

Neuere systemtechnische Entwicklungen für den beherrschten Laserstrahlhartlötprozess

Peter Hoffmann, Jürgen Schwab

ERLAS - Erlanger Lasertechnik GmbH, Erlangen

Das Laserstrahlhartlöten ist eine Fertigungstechnologie, die aus dem Rohbau der Karosseriefertigung von Automobilen nicht mehr wegzudenken ist. Hohe Festigkeiten der Verbindung und Oberflächengüten, die keine oder nur geringe Nacharbeit erforderlich machen, eröffnen neue Wege im Automobildesign und der Produktionstechnik. Diesen prinzipiellen Vorteilen steht als größter Nachteil entgegen, dass die Prozessführung und damit die Bearbeitungsqualität sehr empfindlich auf Parameterschwankungen reagieren, insbesondere bezüglich der Lage des Laserstrahls zum Draht und zur Fuge. Der Prozess toleriert maximale Abweichungen von wenigen zehntel Millimetern. An komplexen, mit kleinen Radien versehenen Nahtverläufen stoßen Standard-Industrieroboter und Nahtfindungssensoren an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Dieser Beitrag stellt Systemtechnik vor, die speziell für das Laserstrahlhartlöten komplizierter Bauteile entwickelt wurde. Dazu gehören ein Bearbeitungskopf mit einer neuartigen Lösung für die Justierung des Laserstrahls zum Draht, Hard- und Software für die Optimierung des Bahnverhaltens von Industrierobotern und die produktionsbegleitende Überwachung der wichtigsten Prozessparameter.

1 Einleitung

Alle bisher in der Produktion eingesetzten Laserlötssysteme arbeiten nach dem in **Bild 1** gezeigten Verfahrensprinzip. Der Laserstrahl schmilzt den drahtförmigen Zusatzwerkstoff auf und erwärmt die beiden Blechteile auf Benetzungstemperatur. Der Draht wird schleppend unter ca. 60° und etwas vorlaufend zum Schnittpunkt von Laserstrahlachse und Werkstückoberfläche zugeführt. Der Laserstrahl wirkt mit einem vergleichsweise großen Durchmesser von ca. 2,5 bis 3,5 mm. Der Drahtdurchmesser liegt bei 1,0 oder 1,2 mm. Typische Prozessparameter sind 3 m/min Vorschubgeschwindigkeit für den Laserlöt Kopf, 3,5 m/min Drahtfördergeschwindigkeit und 3 kW Laserleistung.

In **Bild 2 links** ist ein fehlerfreies Bearbeitungsergebnis zu sehen. Es bildet sich eine Lotbrücke aus. Da der schleppend zugeführte Draht die Fuge abschirmt, findet keine Erwärmung in die Tiefe statt und das Lot benetzt ausschließlich im Bereich der Radien. In **Bild 2 rechts** ist ein Bearbeitungsergebnis mit Bindefehlern gegenübergestellt. Ein lateraler Versatz des Laserstrahls um nur 0,3 mm in Richtung des im Bild unten liegenden Blechteils hat bereits eine ungenügende Erwärmung des oberen Blechteils zur Folge, so dass das Lot abschnittsweise nur einseitig benetzt.

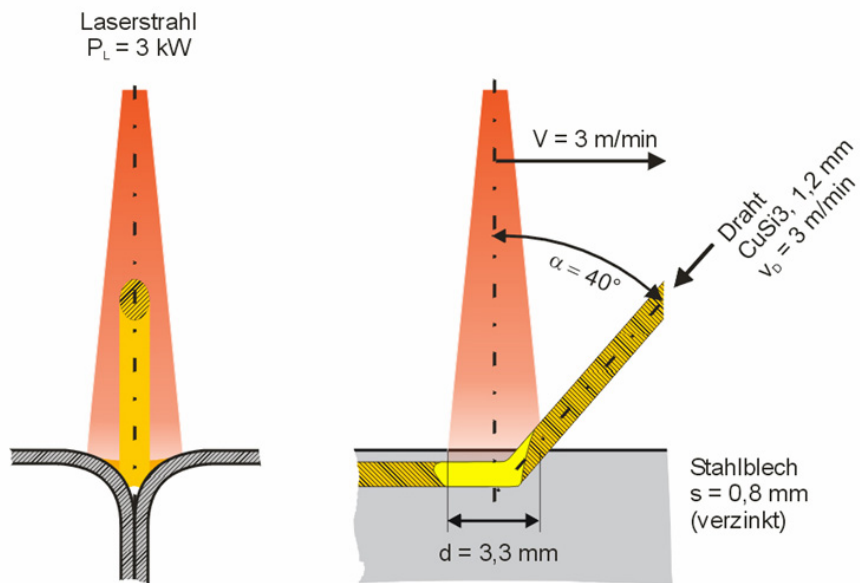


Bild 1: Verfahrensprinzip Laserstrahlhartlöten

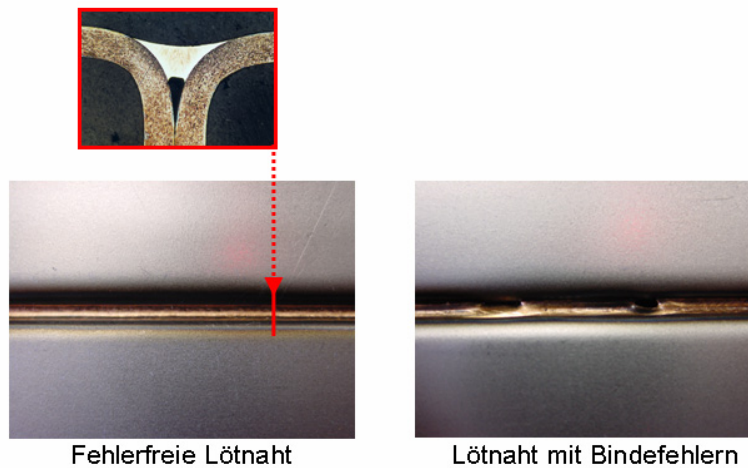


Bild 2: links: Querschliff und Aufsicht einer fehlerfreien Lötnaht
rechts: Aufsicht auf eine Lötnaht mit Bindefehlern

Der Lösungsansatz, über den Draht oder einer an die Drahtdüse angebauten Tastspitze die Fugenlage zu erfassen und den Laserstrahl mittels gekoppelter Schwenkachse nachzuführen, ist an wenig gekrümmten Nahtverläufen, z.B. im Dachbereich, erfolgreich im Einsatz. Für komplexe Bauteile mit kleinen Radien ist dies nicht möglich. Die folgenden Abschnitte beschreiben die systemtechnischen Komponenten des Laserstrahlhartlötensystems ERLASER Braze.

2 Bearbeitungskopf

Die Konstruktion des Bearbeitungskopfes basiert auf der konzeptionellen Überlegung, die Drahtdüse fest anzubinden und die Justierung des Drahtes zur Laserstrahlachse in die Strahlführung zu integrieren. Die Fokussierlinse ist deshalb in einem Kreuztisch aufgenommen, siehe Bild 3. Vorteile dieser Lösung sind

- eine gleichermaßen robuste wie schlanke Bauweise für den Düsenstock
- ein Schutz der Einstellung gegen ungewollte Veränderungen
- erweiterte Möglichkeiten in der Prozessführung durch gezielte Einstellung des Laserstrahls zu Draht und Fuge in einem gesteuerten oder geregelten Betrieb.

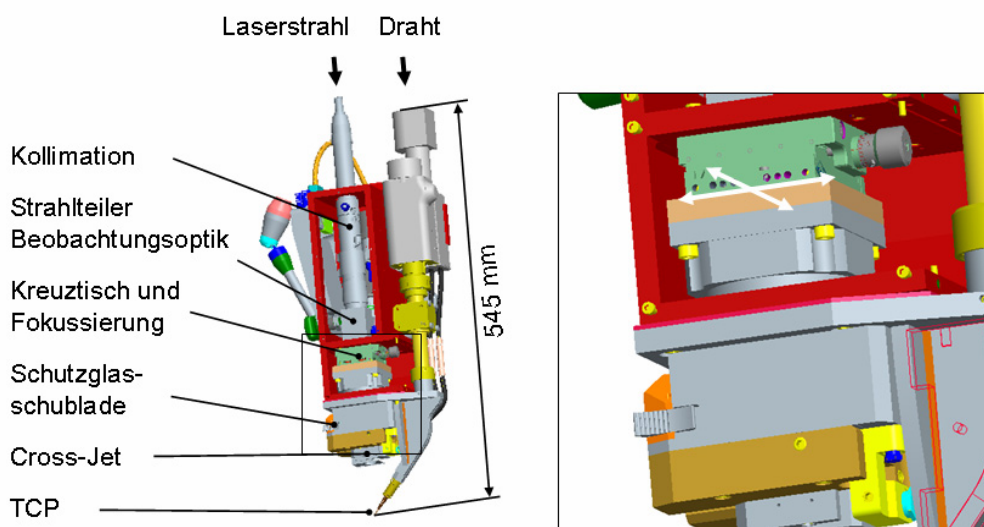


Bild 3: Bearbeitungskopf Janus für das Laserstrahlhartlöten

Über einen Strahlteiler ist eine CCD-Kamera in die optische Achse des Laserstrahls eingespiegelt, **Bild 4**. Sie übernimmt drei Funktionen:

- Visualisierung der Justierung des Laserstrahls zum Draht (unterstützt durch Doppel-Fadenkreuzgenerator und Kalibrierstation)
- Unterstützung des Anlagenbedieners durch die Möglichkeit, bei einer Kontrollfahrt die Lage der Fuge zum Draht und zur Strahlachse entlang der gesamten Kontur zu überprüfen
- Überwachung des Schutzglases auf Verschmutzung.

Der Überwachung des Schutzglases kommt beim Laserstrahlhartlöten von verzinkten Blechen eine besondere Bedeutung zu. Diese Funktion ist durch die unscharfe Abbildung der Schutzglasoberfläche auf den CCD-Chip möglich. Während Schmauch auf der Schutzglasoberfläche das scharfe Bild des Prozessleuchtens abschwächt führen aufglühende Schmelzespritzer zu einer Aufhellung der Randbereiche. Somit ist durch eine kontinuierliche Auswertung der Helligkeitsverteilung eine sichere Aussage zum Zustand des Schutzglases möglich.

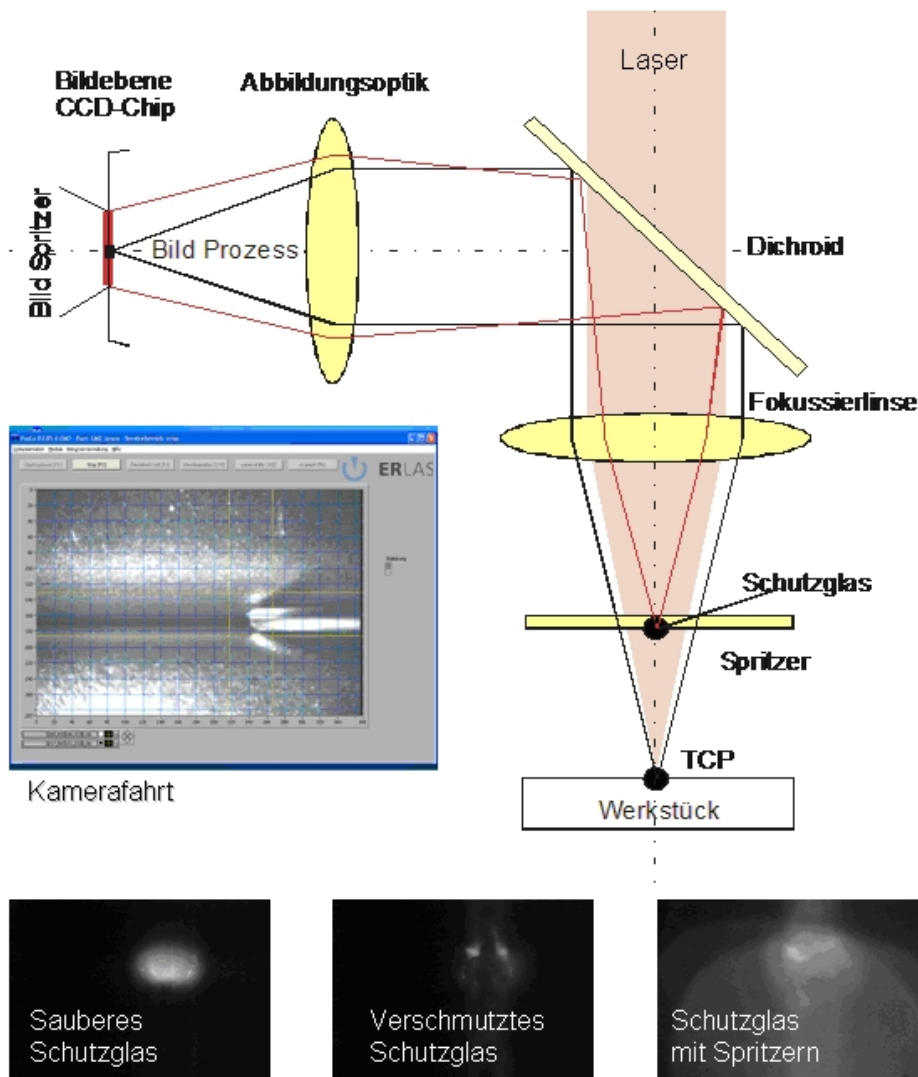


Bild 4: Optischer Aufbau zur Integration der CCD-Kamera sowie Kamerabilder aus dem Einrichtebetrieb (oben) und aus dem Überwachungsbetrieb (unten)

3 Systemtechnik für die Optimierung des Führungsverhaltens von Standard-Industrierobotern

Standard-Industrieroboter in der Ausführung als Vertikal-Knickarmroboter sind preiswerte Führungsmaschinen mit hohen Freiheitsgraden. Die kinematische Kette aus sechs Achsen bedingt jedoch ein vergleichsweise schlechtes Führungsverhalten. Beim Abfahren von Stützpunkten, die entweder offline am Programmierarbeitsplatz oder im Teach-In Verfahren generiert wurden, kommt es in Abhängigkeit von den Kennwerten der Antriebe und der Folgesysteme zu einem Verschleifen der Kontur und im ungünstigen Fall sogar zum Überschwingen. Je nach Anzahl und Lage der Stützpunkte, der Komplexität des Bahnverlaufs und den Bedingungen für die Bahninterpolation (u. a. dem Überschleiffaktor), können die Bahnabweichungen im Millimeterbereich liegen. Beim wiederholten Abfahren der Bahn hingegen verhält sich der Roboter

reproduzierbar, d.h. die Abweichungen von einer Bahn zu einer weiteren mit demselben Bewegungsprogramm erzeugten Bahn betragen nur ein bis zwei zehntel Millimeter. Die Differenzen liegen dann in der Größenordnung der Positioniergenauigkeit. Diese Eigenschaften nutzt die Systemtechnik zur sensorgestützten Optimierung des Führungsverhaltens des Roboters. Für die Erfassung des Führungsverhaltens wird der Laserlötkopf durch einen Sensorkopf ersetzt, **Bild 5**. Dieser ist mit einer kardanisch gelagerten Tastnadel ausgestattet, deren Spitze auf den Tool Center Point (kurz: TCP) des Laserlötkopfes und in Richtung der Drahtzufuhr zeigt, d.h. Sensorkopf und Laserlötkopf haben identische Werkzeugkoordinaten. Beim Abfahren des Bauteils mit dem Sensorkopf und dem Sensorprogramm wird die Spitze der Tastnadel durch die Fuge geführt. Aus den Werkzeugkoordinaten und den Auslenkungen der Tastnadel in den Messpositionen errechnen sich die Stützwerte für das Lötprogramm. Das Sensorprogramm schreibt diese Werte in ein Datenfile mit global verfügbaren Variablen. Mit diesem automatisierten Teachen der Stützpunkte des Lötprogramms ist nicht nur eine schnelle Anpassung des Programms auf Veränderungen im System möglich. Der Nutzen liegt vor allem in der Kompensation von Fehlern in der Stützpunkterzeugung und der Korrektur von Bahnabweichungen, die aus der kinematischen Kette der Führungsmaschine resultieren. Ein erneutes Einrichten des Lötprogramms ist erst wieder nach Veränderungen im Fertigungssystem, wie z. B. einem Austausch einzelner Systemkomponenten oder nach einer Kollision erforderlich.

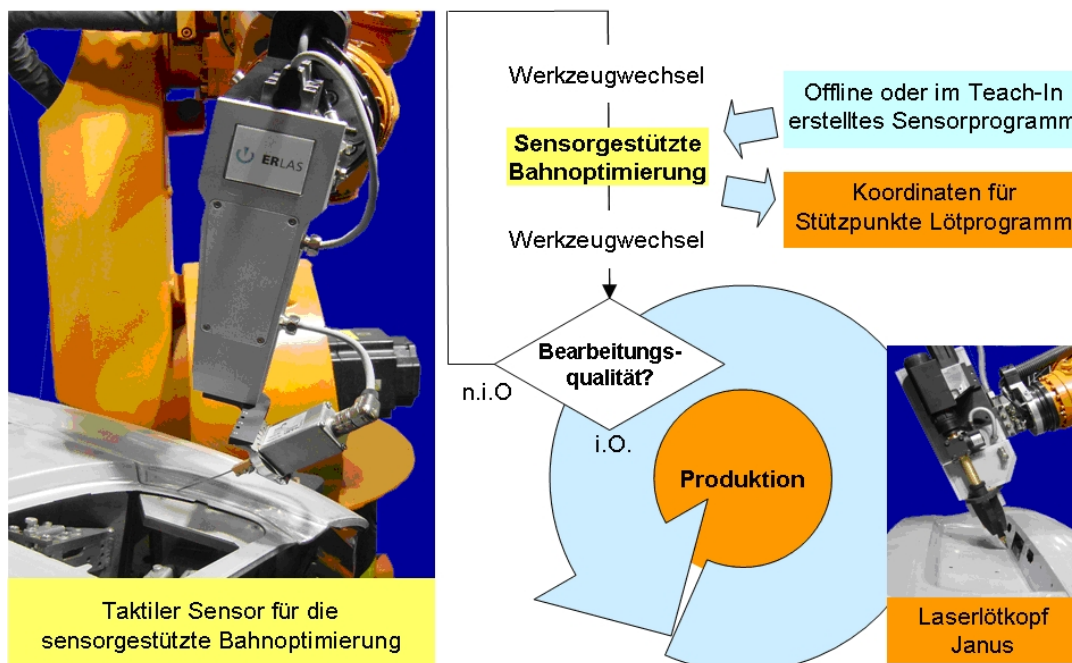


Bild 5: Taktile Sensor und dessen Einsatz für die Optimierung des Führungsverhaltens eines Standard-Industrieroboters

Die sensorgestützte Programmierung ist vor allem an komplexen Nahtverläufen zielführend. In **Bild 6** ist gezeigt, wie durch die sensorgestützte Bahnoptimierung an einem kritischen Nahtverlauf im Übergang vom Sichtbereich in den Rücklichtbereich eine deutliche Verbesserung

des Führungsverhaltens des Roboters erzielbar ist. Beim Abfahren des Bauteils mit dem Basisprogramm betragen die lateralen Abweichungen Δy 0,6 mm und die axialen Abweichungen Δz sogar 1,3 mm. Mit der oben beschriebenen, automatisierten Vorgehensweise gelang es, ein optimiertes Programm zu generieren, das ein deutlich verbessertes Führungsverhalten des Roboters zeigt. Die Bahnabweichungen liegen jetzt lateral unter 0,2 mm und axial unter 0,7 mm.

Damit ein fehlerfreies Lötresultat entsteht (**Bild 6 unten rechts**), müssen die Laserleistung und der Drahtvorschub geschwindigkeitsabhängig angesteuert werden. Aus der Lageregelung kennt die Robotersteuerung die tatsächliche Bahngeschwindigkeit. Diese Information wird in einem Submit-Programm zur Berechnung der globalen Variablen für die Drahtfördergeschwindigkeit und die Laserleistung verwendet. Dabei ist darauf zu achten, dass die dem Roboter im Bewegungsprogramm vorgegebenen Bahngeschwindigkeiten nicht über der Grenze für ein Verfahren ohne Überschwingfehler liegen.

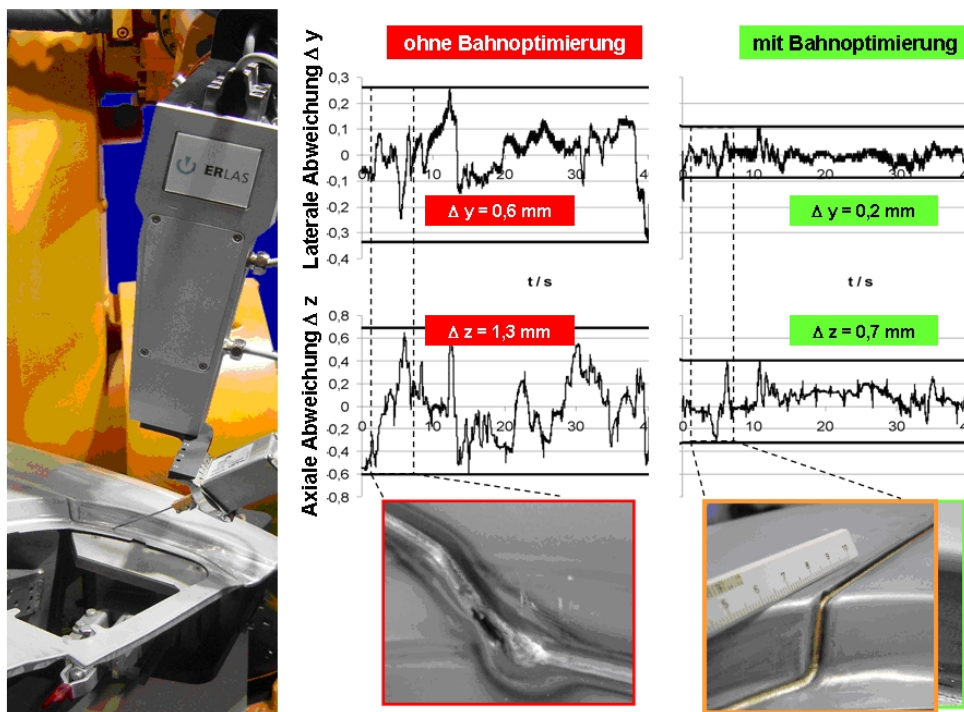


Bild 6: Kritischer Nahtverlauf im Rücklichtbereich und die durch die sensorgestützte Bahnoptimierung erzielten Verbesserungen im Führungsverhalten des Roboters

4 Produktionsbegleitende Überwachung der Prozessparameter

Die produktionsbegleitende Überwachung der Verschleißteile und der Prozessparameter übernimmt das Prozessüberwachungssystem ERWIN. Im Einzelnen zeichnet ERWIN folgende Größen auf:

- Helligkeitsverteilung im Bild der CCD-Kamera zur Beurteilung des Betriebszustandes des Schutzglases
- Motorstrom der Drahtfördereinrichtung zur Erkennung einer zunehmenden Verschmutzung der Drahtseele in Folge von Abrieb

- Temperaturen der Linsenhalter zur Detektion des bevorstehenden Ausfalls optischer Komponenten
- Roboter-Bahngeschwindigkeit
- Laserleistung
- Drahtfördergeschwindigkeit (TCP)

Die Samplerate beträgt bis zu 100 kHz.

Pro Bauteil entsteht ein Datensatz. Nach Beendigung der Aufzeichnung führt die Software eine Überprüfung auf Einhaltung der zulässigen Toleranzen durch.

Bild 7 links erläutert die Struktur des Programms. Mit Start der Bearbeitung am Bauteil beginnt die Datenaufzeichnung und endet auch zeitgleich mit dem Lötprozess. Es folgt ein Vergleich der kompletten Signalverläufe mit den in einer Anlernphase ermittelten Grenzwerten für ein zufrieden stellendes Bearbeitungsergebnis. Verlässt der Signalverlauf das Toleranzband, entscheiden Bewertungsfunktionen je nach Häufigkeit und Dauer der Über- bzw. Unterschreitungen, ob ein Warn- oder ein Fehlersignal ausgegeben wird.

In **Bild 7 rechts unten** ist die Anzeige für den Anlagenbediener zu sehen. Sie enthält drei Ampeln. Sie zeigen den Prozessverlauf, den Betriebszustand Schutzglas und den Betriebszustand des Drahtförderers an. Im Normalbetrieb stehen sie auf grün. Wird eine kritische Grenze für eine der Überwachungsgrößen erreicht, schaltet die Ampel auf gelb. Der Anlagenbediener ist informiert, dass er demnächst eine Inspektion vorzunehmen hat bzw. Prozessparameter anzupassen sind. Die rote Anzeige signalisiert, dass eine Störung vorliegt und eine umgehende Reaktion notwendig ist.

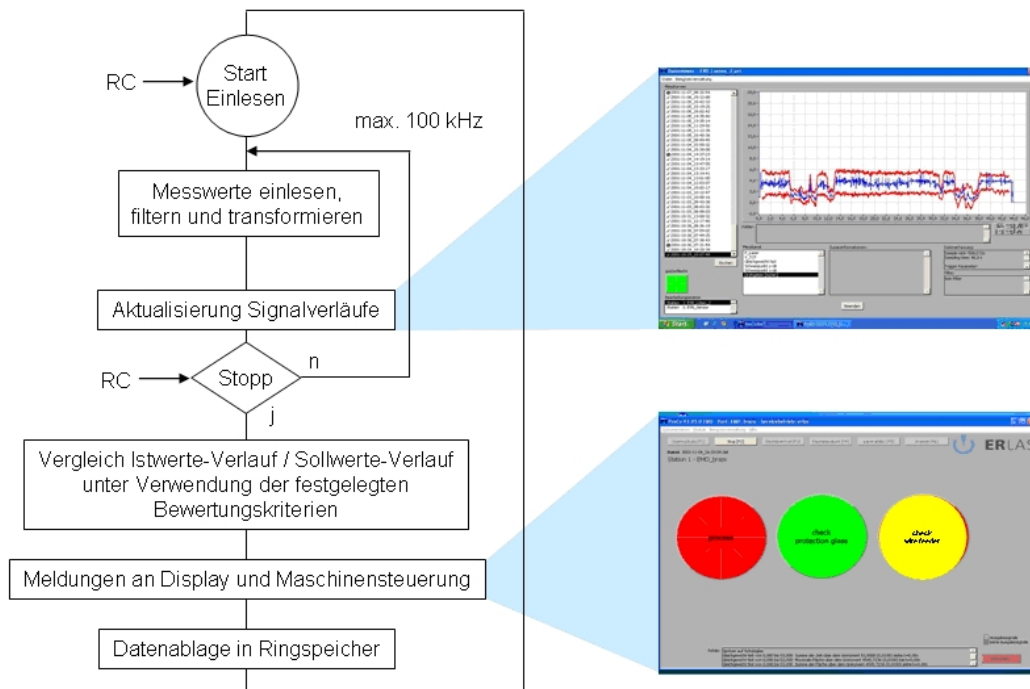


Bild 7: Struktogramm und Anzeigen der Prozessüberwachungssoftware ERWIN

5 Anwendungsbeispiele

In **Bild 8** sind der letzte Entwicklungsstand für den Anbau des Laserlötkopfes an den Standard-Industrieroboter sowie einige der realisierten Anwendungen zu sehen. Das Laserlötsystem **ERLASER Braze** wurde ursprünglich für das Laserlöten der Heckklappe des T-Modells der Mercedes E-Klasse entwickelt. Die Stückzahlen liegen bei etwas mehr als 200 Stück pro Arbeitstag. Das entspricht einer Nahtlänge von ca. 400 m. Aktuell ist die Produktion der Heckklappen für die Modelle der 3er Serie von BMW gestartet. Hierfür sind insgesamt vier Hartlötssysteme mit einer Ausbringung von bis zu 750 Heckklappen pro Tag (entspricht ca. 1.500 m) eingesetzt. Die Erfahrungen aus diesen Anwendungen sind in die Weiterentwicklung der oben beschriebenen Systemtechnik eingeflossen.

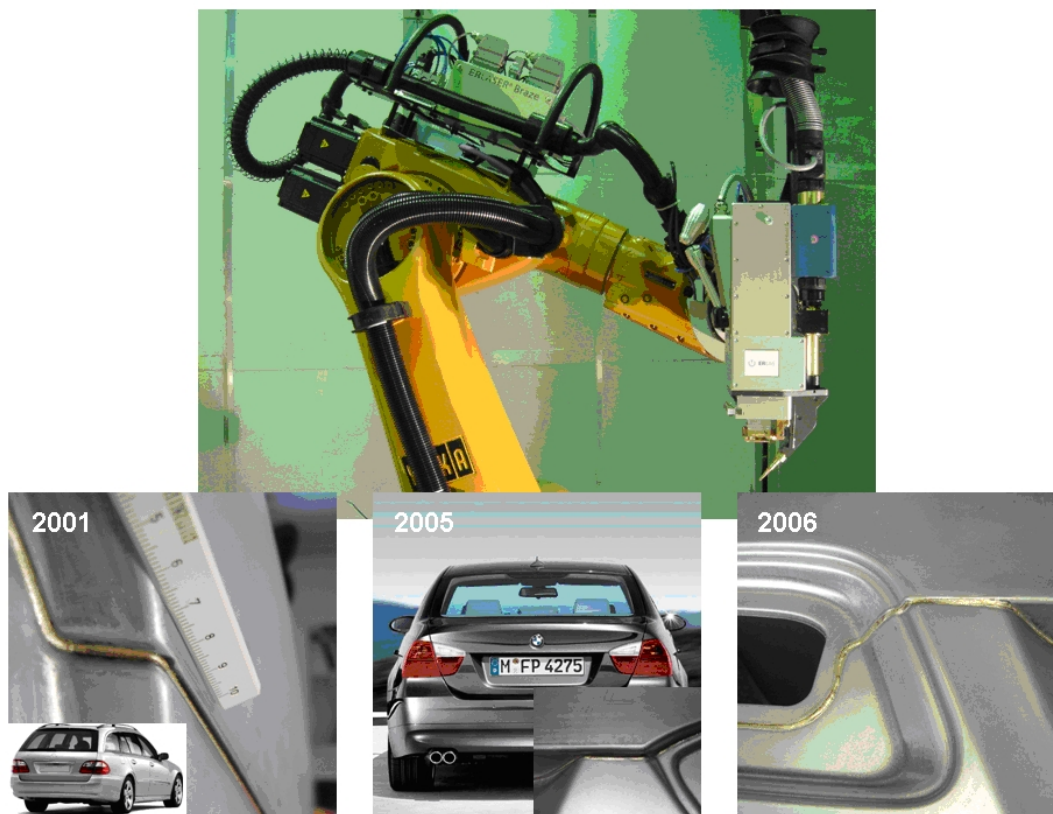


Bild 8: Anwendungsbeispiele für das Laserstrahlhartlötssystem ERLASER Braze

6 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des Laserstrahlhartlötprozesses auf Veränderungen der Prozessparameter ist eine produktionssichere Bearbeitung komplexer Nahtverläufe nur mit einer speziell angepassten Systemtechnik zu gewährleisten. Dies umfasst Hilfsmittel für die Programmierung der Führungsmaschine und das Einrichten des Prozesses wie auch Überwachungseinrichtungen für die wichtigsten Komponenten der Systemtechnik und die Parameter des Prozesses. Nicht zuletzt ist eine adaptive Prozessführung notwendig, um auch in den kritischen Bahnabschnitten mit reduzierten Werten für Bahngeschwindigkeit, Laserleistung und Drahtzuführgeschwindigkeit ein fehlerfreies Nahtbild herzustellen.

Die derzeitigen Entwicklungen konzentrieren sich auf drei Themen:

1. Verwendung von Hochleistungsdiodenlasern als Strahlquelle anstelle der in der Investition um ca. 30% teureren Nd:YAG-Laser.
2. Prozessoptimierende Auslegung von Strahlführung und -formung sowie eine bessere Integration der Drahtzufuhr in den Bearbeitungskopf.
3. Auswertung von Prozesssignalen für eine Erkennung von Bearbeitungsfehlern und damit Wegfall der heute noch praktizierten 100%-Prüfung der Bauteile mit einem Kamerasystem oder durch einen Werker.