (rechts) und Schweißen des Verstärkungsbleches (links) einer B-Säule.

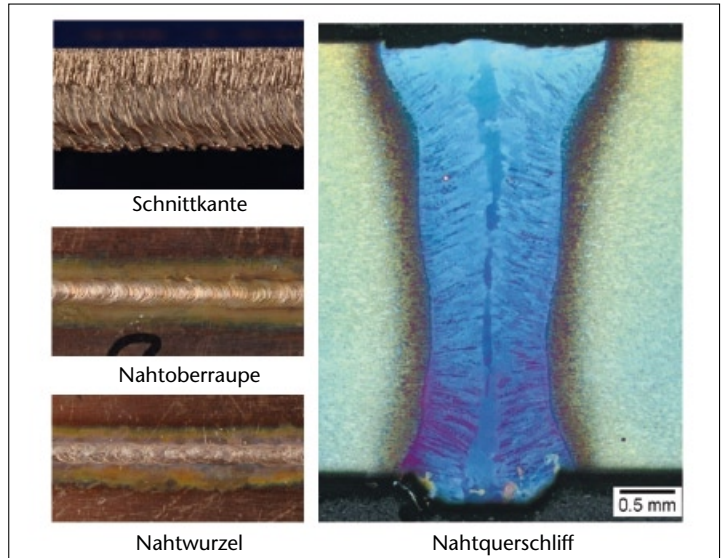


ABBILDUNG 8: Schneiden und Schweißen von Kupfer mit dem Kombikopf. (Werkstoff: CuNi3Si1Mg, Blechdicke: 4mm, Leistung: 4kW, Faserdurchmesser: 50µm, Schneidgeschw.: 2m/min, Schweißgeschw.: 2m/min)

ten. Um die Vorteile der mit dem Kombikopf multifunktional gewordenen Lasersystemtechnik konsequent zu nutzen, lohnt es sich, die bisherigen Konstruktionen von Baugruppen zu überdenken, denn sie gehen von den eingeschränkten Möglichkeiten konventioneller Prozessketten aus. Eine exakte Fügekantenvorbereitung unmittelbar vor dem Schweißprozess sowie Fertigschneid-Prozeduren nach dem „Fertigschweißen“ von Baugruppen in der gleichen Aufspannung eröffnen in einer integrierten Prozesskette vielfältige Verbesserungspotenziale hinsichtlich

Genauigkeit, Funktion und Leichtbau. Beispiele dafür sind das maßgenaue Einbringen von Optionslöchern, das Genauschneiden von Funktions- oder Anschlusskanten und das Abschneiden von nach dem Schweißen überflüssigen Montage-, Spann- und Stützanteilen. Selbst Untersuchungen zum kombinierten Schneiden und Schweißen von Kupferwerkstoffen mit dem Laserkombikopf zeigen vielversprechende Ergebnisse (siehe Abb. 8) mit interessanten Perspektiven für die Herstellung stoffschlüssig verbundener Kupferkomponenten.

Referenzen

- [1] D. Petring, F. Schneider, H. Dickler: „Progress in cutting and welding of sheet metal assemblies in one machine with the laser combi-head“, Proceedings of the 4th Pacific Int. Conference on Appl. of Lasers & Optics PICALO 2010, Wuhan, China
- [2] M. Spöttl, G. Alber: „Contact free and flexible cutting and welding – Coil joining“, Proceedings of the International Laser Technology Congress AKL'08, Aachen