

***RoboScan* – der Industrieroboter als 6-Achs-Scanner für das Laserstrahlschweißen in Remote-Technik: Anwendungsbeispiele für die Zoomoptik und unterschiedliche feste Brennweiten**

Peter Rippl

KUKA Schweissanlagen GmbH, Augsburg

RoboScan ist der Oberbegriff einer Bewegungsführung für das Laserstrahlschweißen in Remote-Technik, bei der der Industrieroboter als 6-Achs-Scanner verwendet wird. Als integriertes Schweißsystem kombiniert *RoboScan* die Präzision und Beweglichkeit eines freiprogrammierbaren Roboters mit der Performance eines Laserwerkzeuges mit extrem großer Brennweite bzw. im Falle der Zoomoptik mit veränderlicher Brennweite. Auffälligstes Merkmal ist, dass auf eine konventionelle Scanner-Remoteschweißoptik verzichtet wird und die eigentliche Strahlbewegung nicht über Spiegeloptiken erfolgt, sondern ausschließlich durch Bewegung der Fokussieroptik über die Roboterachsen gesteuert wird. Die Bewegungsführung und Laseransteuerung erfolgt damit zeitsynchron von einer Steuerung incl. der aus dem Systembaukasten ausgewählten Komponenten.

Im vorliegenden Beitrag werden weiterhin die im Fertigungssystem notwendigen Systemkomponenten sowie deren Leistungsmerkmale vorgestellt; anhand von Anwendungsbeispielen aus der Fahrzeugfertigung werden die Vorteile und Randbedingungen der *RoboScan*-Technologie aufgezeigt. Die Anwendungsbeispiele umfassen die Komponenten- und Untergruppenfertigung wie Sitzfertigung, Türen und Klappen bis hin zur kompletten Karosseriefertigung. Eine Gegenüberstellung zu den herkömmlichen Fertigungsverfahren in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht zeigt das Anwendungspotential dieser Technologie im Fahrzeugbau. Damit liefert *RoboScan* genau die Flexibilität, die u. a. von den Automobilherstellern immer wieder eingefordert wird.

1 Einleitung

Der Einsatz von Hochleistungslasern zum Fügen für die 3D-Laser-Materialbearbeitung innerhalb der Fahrzeugfertigung lässt sich einteilen in robotergeführtes:

- fliegendes Laserstrahlschweißen mit und ohne Kaltdraht einschließlich Remote-Technik
- Laserstrahlschweißen mittels an die Schweißaufgabe und Fugenform angepasster Systemköpfe, die die Bauteilspannfunktion und/oder Nahtverfolgungsfunktionen mit übernehmen
- Laserstrahllöten mit Kalt- oder Warmdraht, mit integrierter Draht- und Gaszufuhr sowie Sensorfunktionen zum Nahtverfolgen taktil oder optoelektronisch
- Hybrid-Schweißen und -Löten mit Hilfe von Systemköpfen, die die Fokussieroptik mit dem MSG-Prozeß und ggf. Nahtverfolgungssensorik beinhalten.

Die unterschiedlichen Nahtarten und -formen im Karosseriebau mit z. T. nur einseitiger Zugänglichkeit zur Fügezone erfordern für das Laserstrahlschweißen in flexiblen Fertigungseinrichtungen an die Aufgabe und Fügezonengeometrie angepasste Systemköpfe, die der Toleranzverträglichkeit des jeweiligen Prozesses, den Qualitätskriterien der Verbindung sowie den Produktionsbedingungen der automatisierten Fertigung Rechnung tragen. Im Falle der Remote-Technik, die als Synonym für „Schweißen aus der Entfernung“ steht, ist das Spannen der Bauteile getrennt zu betrachten.

2 Laserstrahlschweißen in Remote-Technik

2.1 Strahlqualität und optische Beziehungen

Das Adjektiv „remote“ aus dem Englischen steht für die Begriffe „fern, entfernt oder weit weg“. In der Lasertechnik wird damit die Entfernung des letzten Spiegels oder der letzten Linse vom Wirkort am Bauteil, d. h. die Brennweite näher spezifiziert. Beim Laserstrahlschweißen im Hochleistungsbereich wird von einer kurzen Brennweite im Bereich 50 bis 150 mm beim Diodenlaser gesprochen; mittlere Brennweiten zwischen 150 und 300 mm sind beim Nd:YAG- und 200 bis 500 mm beim CO₂-Laser Standard. Am Beispiel Festkörperlaser sind die Zusammenhänge zwischen Strahldivergenz des Rohstrahls, Faserdurchmesser, Kollimation und Kollimationswinkel, Brennweite, Strahlparameterprodukt und letztendlich dem Fokusdurchmesser in Bild 1 dargestellt.

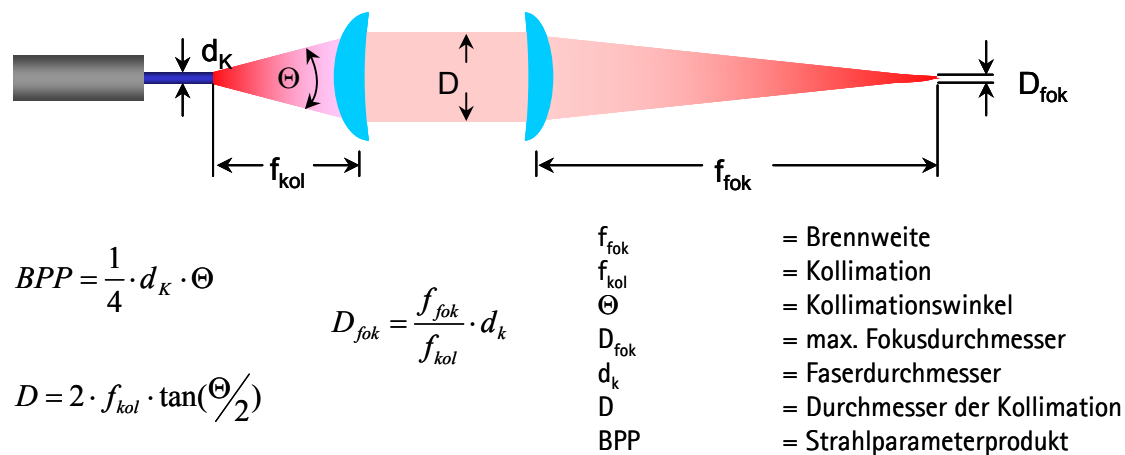


Bild 1: Strahlqualität und deren optische Beziehungen

Im Blechdickenbereich der Stahlkarosse sind Fokusdurchmesser von ca. 0,6 mm notwendig, um bei einer gegebenen Laserleistung von 4 kW Schweißgeschwindigkeiten von 6 m/min zu erreichen; im Falle von Aluminium ist aufgrund der Reflexionsbedingung dieses Werkstoffs der maximale Fokusdurchmesser zur Erzielung einer ausreichenden Energiedichte bei gleicher Laserleistung für eine ausreichend gute Ankopplung begrenzt.

2.2 Remote-Technik mit Scannern

Die Remote-Anwendungen begannen mit dem CO₂-Laser und hatten die Problematik der richtungsabhängigen Zugänglichkeit (meist von oben) und die Strahlablenkung über Spiegel mit und ohne Z-Achsen-Anpassung; Vorteil war und ist der große Scannbereich. Derartige Bearbeitungseinrichtungen sind meist XY-Scanner, die entweder stationär zweiachsig bei einem Scannerabstand von z. B. 1000 mm eine Fläche von 800 x 800 mm² überstreichen oder als Scanner in Portalsystemen integriert mit Strahlführung über Spiegelsysteme auch Umorientierungen im 3D-Bereich ermöglichen.

Parallel dazu entwickelten sich Scannersysteme mit Spiegelablenkung, jedoch mit fasergekoppelten Festkörperlasern; deren Nachteil war der kleine Scannbereich. Diodengepumpte Festkörperlaser mittels Strahlführung über Lichtleitfaser sind in Verbindung mit Industrierobotern und XY-Scannern derzeit nur bis ca. 250 - 300 mm Brennweite einsetzbar; dies führt zu entsprechend kleinen Scannerflächen. Steuerungstechnisch kann der Roboter nur die Scanner-Versatzbewegung durchführen und die eigentliche Schweißbewegung wird vom Scanner selbst übernommen; längere Bahnbewegungen können natürlich vom Roboter auch im Bahnbetrieb erfolgen, wobei der XY-Scanner dann selbst keine Fokusbewegungen durchführt. Eine Überlagerung beider Bewegungen erlaubt kontinuierliche Bewegungen der Robotermechanik und schnelle Bahnbewegungen des Fokuspunktes.

3 *RoboScan* – der Roboter als Scanner

3.1 Bewegungsführung

Im Falle von *RoboScan* bewegt der Roboter wie beim konventionellen Laserstrahlschweißen die Fokussieroptik für die Schweiß- und Versatzbewegungen. Sowohl der Bahnbewegung als auch der Versatzbewegung ist jedoch eine Orientierungsänderung überlagert; d. h. während der Schweißbewegung wird die Robotermechanik schon in Richtung zukünftiger Schweißnähte bewegt (**Bild 2**).

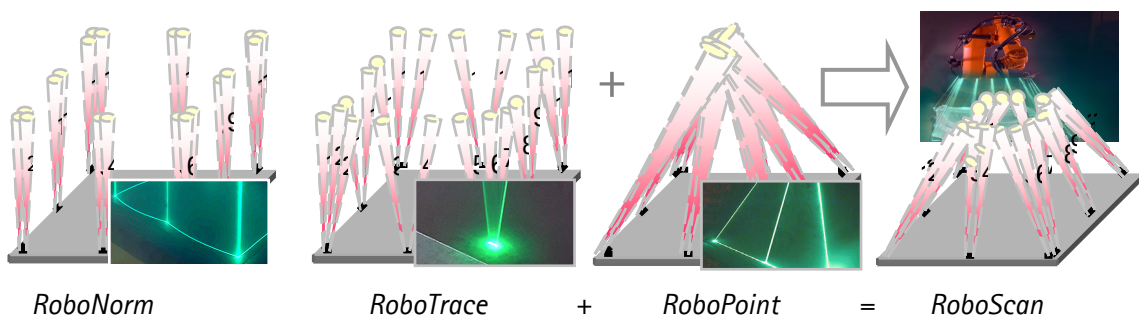


Bild 2: Roboterbewegung konventionell und in RoboScan-Technik

Der linke Bildteil zeigt die Schweiß- und Versatzbewegung in konventioneller *RoboNorm*-Technik bei senkrechter Orientierung des Laserstrahls zum Bauteil. Bei einer angenommenen Schweißgeschwindigkeit von 4 m/min und 20 mm Nahtlänge muß zwischen den Nähten die

komplette Robotermechanik mit den einzelnen Achsantrieben maximal beschleunigt und abgebremst werden, um schnelle Versatzbewegungen und damit kurze Taktzeiten zu erreichen. Je nach Lage des Bauteils im Raum und Zuordnung zum Roboter werden einzelne Achsen zu sogenannten „führenden Achsen“, d. h. sie haben maximale Winkel oder Wege zu überstreichen und begrenzen somit die Versatzzeit, da sie mit maximal vorbesetzten Beschleunigungs- und Verzögerungswerten arbeiten.

Wird längs der Bahn in Bahnrichtung eine Orientierungsänderung vorgenommen, kann mit dem eigentlichen Schweißen schon in der stehenden Laserorientierung begonnen werden, während sich die Roboterhand noch auf den Startpunkt zubewegt (**Bild 2 RoboTrace**). Während des Schweißvorganges längs der Naht orientiert der Laserstrahl über die neutrale Anstellung zur schleppenden Orientierung in Richtung der nächsten Naht um, und bringt damit die Robotermechanik schon in die Nähe der zukünftig zu schweißenden Naht. Somit ist der Schweißbewegung von z. B. 4 m/min eine Roboterbewegung im Handachsenbereich von 30 m/min mit Orientierungsänderung überlagert.

Erfolgt die Laserstrahlbewegung überwiegend durch Winkeländerungen aus den Handachsen, ähnlich dem Laserpointer an der Projektionsleinwand, so ist eine weitere Steigerung der Versatzgeschwindigkeit durch zusätzliche Nutzung der Orientierungsänderung lateral zur Bahn möglich (**Bild 2 RoboPoint**). In der Kombination von *RoboTrace* und *RoboPoint* ergibt sich dann der in **Bild 2** rechts dargestellte Bewegungsablauf *RoboScan*. Im Grunde wird der Roboter als ein 6-achsiger Scanner genutzt, der im Gegensatz zu herkömmlichen Scannern frei programmierbar Versatz- und Orientierungsbewegungen ausführen kann. Die Robotersteuerung darf dabei nicht nur bahnbezogen Winkeländerungen zulassen, sondern muss winkel- und bahnbezogen programmiert werden können.

3.2 Prozesstechnische Randbedingungen und Grenzwinkel

Da bei der unter Punkt 1 vorgestellten Systemtechnik in den Systemköpfen bestimmte Funktionen wie Spannen der Bauteile, Gaszufuhr usw. integriert sind, muss die Vorrichtungs- und Spanntechnik im Falle der Laser-Remoteanwendung zusätzlichen Anforderungen genügen:

- hohe Spannkräfte und steife Vorrichtung
- spannen der Bauteile unter minimalen Eigenspannungen
- genaue und reproduzierbare Spannposition
- einstellbare Spannposition mit freier Justage
- spaltfreies Spannen oder definierter Spalt im Falle von verzinkten Bauteilen
- Verwendbarkeit der Spannvorrichtung für Aluminium und Stahl
- sequentielle Spanntechnik in der Steuerung berücksichtigen
- verschleißfeste Spanneinsätze im Werkzeug mit freien Öffnungen für die Schweißnaht
- unempfindlich gegen Spritzer sowie gute Kühlung
- Gaszufuhr in der Vorrichtung berücksichtigen (z. B. bei Aluminium)
- Zugänglichkeit für den Laser und Sensor

Bei der Ermittlung prozesstechnischer Grenzwinkel ist zuerst die Schweißgeschwindigkeit bei senkrechter Orientierung des Laserstrahles zum Bauteil zu bestimmen, bei der noch ausreichender Einbrand erzielt wird. Anschließend sind durch Variation der Winkel in Nahrichtung und quer dazu die jeweils erreichten Einbrandergebnisse bei dieser gewählten Schweißgeschwindigkeit zu

bestimmen. Die Schlitze der an den prozesstechnischen Grenzen mittels eines Faserlasers mit einer Leistung von 5 kW, 500 mm Brennweite und einem Fokussdurchmesser von 0,6 mm bei einer Schweißgeschwindigkeit von 7,8 m/min erzielbaren Einbrandergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Weiterhin ist die Fokusslage zu variieren, wobei wiederum der ausreichende Einbrand im Querschliff die Beurteilungsgröße ist. Im vorliegenden Beispiel werden bei 500 mm Brennweite und einer lateralen Anstellung von 0° die Durchschweißung zwischen Anstellwinkeln 15° schleppend und 15° stechend bei einer Fokusslagevariation in Z-Richtung von 16 mm erreicht.

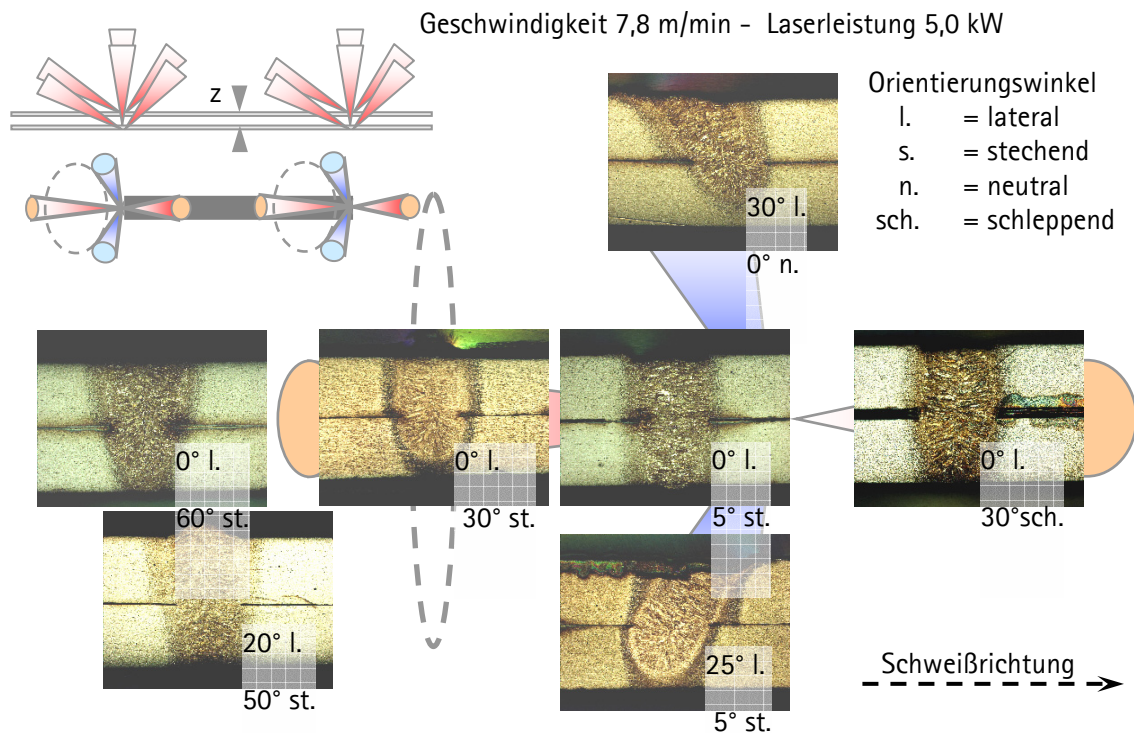


Bild 3: Prozesstechnische Grenzwinkel in Bahnrichtung und quer zur Naht

4 Anwendungsbeispiele für *RoboScan* in der Fahrzeugfertigung

4.1 *RoboScan* mit fester Brennweite am Beispiel Türenfertigung

Am Beispiel Laserstrahlschweißen von Fahrzeugtüren soll der Einfluss kurzer und langer Brennweiten für die *RoboScan*-Technik gegenübergestellt werden. Für den in Bild 4 gezeigten Anwendungsfall sind sämtliche 22 Nähte in einer Ebene (X/Y-Ebene) angeordnet; damit werden sämtliche umlaufenden Nähte mit einer Nahtlänge von 22 bis 30 am Bauteil durch Orientierungsänderung aus den Handachsen heraus im Wesentlichen in Richtung -Z geschweißt. Wie die Bildfolge von links nach rechts in Bild 4 zeigt, bleiben die Hauptachsen beim Überstreichen von ca. 1 m x 1 m Fläche nahezu im Stillstand, da bei einer Brennweite von 1500 mm eine laterale Anstellung von weniger als $\pm 20^\circ$ ausreicht, um alle Nähte am Bauteil

durch einfache Handachsenorientierung zu erreichen. Damit ist für eine derartige Aufgabe eine lange Brennweite von Vorteil.

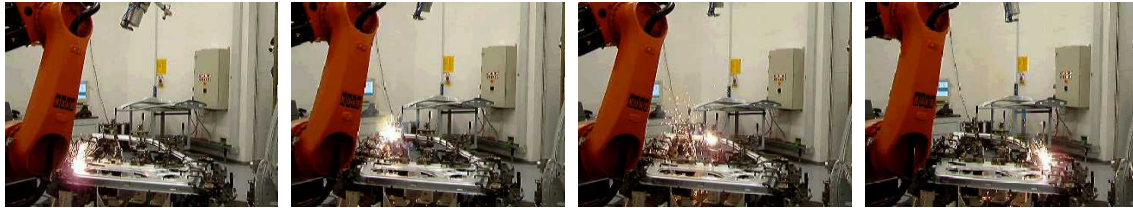


Bild 4: Schweißen von Türen mittels *RoboScan* mit einer Brennweite von 1500 mm
22 Nähte liegen in einer Ebene, Prozess- und Versatzzeit 5,8 s

Im Gegensatz dazu wäre eine Türe, deren Nähte nicht in einer Ebene liegen, mit einer derartig großen Brennweite nicht schweißbar, da alleinig für die Umorientierung des Roboters in einer Ebene z. B. +Y auf -Y der Roboter $2 * 1,5 \text{ m} = 3 \text{ m}$ fahren müsste.

Bild 5 zeigt eine Applikation mit einer kürzeren Brennweite von 500 mm, bei der insgesamt 47 Nähte mit einer Nahtlänge zwischen 14 und 25 mm zu schweißen sind, wobei 32 Nähte im Wesentlichen in der Y/Z Ebene liegen und damit hauptsächlich aus der + X -Richtung geschweißt werden (links die ersten beiden Bilder) und 15 Nähte am Fensterrahmen von oben her beginnend in Richtung -Z bis +Y (die beiden rechten Bilder) geschweißt werden. Wie aus der Bildfolge ersichtlich ist, sind für die Umorientierung die Grundachsen des Roboters wesentlich mehr beteiligt.

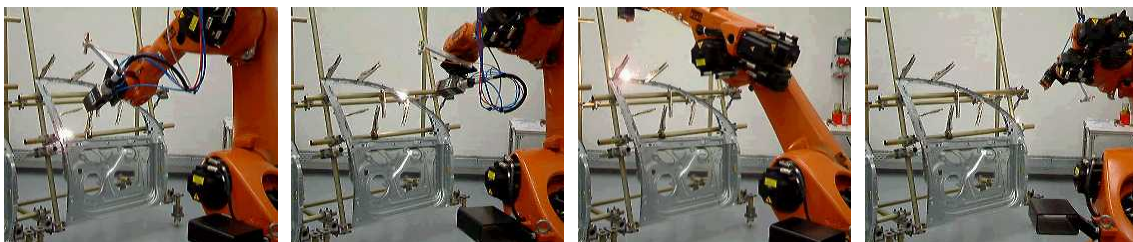


Bild 5: Schweißen von Türen mittels *RoboScan* mit einer Brennweite von 500 mm
49 Nähte liegen in unterschiedlichen Ebenen, Prozess- und Versatzzeit 19 s

4.2 RoboScan mit Zoomoptik am Beispiel Sitzfertigung

Das vor zwei Jahren vorgestellte Prinzip des *RoboScan*-Verfahrens wird zwischenzeitlich kombiniert mit einer brennweitenvariablen Optik (Zoomoptik, Verstell-Bereich zwischen 500 und 1500 mm), die zu den übrigen Roboterachsen numerisch gekoppelt und damit über die Roboter-Steuerung frei programmierbar ist. Unterstützt wird die Programmierung durch einen integrierten Teach-Sensor (Laufzeit-Sensor), der den Abstand zwischen Bauteil und Optik vermisst und die Brennweite automatisch anpasst.

Der Einsatz der Zoomoptik erlaubt die Einstellung unterschiedlicher Brennweiten, wobei die Steuerung für den Antriebsmotor der Zoomoptik in die Robotersteuerung integriert ist. **Bild 6** zeigt im linken Teil den Roboter beim Remote-Schweißen mittels Zoomoptik, wobei die in der XY-Ebene unterschiedlich liegenden Schweißborte nur durch geringfügige Winkeländerungen aus den Handachsen angefahren werden und der Abstand in Strahlrichtung durch Anpassung der Brennweite mit der Zoomoptik erfolgt. Im rechten Bildteil erfolgt das Schweißen der Sitzschalen in

einer Ebene bei mittlerer Brennweite durch Orientierungsänderung aus den Handachsen; die darauf folgenden, um $\pm 90^\circ$ links und rechts am Bauteil liegenden Nähte werden durch Orientierungsänderung aller Roboterachsen bei kurzer Brennweite geschweißt.

In der Sitzfertigung sind umgeformte Blechschalen und Verstärkungsteile in der Regel im Blechdickenbereich zwischen 1 und 3 mm zu verschweißen wobei, der Hauptanwendungsbereich zwischen 1,5 bis 2 mm liegt. Meist sind etwa 5 bis 10 Bauteile durch ca. 15 bis 100 Fügstellen zu verbinden. Materialien sind tiefgezogene Stahlwerkstoffe sowie umgeformte rohrförmige Querschnitte unterschiedlicher Festigkeiten. In herkömmlicher Fügetechnik kommen das Punkt-, Buckel- und Rollnahtschweißen als Preßschweißverfahren sowie als Schmelzschweißverfahren das MAG- und teilweise WIG- bzw. Plasmaschweißen mit und ohne Kaltdrahtzufuhr zum Einsatz. Probleme sind die Wärmeeinbringung und die daraus resultierende Verzüge sowie die Problematik der nicht beidseitigen Zugänglichkeit bei Blech-/Rohrverbindungen für die Preßschweißverfahren.

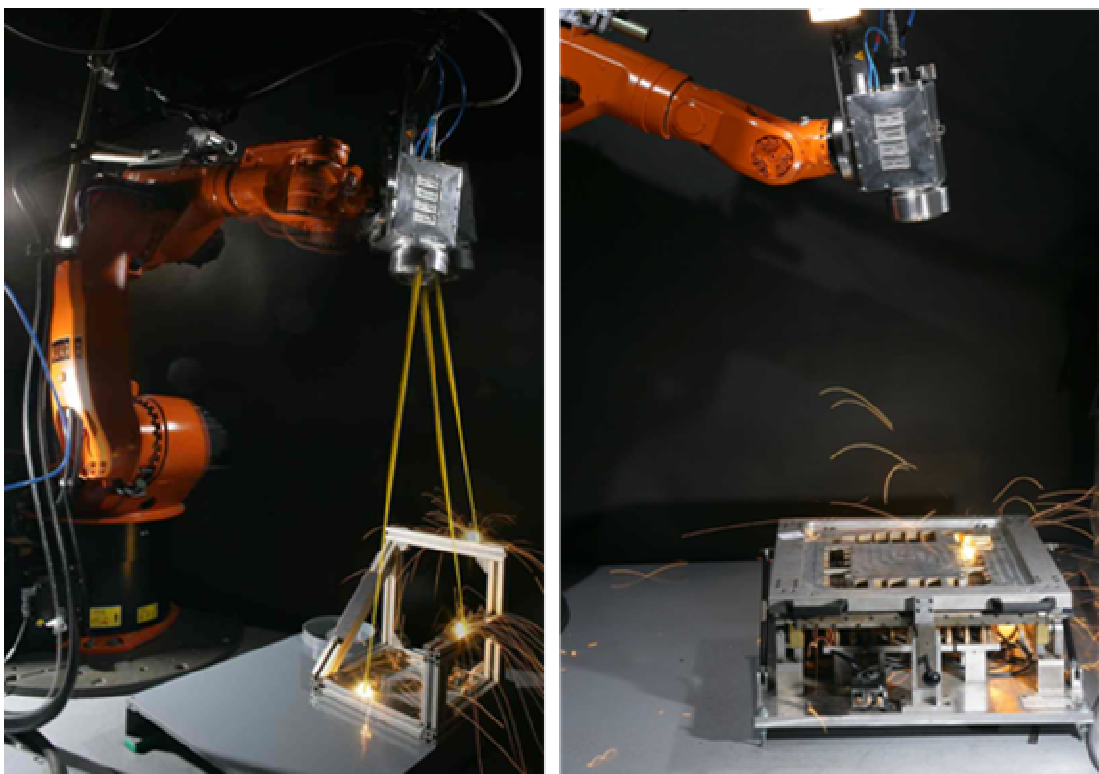


Bild 6: Laserstrahlschweißen mit RoboScan und Zoomoptik am Beispiel Sitzfertigung

4.3 RoboScan am Beispiel Geometriestation

Sitze bieten sich für das Laserstrahlschweißen in Remote-Technik besonders an, da sie in der Regel unverzinkt sind und damit die Problematik der Zinkausgasung nicht haben; weiterhin sind hohe Stückzahlen mit entsprechend hohem Aufwand in der Fügetechnik notwendig. Darüber hinaus weisen derartige kleinere Bauteile geringe Toleranzen (Position und Spalt) auf und sind sicher sowie spaltfrei zu spannen. Technische Gründe für den Einsatz der Lasertechnik sind die Freiheit in der beanspruchungsgerechten Gestaltung der Fügezone sowie die geringe verzugsarme Wärmeeinbringung. Wirtschaftliche Vorteile sind die hohe Prozess- und Versatzgeschwindigkeit und damit die geringen Kosten pro Fügestelle.

Die Taktzeiten in konventioneller Fügetechnik liegen in der Regel zwischen 1,5 und 3 s Punkt-zu-Punkt-Zeit beim Punktschweißen und bei ca. 2,5 s beim Schutzgasschweißen für 20 mm Schweißnaht incl. Zünden und Endkraterfüllen. D. h., bei 30 Fügstellen ergeben sich je nach Anordnung und Zugänglichkeit incl. Bauteilwechsel ca. 60 s Taktzeit.

In KUKA Remote-Technik auf Basis *RoboScan* sind bei vergleichbarer Bauteilfestigkeit Taktzeiten von unter 10 s möglich. Bei einer Lasereinschaltdauer von über 90 % sind besondere Anlagenkonzepte gefragt, die die Bauteilwechselzeit nicht in die Lasernutzung eingehen lassen.

5 *RoboScan* - Vorteile für die flexible Fertigung

Die Vorteile der Remote-Technik in Kombination mit dem Bewegungsablauf *RoboScan* ergeben sich aus den Nachteilen der herkömmlichen fliegenden Lasermaterialbearbeitung. Dies sind:

- hohe Beschleunigungsmomente für den Roboter am Beginn und Ende der Versatzbewegung und damit Schwierigkeiten beim Einhalten der Genauigkeit und der Geschwindigkeit
- starke Belastung der Getriebe und der Mechanik in diesen Phasen
- keine effektive Lasernutzung aufgrund der langen Zeitanteile für die Versatzbewegung
- Bei Scannersystemen sind Zusatzsteuerungen für die 2 oder 3 Achsen erforderlich sowie eine Synchronisation von Roboter- und Scannerbewegung.

Mittels der *RoboScan*-Technik werden durch die laterale Anstellung des Laserstrahls Versatzbewegungen gar nicht notwendig oder durch stechende Anstellung am Nahtbeginn bzw. schleppender Anstellung am Nahtende in die Zeit der Schweißbewegung verlegt. Damit ergeben sich folgende Vorteile und Möglichkeiten:

- neue Anlagenkonzepte aufgrund der höheren Versatzgeschwindigkeit und damit verkürzten Taktzeit
- mehr produktiver Arbeitsinhalt pro Roboter und pro Zelle bzw. Station
- die Reduktion der Anzahl Stationen führt letztendlich zu kleineren Linien und damit schlankeren Fertigungsstätten
- bessere Zugänglichkeit des Bearbeitungswerkzeuges aufgrund größerer Brennweite
- größere Strahlquellennutzung aufgrund weniger Versatzzeit
- Lasermanagement durch Nutzung einer Strahlquelle durch mehrere Roboter möglich
- längere Lebensdauer und geringerer Verschleiß durch weichere Bewegungsabläufe mit geringerer Belastung
- weniger Systemkomponenten, kein Scanner, weniger Spiegel, weniger Fehlermöglichkeiten
- geringere Investitionskosten durch Wegfall von Scanner und Steuerung bei Nutzung des Roboters mit Scannerfunktion
- Steigerung der Schweißqualität, Fokuslageschwankungen sind aufgrund der längeren Brennweite unkritischer.

RoboScan setzt sich prinzipiell aus den kombinierten Bewegungen *RoboPoint* (reine Orientierungsänderung aus der Roboterhand beim Schweißen und Versetzen) und *RoboTrace* (Übergang von stechender zu schleppender Werkzeuganstellung beim Schweißen längs der Bahn und anschließend schnelle Orientierungsänderung zur nächsten Fügestelle) zusammen, so dass die

Schweißbewegung mit unterschiedlicher Werkzeuganstellung (lateral und in Bahnrichtung) mit aufgabenspezifisch gegebener Schweißgeschwindigkeit und die Versatzbewegung kürzestmöglich mit maximaler Geschwindigkeit durch Orientierungsänderung erfolgt. D. h., die Hauptzeit „Schweißen der Naht“ und die Nebenzeit „Versetzen des Werkzeugs“ überlagern sich.

Die erhöhte Positioniergenauigkeit resultiert aus der kontinuierlichen Bewegung der Grundachsen mit geringeren Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen für die Hauptachsen bei gleichzeitig schnellen und präzisen Bewegungen der Handachsen (massearm und schnell).

6 Schlußbemerkung

Die Auswahl der einzelnen Komponenten für ein 3D-Laserstrahlmaterialbearbeitungssystem – bestehend aus Strahlquelle, Strahlführungssystem mit Bearbeitungsoptik, Industrieroboter und Peripherie einschließlich der Spanntechnik – hängt von einer Vielzahl von Kriterien und Einflussgrößen ab, die im Einzelfall immer wieder optimal auf die Fertigungsaufgabe abzustimmen sind. Vom Markt werden dabei fast ausschließlich komplette Problemlösungen gewünscht. Die Erstellung von wirtschaftlich und technisch vorteilhaften flexiblen Fertigungseinrichtungen erfordert – insbesondere in der Planungs- und Inbetriebnahmephase – eine enge Zusammenarbeit zwischen Anlagenbetreiber und kompetentem Anlagenlieferanten. Für die Remote-Technik sind Laser hoher Strahlqualität notwendig, wie sie im Falle von Faser- bzw. Scheibenlasern heute schon zur Verfügung stehen.

Die oben vorgestellte Prozess- und Systemtechnik auf Basis *RoboScan* erlaubt damit neue Anlagenkonzepte, die qualitativ bessere und wirtschaftlich günstigere Produktionsmethoden und Produkte ergibt, wie an einem abschließenden Vergleich aufgezeigt wird:

Für die Karosseriefertigung werden in der Geometriestation bei einer Taktzeit von 1 min heute zwischen 70 und 100 Geometriepunkte mittels Widerstandspunktschweißen durch 8 bis 12 Industrieroboter geschweißt. Damit ergibt sich eine mittlere Punkt-zu-Punkt-Zeit von ca. 6 s.

Im Vergleich dazu können mittels eines 4 kW-Lasers und zweier Roboter in der Geo-Station durch *RoboScan* ca. 200 Lasernähte geschweißt werden. Damit ergibt sich eine wesentlich steifere Karosserie für die anschließende Ausschweißlinie.

Dazu kommt, dass beim Widerstandspunktschweißen der Zangenausgleich abhängig vom Kappenverschleiß unterschiedliche Kräfte auf die genau gespannte Karosserie bringt, diese deformiert und anschließend den deformierten Geometriezustand verschweißt und einfriert. Da der Laserstrahl keine Kraft auf das Bauteil ausübt, sind in der Geometriestation genau gespannte und mittels *RoboScan* in doppelter Schweißpunktzahl kraftfrei geheftete Karosserien wesentlich genauer und qualitativ hochwertiger herstellbar.