



Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	2
Betrachtete Systeme.....	3
Prozessrelevante Parameter.....	4
Parameter mit erheblichem Einfluss.....	4
Parameter mit zweitrangigem Einfluss.....	4
Parametrierungslösung „Scanmatrix“.....	5
Einordnung in steuerungstechnisch bekannte Lösungen.....	5
Realisierung mit Scannersteuerungen.....	5
Realisierung innerhalb der Laserstrahlquellensteuerung.....	5
Realisierung innerhalb der NC.....	5
Scanmatrix - eine Tabelle beschreibt eine Periode.....	5
Datenformat XML.....	6
Parametrierung.....	6
Überführung in abarbeitbare Form.....	6
Beeinflussung aus dem NC-Programm.....	7
Synchronisierung mit anderen Vorgängen.....	7
Das realisierte System – am Beispiel vorgestellt.....	7
Wie entsteht eine Scanmatrix in der Praxis?.....	11
Per (XML)-Editor.....	11
Unter Nutzung von Werkzeugen wie Matlab/Scilab.....	11
Ausblick – die komfortable Erstellung und Pflege der Scanmatrix aus der Sicht des Technologen.....	11
Weiterführende Links.....	12

Version 0.3 vom 19.12.2014

Die Autoren nutzen die folgend beschriebene Parametrierungslösung bereits seit ca. zwei Jahren erfolgreich. Die Lösung soll jedoch bewusst der Fachwelt zur Diskussion gestellt werden – jede Form von Kritik ist willkommen. Bitte nutzen Sie die in der Fußzeile angegebenen Kontaktinformationen.

Marken Dritter sowie deren Nennung dienen der Veranschaulichung unseres Angebotes, die bloße Nennung impliziert nicht, dass die genannten Marken ungeschützt oder nicht den Besitzrechten der jeweiligen Eigentümer unterliegen würden.



Einleitung

In Prozessen der Laser-Materialbearbeitung kann durch eine periodisch wiederkehrend ausgeführte, der eigentlichen Vorschubbewegung überlagerten Strahlauslenkung ein erheblicher Einfluss auf die eigentliche Bearbeitungstechnologie genommen werden. Hauptwirkungsmechanismen sind dabei die Beeinflussung der wirkenden Leistungsdichteverteilung und den damit eingestellten Temperaturfeldern oder bei Prozessen in der Schmelzphase auch eine Einflussnahme auf die Dynamik der Schmelze.

Für Prozesse die diese Einflussnahme nutzen sind Begriffe wie „Scannen“, „Wobbeln“ oder „Programmierbare Strahlqualität“ eingeführt.

Die Parametrierung der hier betrachteten Systeme erfolgt herkömmlich mit herstellerspezifischen Hilfsmitteln und regelmäßig nicht aus Sicht des Technologen und einer ggf. erforderlichen Übertragbarkeit auf andere Systeme.

Ziel dieses White Paper ist daher einen unter den Aspekten des technologischen Nutzens und einer Übertragbarkeit formulierten, allgemeingültigen Parametrierungsvorschlag für solche Systeme vorzustellen.

Mit der Nutzung eines solchen Systems ist es möglich, die auf einer konkreten Laseranlage gefundenen technologischen Lösungen mit wenig Aufwand zu beschreiben und mit hoher Sicherheit auf eine andere Laseranlage (anderer Hersteller, anderer Scanneraufbau) zu übertragen.



Betrachtete Systeme

Ein bis drei Freiheitsgrade zur Geometriebeschreibung (Lage quer zum Vorschubvektor (1), Lage in Richtung Vorschubvektor (2), Brennfleckgröße (3)) und Leistungsbeschreibung des ausgelenkten Laserstrahles (4).

Beispiele für am Markt verfügbare Systeme:

- Wobbel-Optiken der Firmen Trumpf und Precitec 1-Achs (1) teilweise (4)
- Reis/Fraunhofer Veränderung der Rekollimationsoptik zur Brennfleckgrößenveränderung (3)
- Zweiachs-Einspiegelscanner LASERVORM LV SpinScan (1)(2)(4)



Prozessrelevante Parameter

Aus praktischer Erfahrung und theoretischen Betrachtungen für die relevanten Einsatzfälle Laserschweißen, Laserhärten und Laserauftragschweißen wurde die folgend dargestellte Aufteilung hinsichtlich Relevanz der Parameter getätigt und die „Parameter mit erheblichem Einfluss“ in der realisierten Parametrierungslösung berücksichtigt.

Sollten sich weitere Parameter als „erheblich“ herausstellen, so könnten diese ebenfalls Berücksichtigung finden, ohne das Konzept zu sprengen.

Parameter mit erheblichem Einfluss

- Lage des Spots bezogen (relativ) zur im NC-Programm festgelegten Vorschubbahn auf der Werkstückoberfläche
- Dimension (Durchmesser) des Spots auf der Werkstückoberfläche
- Momentane Laserleistung
- Frequenz bzw. Scanperiode

Parameter mit zweitrangigem Einfluss

- Leistungsdichteverteilung innerhalb des Spots
- Verzerrung des Spots als Folge des ggf. (leicht variierenden) Einfallwinkels

Parametrierungslösung „Scanmatrix“

Einordnung in steuerungstechnisch bekannte Lösungen

Die bewegten, relativ kleinen Massen der optischen Bauelemente (Spiegel, Linsen) ermöglichen Periodenfrequenzen in Dimensionen von bis zu wenigen 10^2 Hz. Um eine prozessrelevante Auflösung innerhalb der periodisch abzuarbeitenden Scanbewegung zu erreichen, müssen also mindestens 10fach höhere Stützpunktfrequenzen bedient werden – also einige 10^3 Hz. Klassische NC-Steuerungen können diese Frequenzen nicht erreichen, so dass heute folgende Steuerungslösungen bekannt sind:

Realisierung mit Scannersteuerungen

Ansteuerung der Scanner mit einer eigenen Scannersteuerung, realisiert oftmals als PC-Einsteckkarte (Bsp.: Scanlab RTC, Raylase SP-ICE-1 PCI PRO).

Realisierung innerhalb der Laserstrahlquellensteuerung

Einige Laserhersteller (Bsp.: Trumpf, Rofin) integrieren die Ansteuerelektronik für Scanner in die Steuerelektronik des Lasergerätes.

Realisierung innerhalb der NC

Mit der Integration von NC und Scannersteuerung wird das Ziel verfolgt, eine (bessere) Echtzeitsynchronisation von Scanbewegungen, Servoachsen und sonstigen Komponenten einer Laseranlage zu erreichen (Bsp.: Aerotech Nmark SSaM, Laservorm EPL-HS-MIO).

Für die Strahlformung eingesetzte Scanner und scannerähnliche Systeme werden typischerweise periodisch arbeitend betrieben (eine vordefinierte Bahn relativ zum TCP wird in endloser Abfolge abgearbeitet). Damit kann diese Periode sehr gut in einer Tabellenform beschrieben werden.

Scanmatrix - eine Tabelle beschreibt eine Periode

Die Scanmatrix beschreibt eine volle Periode in den Geometriekoordinaten

- Lage relativ in Vorschubrichtung (auf der Werkstückoberfläche),
- Lage relativ quer zur Vorschubrichtung (auf der Werkstückoberfläche) und
- Laserstrahldurchmesser (auf der Werkstückoberfläche)

sowie dem jeweils zugeordneten Parameter Laserleistung in einer „angemessenen“ Stützpunktanzahl. Bei Bedarf können weitere, in der Scanperiode wichtigen Signale, in die Scanmatrix integriert werden (z. B. Triggersignale für eine Messwertaufnahme an einem bestimmten Ort in der Scankontur).

Über eine passend zur konkreten Technik parametrieren Transformationsmatrix kann dann (bei bekannter inverser Übertragungsfunktion) automatisch in die entsprechenden Vorgabewerte für die Scannerachsen bzw. die Laserleistung umgerechnet werden.

Die gewählte Parametrierungslösung beschreibt mit minimalem Aufwand, wie der Laser-



strahl auf das Bauteil einwirkt. Diese Basis wurde gewählt, da sie (unabhängig davon wie dieses Verhalten technisch erreicht wird) am ehesten technologierelevante Informationen beinhaltet und damit für eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Lösungen sorgt. Das vorstehend geschilderte Vorgehen ist streng einer ToolCenterPoint-Programmierung (TCP) zur Beschreibung der Verfahrensbewegung einer Werkzeug- oder auch Lasermaschine vergleichbar.

Eine Sonderform des Scansystems – der Resonanzscanner – kann durch eine „sehr kurze“ Tabelle gleichfalls (ohne unnütze Datenflut) parametrierbar und in der technologischen Auswirkung des bewegten Laserstrahles auf der Bauteiloberfläche beschrieben werden.

Datenformat XML

Zur datentechnischen Beschreibung der Scanmatrix wurde das Datenformat eines XML-Files gewählt. Dieser offene Standard des World Wide Web Consortium (W3C) ist sowohl für den Menschen als auch für Maschinen les- und prüfbar und wird von einer Vielzahl von Programmiersystemen bestens unterstützt.

Parametrierung

Die in der Scanmatrix zu hinterlegenden Informationen zur Scankontur müssen durch den Technologen hinsichtlich Datenmenge bzw. Stützpunktanzahl nur entsprechend der Komplexität einer auf dem Bauteil gewünschten Scankontur beschrieben werden. Ein Stützpunkt besteht dabei immer aus einem Zeitpunkt und zugehöriger Position und Größe des Brennflecks auf dem Werkstück, zugeordneter Laserleistung und ggf. weiteren zugeordneten Parametern.

Zwischen den Stützpunkten wird dann für die eigentliche Ansteuerung des Scannersystems (typischerweise linear) interpoliert.

Überführung in abarbeitbare Form

Aus der durch den Technologen erstellten Scanmatrix kann durch eine Transformation die Ansteuerinformation für die konkreten Antriebe des Scansystems berechnet werden. Hiermit erfolgt also die Überführung der allgemeinen, maschinenunabhängigen Beschreibung eines technologischen Bedarfes in die maschinen- bzw. scansystemspezifischen Ansteuerinformationen. Aus Vektoren auf der Bauteiloberfläche werden damit z. B. Auslenkwinkel eines Galvanometerspiegels. Dabei werden dann konkrete optische Gegebenheiten (z. B. die Brennweite der Bearbeitungsoptik) mit verrechnet.

Wird bei dieser maschineninternen Transformation das dynamische Übertragungsverhalten mit berücksichtigt (inverse Übertragungsfunktion), dann wird hierbei auch die endliche Dynamik eines konkreten Scansystems (Trägheit der Spiegel und anderer Komponenten des Gesamtsystems) berücksichtigt. Das Gesamtsystem wird entsprechend „vorgesteu-



ert“, um den in der Scanmatrix dokumentierten „Wunsch des Technologen“ optimal am Bauteil zu erzielen.

Beeinflussung aus dem NC-Programm

Die Scanmatrix beschreibt typischerweise das gewünschte Strahlformungsverhalten für bestimmte Bedingungen am Werkstück (Beispiel: Auslenkung des Scansystems um 0,8 mm quer zur Vorschubrichtung und der zugehörigen Laserleistungen zum Überbrücken von einem Fügespalt von 0,5 mm beim Schweißen einer I-Naht).

Liegen bei einer konkreten Bearbeitung Informationen vor, die eine Abweichung von den erwarteten Bedingungen bedeuten, dann kann das Gesamtsystem durch Offsets den veränderten Bedingungen angepasst werden (Beispiel: der Spalt liegt mit 0,6 mm breiter als erwartet vor - durch einen auf die gesamte Scanmatrix verrechneten Geometrieoffset von 20 % und einen Leistungsoffset von 20 % kann das System „on the fly“ auf die konkreten Bedingungen adaptiert werden, ohne das in der Scanmatrix beschriebene Prinzip zu wechseln.

Mit diesen über das NC-Programm wählbaren Offsets können technologisch relevante Größen (wie z. B. Spaltbreite beim Schweißen, Stegbreite beim Auftragschweißen) bei Vorliegen der entsprechenden Informationen zur Adaption an die konkreten Bedingungen benutzt werden.

Synchronisierung mit anderen Vorgängen

Die Scanmatrix kann sinnvollerweise so erweitert werden, dass vergleichbar schnelle und synchron zu bedienende Zusatzfunktionen (neben Strahlformung und Laserleistungsmodulation) in einer Lasermaschine mit beschrieben bzw. bedient werden. Beispiel 1: Synchronisierte Bildaufnahme (ein Kameratrigger wird z. B. dann ausgelöst, wenn die Laserleistung sehr schwach ist und damit die Plasmafackel das Bild nicht überstrahlt)

Beispiel 2: Sensoren zur Erfassung des Prozessleuchtens werden an definierten Positionen der Scankontur ausgelesen.

Das realisierte System – am Beispiel vorgestellt

Folgend ist (eine gekürzte und kommentierte) Version einer Scanmatrix abgebildet. Diese Scanmatrix beschreibt das, was den „konkreten Bedarf des Technologen“ auf der Werkstückoberfläche beschreibt – es ist also unabhängig von der konkreten technischen Ausbildung des Scansystems und unabhängig von konkreten Optikausbildungen einer Laseranlage. Die Anwendung dieser damit beschriebenen Technologieinformation wird auf sehr unterschiedlichen Laser- und Scansystemen zu gleichen Resultaten führen:

```
<?xml version="1.0"?>
<ScanMatrix>
  <name>4 Linien gerade</name>
  <!--auf vier Linien in Vorschubrichtung defokussieren
einmal pro Zyklus Messwertaufnahme starten
Bildaufnahme nach jeder Linie
-->
  <!-- Einheiten der Komponenten-->
  <time_unit>ms</time_unit>
  <p_unit>W</p_unit>
  <x_unit>mm</x_unit>
  <y_unit>mm</y_unit>
  <r_unit>mm</r_unit>
  <!--digitale Komponenten ohne Einheit
koennen den Wert 1 oder 0 annehmen -->
  <Point>
    <!--Zeitstempel -->
    <time>0</time>
    <!--Laserleistung -->
    <p>0</p>
    <!--Auslenkung laengs zur Vorschubrichtung-->
    <x>-0.5</x>
    <!--Auslenkung quer zur Vorschubrichtung-->
    <y>-0.9</y>
    <!--Strahlradius-->
    <r>0.15</r>
    <!--Trigger fuer Bildaufnahme -->
    <dig0>0</dig0>
    <!--Trigger fuer Messwertaufnahme-->
    <dig1>1</dig1>
  </Point>
  ...
  <Point>
    <time>168</time>
    <p>0</p>
    <x>-0.5</x>
```



```
<y>-0.9</y>
<r>0.15</r>
<dig0>0</dig0>
<dig1>0</dig1>
</Point>
</ScanMatrix>
```

Das folgend dargestellte XML-File enthält Informationen zu einem konkreten Scansystem, integriert in eine konkrete Optik einer Lasermaschine (z. B. Faserdurchmesser und Brennweiten der Optiken). Es enthält statische und dynamische Kennwerte zur Transformation zwischen der „den Bedarf des Technologen“ ausdrückenden Scanmatrix und den Ansteuerkennwerten des konkreten Scansystems.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Optics>
  <Laser>
    <d_fiber>0.15</d_fiber>
    <NA_fiber>0.2</NA_fiber>
    <P_max>1000</P_max>
    <Simulation>
      <Tt>0.025</Tt>
      <num>1</num>
      <den>1+0.000008*s</den>
    </Simulation>
  </Laser>
  <Collimation>
    <pos>100</pos>
    <f>100</f>
  </Collimation>
  <Focusing>
    <pos>0</pos>
    <f>250</f>
  </Focusing>
  <Scanner>
    <pos>0</pos>
  <Limits>
```

```
<x_min>-7.07107</x_min>
<x_max>7.07107</x_max>
<y_min>-10</y_min>
<y_max>10</y_max>
</Limits>
<Simulation>
  <Tt>0</Tt>
  <num>0.9917440 + 0.0004837*s</num>
  <den> 1.0014128 + 0.0045330*s + 0.0000140*s^2</den>
</Simulation>
</Scanner>
</Optics>
```

Wird eine Lasermaschine mit einem konkreten Scanner-Strahlformungssystem ausgestattet und das optische und dynamische Verhalten dieses Systems (wie z. B. in o. g. Form beschrieben) zugefügt, kann die Steuerung automatisch zwischen „technologischer Beschreibung (Scanmatrix)“ und „maschineninterner Ansteuerung“ umrechnen.

Wird nun z. B. die Brennweite des Strahlformungssystems geändert, ist lediglich die Beschreibung der Bearbeitungsbrennweite (im vorstehenden Beispiel „Focusing“) auf die neue Situation anzupassen, um das gleiche Strahlformungsverhalten auf der Werkstückoberfläche zu erreichen (Auslenkwinkel und Brennfleckdurchmesser werden durch die maschinenintegrierte Transformation automatisch auf die in der Scanmatrix vorgegebenen Parameter angepasst).

Wie entsteht eine Scanmatrix in der Praxis?

Per (XML-)Editor

Da die typischen Scangeometrien nicht sehr komplex ausfallen (Ellipsen, Kreise, Rampenkonturen), lassen sich diese mit wenigen Stützpunkten beschreiben.

Beispiel: Ein quer zur Vorschubrichtung auszuführendes Pendeln aus der Mittelpunktlage unter Beachtung der endlichen Dynamik an den Umkehrpunkten lässt sich in acht Stützpunkten oftmals hinreichend genau beschreiben.

Vor diesem Hintergrund ist die Verwendung eines Texteditors ein durchaus produktives Werkzeug. Der Einsatz eines XML-Editors bietet zusätzlich den Vorteil der automatischen Struktur- und Syntaxüberwachung.

Unter Nutzung von Werkzeugen wie Matlab/Scilab

Typischerweise werden Scanner-Strahlformungssysteme an den Grenzen ihrer dynamischen Möglichkeiten betrieben, um einen quasi-stationären Energieeintrag zu erzielen. Beschreibt der Technologe seinen Wunsch in Form der Scanmatrix kann er in diesem Moment noch nicht wissen, ob das konkrete System seinen Wunsch realisieren kann. Bei bekannten Übertragungsfunktionen für Scannersystem und Laserstrahlquelle lassen sich jedoch die sich einstellenden Bahnen bzw. das Verhalten der Laserstrahlquelle simulieren und das Resultat grafisch darstellen.

Entsprechende Werkzeuge sind verfügbar und verkürzen drastisch die Parametrierung einer konkreten Strahlformungsapplikation.

Ausblick – die komfortable Erstellung und Pflege der Scanmatrix aus der Sicht des Technologen

Mit der vorgenannten Methode führt der Technologe typischerweise einen mehrstufigen Optimierungsvorgang durch und ermittelt damit eine vom System erzielbare Scanperiode. Unter Berücksichtigung der inversen Übertragungsfunktion wird es möglich sein, noch komfortabler (z. B. per Maus editierbare Scankontur) die erforderlichen Parametrierungen vorzunehmen.

Weiterführende Links



Link: Komplette Scanmatrix als XML-File



Video: Scanmatrix in der Praxis beim Auftragschweißen