

Integriertes Lasermodul beim Großformenbau

Dr. Steffen Bonß

Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt »Integrierte Härterei« hat zum Ziel das notwendige partielle Härten von Großwerkzeugen in die Systeme zur mechanischen Bearbeitung zu integrieren. Dabei sollen neben der Integration von Hochleistungsdiodenlasersystemen insbesondere Softwarewerkzeuge entwickelt werden, die es dem späteren Anwender gestatten, ohne Experte im Laserstrahlhärten zu sein, die notwendigen optimierten CNC-Programme zu generieren. Die Verfahrensweise soll vergleichbar der üblichen Anwendung von CAM-Systemen zur Programmgenerierung sein. Die Beteiligung des Werkzeugbaus der BMW AG sowie von Thyssen Nothelfer befördern industrietaugliche Lösungen. Die Umsetzung der Demonstratoren durch EFD Induction und die Entwicklung der Laser durch DILAS sind wesentliche Voraussetzungen für eine zukünftige Breitenwirksamkeit der entwickelten Projekteinhalte.

1 Einführung

Blechumformwerkzeuge, Blechschneidwerkzeuge und Besäumwerkzeuge werden in allen Branchen der metallverarbeitenden und in Deutschland oft mittelständig geprägten Industrie verwendet. Wegen ihrer Größe, aufwändigen Herstellung und vielfach komplexen Formen sind sie sehr teuer und ein wesentlicher Kostenfaktor für die darauf entstehenden Produkte. Die Bauteilstückkosten ließen sich überaus wirksam reduzieren, wenn es gelänge, gleichzeitig die Herstellungskosten der Werkzeuge zu senken und deren Standzeit zu erhöhen. Das erfordert die Entwicklung von flexibel einsetzbaren, automatisierbaren, verzugsfreien und in die spanende Bearbeitung integrierbaren Randschichthärteverfahren.

Ein Beispiel, an dem sich diese Zusammenhänge besonders deutlich zeigen, ist die Herstellung von Großwerkzeugen (Presswerk) und Vorrichtungen (Rohbau) für den Karosseriebau der Automobilindustrie. Sie hat einen erheblichen Anteil an den Produktionskosten eines Automobils. Ein kompletter Werkzeugsatz für ein kleineres Blechteil einer Fahrzeugkarosserie, bestehend aus einem Ziehwerkzeug, drei Beschneidwerkzeugen und einem Nachformwerkzeug, kostet etwa 1 Mio. €. Damit hat die Standzeit dieser Werkzeuge einen großen Einfluss auf die Produktionskosten. Die Anforderungen an die Werkzeugoberflächen, an die Funktionsflächen der Rohbauvorrichtungen und die Materialien haben sich auf Grund schmaler Blechhaltungen mit hohen Flächenpressungen, den Einsatz höherfester Bleche, diverser Blechbeschichtungen mit verändertem Reibverhalten, höherer Anforderungen an die Außenhautqualität und hohen Stückzahlen erheblich erhöht. Gusswerkstoffe ohne partielle Nachbehandlungen in hochbeanspruchten Bereichen können diese Anforderungen im Sinne der Verschleißfestigkeit zukünftig nicht erfüllen. Eine Wärmebehandlung des Grundwerkstoffs ist somit zwingend erforderlich, wobei sich auf Grund der Abmessungen und Gewichte der Werkzeuge besondere Anforderungen an den Härteablauf ergeben. Großwerkzeuge haben nicht selten eine Masse von mehreren Tonnen, so dass Transport und Lohnhärtung außer Haus mit einem hohen Transport- und damit Kosten- und Zeitaufwand verbunden sind. Gleichzeitig spielt die Durchlaufzeit eine immer größere Rolle.

2 Stand der Technik

2.1 Wärmebehandlung von Großwerkzeugen und Rohbauanlagen

Bisher werden Großwerkzeuge für die Karosserieherstellung mit klassischen Verfahren wärmebehandelt. In der Regel werden die kompletten Werkzeuge bzw. Werkzeugsegmente im Vakuumofen gehärtet, obwohl häufig nur bestimmte Kanten und Konturen im Einsatz verschleißbelastet sind. Härtet man das komplette Werkzeug im Ofen, werden durch die hohen Temperaturen von über 1000 °C im Werkzeug durch den Herstellungsprozess eingebrachte Eigenspannungen abgebaut. Dabei deformiert sich das Werkzeug. Nach dem Härten und Anlassen wird durch aufwändige und zum Teil manuelle Hartbearbeitung die endgültige Werkzeugkontur hergestellt. Dies ist zeitaufwändig und kostenintensiv. (z.B. bisherige Fertigung von Werkzeugsegmenten für Falzvorrichtungen : Fräsen -> Härten (extern) -> Fertigfräsen -> Nitrieren -> abziehen und ggf. abrichten => neues Konzept : Fräsen und Laserhärten auf einer Anlage -> abziehen und einbauen).

Setzt man alternativ zum Ofenhärten das lokal wirksame Flammhärten ein, kann man den Wärmeeintrag reduzieren. Jedoch ist das Flammhärten ein manuelles Verfahren. Das Bearbeitungsergebnis ist von den Fähigkeiten und der Tagesform des Bearbeiters abhängig. Die Reproduzierbarkeit dieses Verfahrens ist schlecht. Nach Aussage von Werkzeugherstellern und -nutzern führt das Flammhärten zu stark schwankenden Härteergebnissen. Es entspricht unter den Aspekten der Forderungen an die Verschleißbeständigkeit und der Verfügbarkeit der Werkzeuge nicht dem heutigen Stand der Technik.

Das Induktionshärten liefert reproduzierbare Ergebnisse, ist aber durch die jeweils vorgegebene feste Induktorform nicht flexibel genug. Außerdem tritt auch beim Induktionshärten ein deutlicher Verzug auf.

2.2 Laserstrahlhärten

Das Laserstrahlhärten, insbesondere mit CO₂-Lasern, wird seit mehreren Jahren industriell angewendet. Beim Laserstrahlhärten wird der Werkstoff durch einen mehrere Quadratmillimeter großen, hochintensiven Laserstrahl partiell über Austenitisierungstemperatur erwärmt. In der Regel wird durch eine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Bauteilkontur eine Härtespur erzeugt. Durch den Wärmeabfluss in das Bauteil, also durch Selbstabschreckung, wird die Martensitbildung erreicht. Die Härtetiefe beträgt üblicherweise 1 bis 1.5 mm, bei sogenannten lufthärtenden Werkstoffen können die Härtetiefen mehrere Millimeter betragen. Mit dem Laserstrahlhärten wird nur dort Wärme eingebracht, wo gehärtet werden soll. Hat man nur bestimmte Kanten und Konturen eines Werkzeuges, die besonders vor Verschleiß geschützt werden sollen, ist das Laserstrahlhärten das geeignete Verfahren. Die in das gesamte Bauteil eingebrachte Wärme ist vergleichsweise gering. Damit ist der nach dem Härten resultierende Verzug minimal. Aufwändige Nacharbeiten können reduziert werden oder sogar entfallen. Das Laserstrahlhärten ist ein Randschichthärteverfahren. Daher muss der beim Randschichthärten auftretende Eierschaleneffekt verhindert werden. Die Einhärtetiefe und die Matrixhärte müssen an die Anwendung angepasst werden, um ein Durchdrücken der laserstrahlgehärteten Randschicht zu vermeiden.

Das Laserstrahlhärten erfordert jedoch umfangreiches Know-How, um den Prozess einzurichten. Eine Vielzahl von Parametern wie Laserstrahlform- und -größe, Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Einstrahlwinkel müssen in Abhängigkeit vom Werkstoff, der zu erreichenden Härtetiefe, der Härtezonenbreite, der Zielhärte sowie der Form der zu

härtenden Bauteilkontur optimiert werden. Darüber hinaus ist die Absorption der Laserstrahlung, d.h. der Anteil der Laserenergie der in Wärmeenergie umgesetzt wird, nicht nur von der Wellenlänge des verwendeten Lasers sondern auch vom Werkstoff, dessen Oxidationsverhalten, der Vorschubgeschwindigkeit, der Schutzgasabdeckung usw. abhängig. Das ist zur Zeit mit einem hohen Einrichtaufwand verbunden, der von metallographischen Untersuchungen begleitet werden muss. Daher werden die wenigen industriell eingesetzten Laserstrahlhärteprozesse von erfahrenen Experten eingerichtet. Die industrielle Anwendung erfolgt fast ausschließlich in der Herstellung von Massenteilen. Dabei kommen die Vorzüge des Laserstrahlhärtens, wie die sehr hohe Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit, zum Tragen, und der Einrichtaufwand ist ökonomisch vertretbar. Hat man jedoch die Stückzahl 1, wie das beim Großwerkzeugbau häufig die Regel ist, kann das Laserstrahlhärten zur Zeit nicht prozesssicher eingesetzt werden. Metallographische Untersuchungen am Werkzeugunikat sind ausgeschlossen. Der Werkzeughersteller verfügt üblicherweise nicht über erfahrene Laserstrahlhärtespezialisten.

Damit bleibt dem Großwerkzeugbau die Möglichkeit verschlossen, durch ein gut steuer- und regelbares Wärmebehandlungsverfahren Kosten und Fertigungszeiten zu sparen.

Der bisher überwiegend zum Härten eingesetzte Lasertyp ist der CO₂-Laser. Er erfordert aber vor dem Härten das Aufbringen eines Absorptionsmittels und damit einen zusätzlichen Arbeitsschritt. Eine neuartige Energiequelle, die auf diesen Arbeitsschritt verzichten kann, darüber hinaus eine um etwa den Faktor vier höhere Energieeffizienz aufweist und auf Grund seines etwa 150mal geringeren Volumens gut in Bearbeitungsmaschinen integrierbar ist, stellt der Hochleistungsdiodenlaser dar.

Ein Nachteil heutiger Hochleistungsdiodenlaser in Bezug auf das Härten von Werkzeugen ist, dass die Intensitätsverteilung innerhalb des rechteckigen oder quadratischen Strahles zwar nahezu konstant aber nicht flexibel einstellbar ist. Von den Laserherstellern angebotene Zoom- oder Vario-Objektive verändern nur die Strahlform aber nicht die Intensitätsverteilung. Das optimale Härten von Kanten erfordert jedoch eine stufenlos und zudem noch während (!) des Härteprozesses veränderbare Einstellung der Leistungsverteilung der Laserstrahlung. Zum Beispiel macht der Wärmestau an Kanten dort gezielt geringere Intensitäten erforderlich.

2.3 Integration von Hochleistungslasern in Werkzeugmaschinen

Besonders effizient wird das Laserstrahlhärten von Einzelstücken und Kleinserien, wenn man den Laser in die vorhandene Bearbeitungsmaschine integrieren kann. Man kann dann auf eine zusätzliche Bearbeitungsmaschine verzichten. Weiterhin verkürzen sich Rüst- und Transportzeiten, wenn die Bauteile die Maschine oder gar den Produktionsstandort während der Bearbeitung nicht wechseln müssen.

Die Integration von Hochleistungslasern in Werkzeugmaschinen ist an sich nicht neu. Erste Veröffentlichungen zu diesem Thema gab es bereits vor etwa 10 Jahren [1], [2], [3], [5], [6]. Die Firma Trumpf setzte als erster die Kombination Stanzen und Laserstrahlschneiden in einer Maschine ein. Häufig wiederkehrende Konturen werden gestanzt, komplizierte und seltene Konturen werden mit dem CO₂-Laser geschnitten.

Die Firma Traub realisierte 1993 die Integration eines Nd:YAG-Lasers in ein Drehzentrum [4]. Damit konnten Verfahren wie das Punktschweißen, Laserstrahlbohren, Tiefschweißen und das Laserstrahlhärten in das Drehzentrum integriert werden.

Ebenfalls einen Nd:YAG-Laser integrierte die Firma Index in ein Drehzentrum GS200 [4]. Die Herion-Werke setzen diese Maschine zum Drehen und Schweißen von Magnetgehäusen industriell ein.

3 Das Projektziel

Auf Basis des Laserstrahlhärtens soll ein Technologiemodul »Integrierte Härterei« entwickelt werden. Dieses soll in verschiedenen Maschinensystemen eingesetzt werden. Durch die »Integrierte Härterei« soll das Laserstrahlhärten vom Expertenprozess zum Facharbeiterprozess entwickelt werden.

Die »Integrierte Härterei« soll dabei aus folgenden, erstmalig zu realisierenden Komponenten bestehen:

- Technologieprozessor mit den Komplexen:
 - Berechnung der Härteparameter
 - automatische Erstellung eines CNC-Härte-Programmes aus CAD-Datenfiles mit integrierter Look-Ahead-Funktion zur Berücksichtigung der lokalen Wärmeabfuhr
 - temperaturgeregelte on-line-Laserleistungssteuerung
- Flexibles Lasermodul bestehend aus
 - Bereitstellungsmodul
 - Hochleistungsdiodenlaser
 - Medienübergabe
 - Temperatursensorik
 - CNC-ansteuerbare flexible Strahlformungseinheit

Damit soll die partielle Wärmebehandlung in die spanende Fertigung von Großwerkzeugen integriert werden. Durch das integrierte Laserstrahlhärten wird zum einen der Verzug minimiert und aufwändige Nachbearbeitung eingespart. Zum anderen wird durch das integrierte Härten der Transport des Großwerkzeuges vermieden. Die mechanische Nachbearbeitung zur Beseitigung des Verzuges entfällt. Die Fertigungszeit kann erheblich verkürzt und die Fertigungskosten können erheblich gesenkt werden. Die folgende Abbildung 1 zeigt eine Gegenüberstellung des Standes der Technik und der Anwendung der »Integrierten Härterei« am Beispiel der Herstellung von Falzbacken (Fa. Nothelfer).

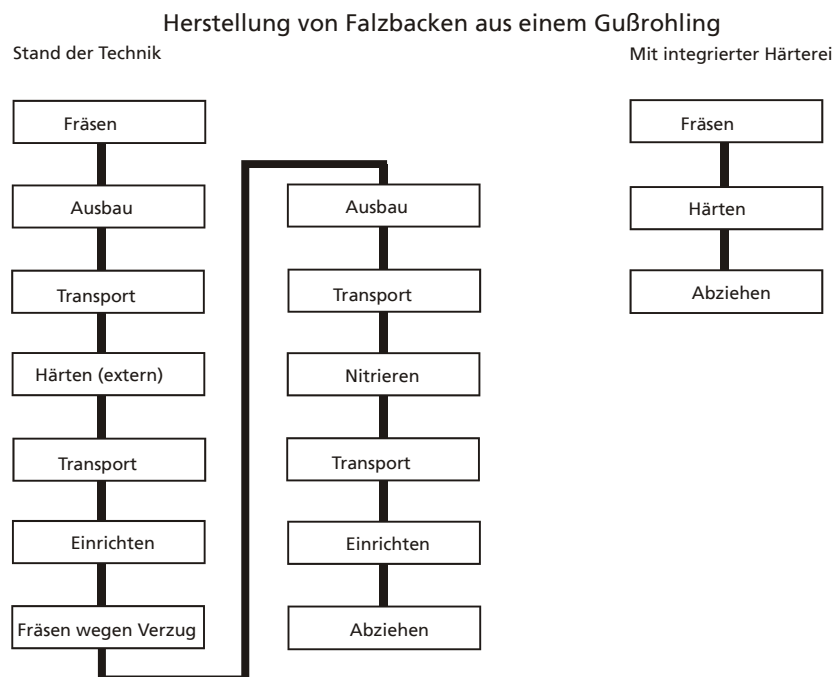


Abb. 1 Prozessschema Herstellung Falzbacken aus einem Gussrohling (Fa. Nothelfer)

Die mechanische und elektrische Integration eines Hochleistungsdiodenlasers mit einer Ausgangsleistung von 4 kW ist nur eine Voraussetzung für die Realisierung des

Technologiemoduls. Das Ziel ist es, das Laserstrahlhärten von einem Expertenprozess zu einem Facharbeiterprozess zu überführen. Das bedeutet, dass das umfangreiche und am Fraunhofer IWS Dresden vorhandene Know-How zum Laserstrahlhärten in Softwaremodule einfließen soll. Diese Module sollen es dem CNC-Programmierer ermöglichen, ohne Expertenwissen zum Laserstrahlhärten, die Parameter für die partielle Wärmebehandlung mit einem Hochleistungsdiodenlaser zu programmieren. Diese Module sollen so arbeiten, dass der Bediener nur wenige Ausgangsforderungen eingeben muss, während die Software das CNC-Programm erstellt. Weiterhin gehört zum Technologiemodul eine Prozessregelung, die eine hohe Prozesssicherheit gewährleistet.

Damit variable Härtespurbreiten während der Wärmebehandlung realisiert werden können, wird eine Strahlformungseinheit entwickelt, mit der die Intensitätsverteilung des Hochleistungsdiodenlasers, vom CNC-Programm gesteuert, so verändert und angepasst werden kann, dass Kanten und Konturen optimal gehärtet werden können.

Mit dem Technologiemodul »Integrierte Härterei« werden bei der industriellen Herstellung von Werkzeugen Härtezonen mit Qualitäten realisiert, wie sie bisher nur durch aufwändige Parameteroptimierung im Labor und von erfahrenen Experten erreicht werden.

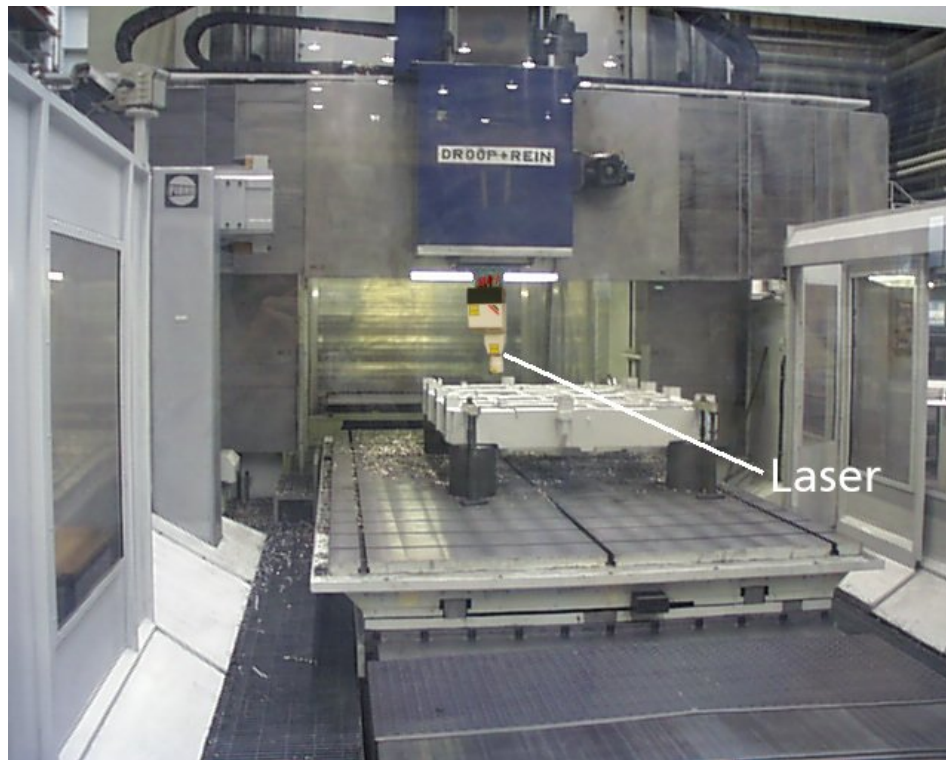


Abb. 2 (Quelle: BMW AG Dingolfing) Fotomontage, Lasermodul anstelle einer Frässpindeleinheit integriert in Fräszentrum Droop+Rein T25 50 P R50C, Vision für Demonstrator 1

Um die universelle Einsetzbarkeit der »Integrierten Härterei« zu erreichen, sollen verschiedene Demonstratoren aufgebaut werden. Mit dem ersten Demonstrator wird die Integration als auswechselbares Werkzeug in eine vorhandene 5-Achs-Portalfräsmaschine mit einer klassischen CNC-Steuerung realisiert. Damit soll die Ergänzung vorhandener Bearbeitungszentren durch ein direkt einwechselbares Lasermodul gezeigt werden (siehe Fotomontage in Abb. 2). Der zweite Demonstrator zeigt die Integration mit separater 5-Achs-Bewegungseinheit mit CNC-Steuerung in eine vorhandene 5-Achs-Portalfräsmaschine. Hierbei wird realisiert, dass während ein Teil spanend bearbeitet wird ein weiteres Teil gleichzeitig im Palettenbahnhof des Bearbeitungszentrums gehärtet werden kann. Der dritte Demonstrator ist die Kombination mit einem 6-Achs-Knickarmroboter mit Robotersteuerung. Dieses System kann universell z.B. in einem Palettenbahnhof eines Bearbeitungszentrums aber auch als Einzelanlage betrieben werden. Durch die verschiedenartigen Demonstratoren

werden alle für den späteren industriellen Einsatz der »Integrierten Härterei« wesentlichen Maschinen- und Steuerungstypen erfasst. Damit werden die Voraussetzungen dafür geschaffen, die »Integrierte Härterei« nach Ablauf des Projekts breitenwirksam einsetzen zu können.

4 Der Technologieprozessor

Vom Fraunhofer IWS Dresden wird derzeit ein Technologiepostprozessor entwickelt. Dieser ist das Herzstück des Projektes Integrierte Härterei. Er berechnet aus dem 5-Achs-Fräsprogramm der Werkzeugkontur ein CNC-Programm für das Laserstrahlhärten der verschleißbeanspruchten Werkzeugkanten. Zur Erstellung des CNC- Bahnprogrammes wird ein handelsübliches 5-Achs-fähiges CAM-System verwendet. Dieses stellt jedoch über die üblichen Informationen hinausgehend auch Volumeninformationen des Bauteilmodelles zur Verfügung, die für die Simulationsrechnungen des Technologieprozessors benötigt werden.

Eingangsdaten für den Technologieprozessor sind:

- Werkzeugwerkstoff
- maximal zu Verfügung stehende Laserleistung
- geforderte Härtezonenbreite
- geforderte Härtetiefe

Das Ergebnis ist ein CNC-Bearbeitungsprogramm welches das Laserstrahlhärten der Werkzeugkonturen ermöglicht, in dem die Prozessparameter:

- wärmeleitungsabhängige Vorschubgeschwindigkeit
- Arbeitsabstand und Optikeinstellung des Lasers
- Intensitätsverteilung des Laserstrahles
- maximale Oberflächentemperatur

berücksichtigt sind. Dabei muss der Laser mit einer Genauigkeit von ± 0.1 mm der Werkzeugkontur folgen und möglichst senkrecht auf das Bauteil auftreffen. Abweichungen von der Senkrechteinstrahlung müssen durch Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit ausgeglichen werden.

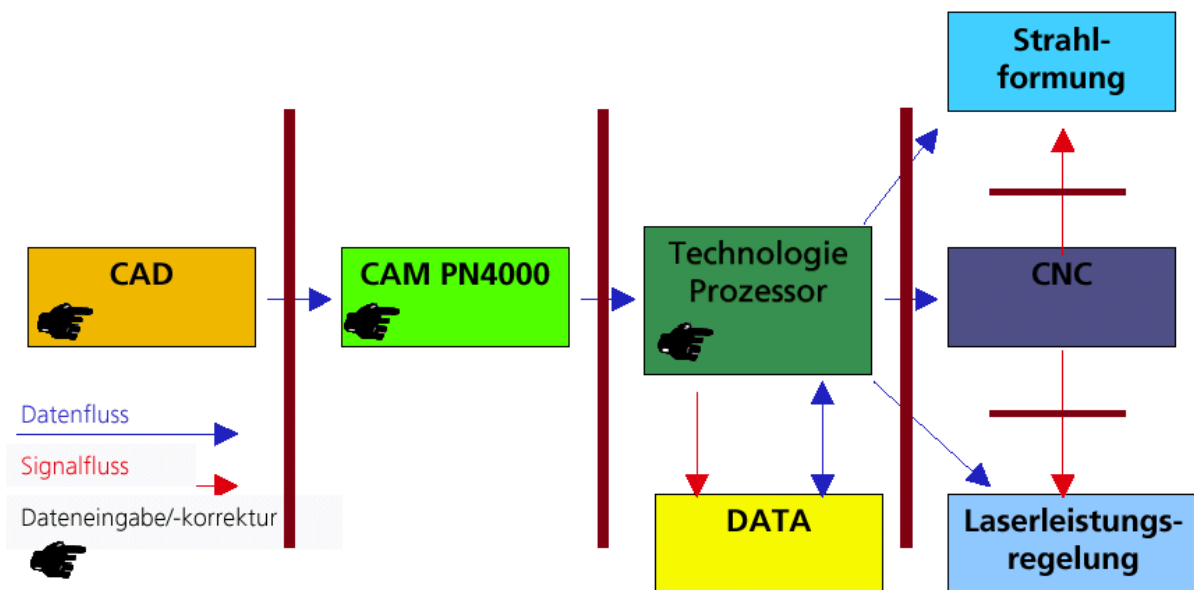


Abb. 3 Konzept der Integrierten Härterei, Schnittstellen sichern Offenheit für zukünftige Entwicklungen

5 Das Lasermodul

Durch das Fraunhofer IWS wurde eine Strahlformungseinrichtung entwickelt, mit der variable Härtespurbreiten von 4 bis über 30 mm realisiert werden können. Es wird dabei auf bewährte Scannertechnik aus der Anwendung von CO₂-Lasern zurückgegriffen. Für die Anwendung mit Hochleistungsdiodenlasern werden derzeit verschiedenen Spiegelmaterialien und Beschichtungen untersucht. Die besondere Schwierigkeit besteht darin, dass die verwendeten Hochleistungsdiodenlaser zwei verschiedenen Wellenlängen gleichzeitig emittieren und dies mit einem vergleichsweise großen Divergenzwinkel tun. Eine adaptive Anpassung der Schwingfunktion gestattet es die verfügbare Laserleistung maximal auszunutzen und einen konturangepassten Wärmeeintrag zu erzeugen. Dabei wird die Intensitätsverteilung senkrecht zur Bewegungsrichtung des Laserstrahles CNC-gesteuert verändert, damit Werkzeugkanten unter Ausnutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Laserleistung und mit optimaler Einhärtetiefe gehärtet werden können. Der vorzugsweise rechteckig geformte Strahl kann in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gedreht werden. Um den meist näherungsweise rechteckig geformten Strahl immer optimal in Bezug zur Vorschubrichtung drehen zu können, wurde das Lasermodul mit einer eigenen Drehachse ausgestattet. Diese 6. Achse wird in die Steuerung der Fräsmaschine oder des Härteportals eingebunden und vom CAM-System als Zustellachse betrachtet. Für die verschiedenen Maschinen- und Steuerungssysteme wird der Antrieb der 6. Achse austauschbar gestaltet. Bei der Anwendung des Lasermoduls mit dem 6-Achs-Knickarmroboter kann auf die separate 6. Achse verzichtet werden. Zur Prozesskontrolle wird die Oberflächentemperatur mit einem Infrarotstrahlungs-pyrometer gemessen. Die Messung erfolgt koaxial zum dynamisch abgelenkten und dadurch optimal geformten Laserstrahl. Damit kann bei sich verändernden Arbeitsabständen sowie bei Wärmestau an Werkzeugkanten die Prozessregelung immer nach dem heißesten Punkt der Bauteiloberfläche erfolgen. Anschmelzungen von Werkzeugschneidkanten können so vermieden und optimale Austenitierungstemperaturen eingehalten werden.

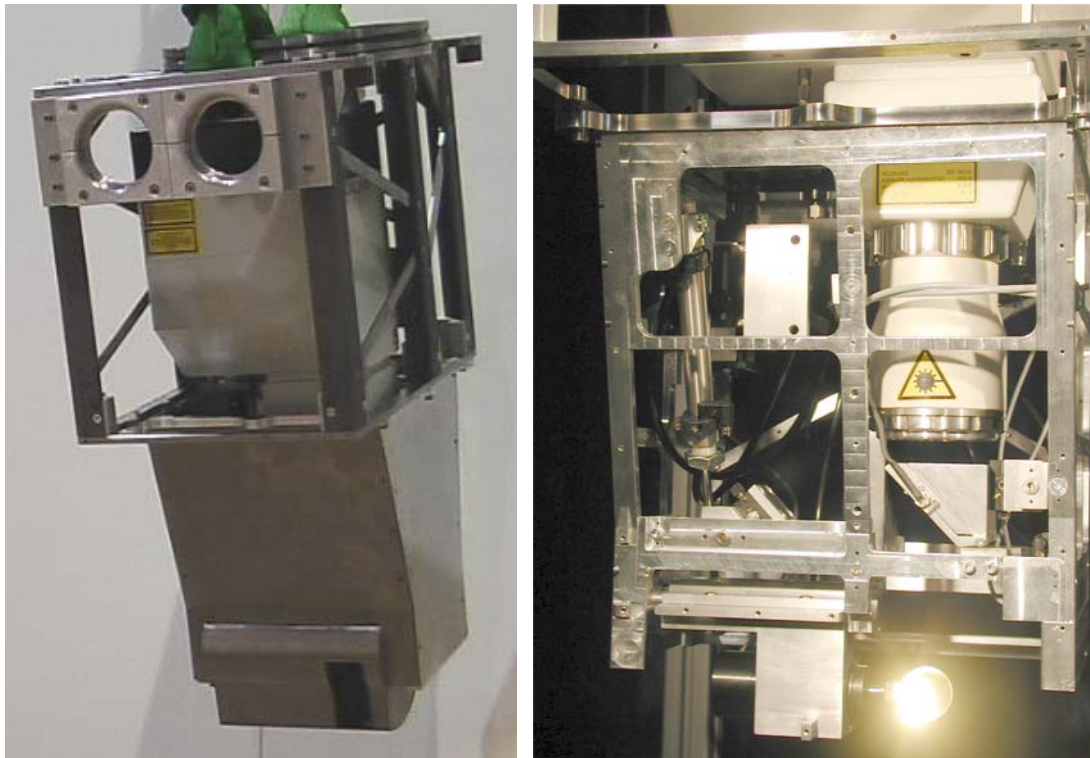


Abb. 4: Prototyp des Lasermoduls der Integrierten Härterei mit Strahlformungseinheit und Temperaturmesssystem

Die vom Fraunhofer IWS entwickelte und bereits kommerziell vertriebene Laserleistungsregelung »LompocPro« [7] ergänzt das Lasermodul um eine unverzichtbare hochdynamische Leistungsregeleinheit. Je nach Anwendungsfall kann die Laserleistung entweder langsam nachgeregelt oder mit einer ständig angepassten Schwingfunktion moduliert werden. Zur schnellen Modulation der Laserleistung der verwendeten Hochleistungsdiodenlaser, die mit hohen Gleichströmen betrieben werden, wurde in Zusammenarbeit mit einem Netzteilerhersteller ein geeigneter Modulator entwickelt.

6 Umsetzungsvarianten

Das Lasermodul wird in einem 5-Achs-Fertigungszentrum Droop+Rein T25 50 eingesetzt werden. Dazu werden die notwendigen Versorgungsmedien wie Kühlwasser sowie Stromversorgungs- und Signalleitungen separat geführt. Das Lasermodul erhielt einen Parkplatz von dem aus die Maschine es automatisch wie ein normales Werkzeug einwechseln kann. Ist das Lasermodul nicht eingewechselt, ist die volle Funktionalität des Bearbeitungszentrums uneingeschränkt nutzbar. Die Laserbearbeitung erfordert entsprechende Schutzvorrichtungen vor Laserstrahlung, damit das in der Produktionshalle vorhandene Personal wirkungsvoll vor Schädigungen durch Laserstrahlung geschützt wird. Dazu wurde eine Maschinenumhausung entwickelt und realisiert. Diese soll den bisherigen Bedienkomfort bei der spanenden Bearbeitung nicht einschränken und wird daher nur für die Wärmebehandlung mit dem Hochleistungsdiodenlaser aktiviert. Zusätzliche Beleuchtung sowie eine Videokamera zur Prozessbeobachtung wurden eingebaut.

Der zweite Demonstrator ist ein 5-Achs-Portal mit CNC-Steuerung. Dieses soll als separate Bewegungseinheit das über die zu entwickelnde Standardschnittstellen angeflanschte Lasermodul führen. Das Portal wird in den Palettenbahnhof eines 5-Achs-Bearbeitungszentrums von Droop+Rein integriert. Damit kann mit der Integrierten Härterei parallel zur spanenden Bearbeitung die Wärmebehandlung von Großwerkzeugen durchgeführt werden. Es werden Steuerungsverknüpfungen zwischen Härteportal und Fräsmaschine realisiert. Das Portal wird mit seiner Mechanik sowie seinen notwendigen Schutzeinrichtungen so integriert, dass die volle Funktionalität des Palettenbahnhofes und dabei insbesondere die Kranzugänglichkeit erhalten bleibt.

Der dritte Demonstrator ist ein 6-Achs-Knickarmroboter der mit dem Technologiemodul Integrierte Härterei ausgestattet ist. Es werden die zu entwickelnden Standardschnittstellen an einem Knickarmrobotersystem realisiert. Diese ermöglichen es, die entwickelten Softwaremodule sowie das Lasermodul zu integrieren. Ebenso wie bei den anderen Demonstratoren wird eine Maschinenumhausung entwickelt und realisiert, damit das System die Anforderungen an die Laserklasse 1 erfüllt und in industriellen Produktionsumgebungen eingesetzt werden kann. Mit der Roboter-Variante findet das Technologiemodul Integrierte Härterei breitere Anwendung auch außerhalb von Fräszentren.

Literatur:

- [1] Weck, M.; Mayrose, H. G.: Laserintegration in Bearbeitungsmaschinen. Industrieanzeiger, 1989, Nr. 48, S. 46-47
- [2] Westkämper, E.; Lang, S.: Innovationspotentiale durch Laserintegration in Werkzeugmaschinen. Dima, 1993, Nr. 8/9, S. 40-41
- [3] Wiedmaier, M.; Meiners, E.; Dausinger, F.; Hügel, H.: Integrierte Lasereinsatz erweitert Komplettbearbeitung in Drehzentren. VDI-Z, 136 (1994), Nr. 4, S. 78-81

- [4] Rudlaff, T.; Pesch, M.; Wiedmaier, M.; Brandner, M.: Laserintegrierte Komplettbearbeitung – erste Anwendung in der Praxis. Proceedings ECLAT 1996, S. 779-788
- [5] König, W.; Wagemann, A.; Mayrose, H.-G.: Laserunterstütztes Drehen von heißgepresstem Siliziumnitrid. Industrieanzeiger, 1990, Nr. 3/4, S. 38-39
- [6] König, W.; Treppe, F.; Zaboklicki, A.: Laserunterstütztes Fräsen. VDI-Z, 134 (1992), Nr. 2, S. 43-48
- [7] S. Bonß, M. Seifert, B. Brenner, E. Beyer: »Innovations in Heat Treatment with High Power Diode Lasers«, Proceedings of ICALEO 2000, LIA Vol. 91, Section D, pp. 19-27