



Bachelorarbeit zum Thema:

**Erstellung eines Konzeptes zur Lösung von
Qualitätssicherungsaspekten in automatisierten
Fertigungssystem mit integrierter Laser- Schneidtechnik**

Xu, Jiaming Studiengang

BMMP16

Studienrichtung: Mechatronik

Matrikel- Nr.: 24721

13 / 07 / 2020

Abstract

| | |
|--|----|
| 1. Einleitung..... | 4 |
| 1.1 Aufgabenstellung..... | 5 |
| 1.2 Lösung der Aufgabestellung..... | 5 |
| 2. Flexible Fertigungssystem (FFS)..... | 6 |
| 2.1 Entwicklungstendenzen in der Fertigungstechnik..... | 7 |
| 2.2 Voraussetzungen und Charakteristika des Einsatzes von FFS..... | 9 |
| 2.2.1 Voraussetzungen für den Einsatz von FFS..... | 9 |
| 2.2.2 Einsatzcharakteristika für FFS..... | 10 |
| 2.3 Planungsgrundlagen für FFS..... | 14 |
| 2.4 Aufbau des FFS..... | 16 |
| 2.5 allgemeine Qualitätsaspekte in FFS..... | 17 |
| 3. Laser- Schneidtechnik..... | 18 |
| 3.1 Lasererzeugung und Eigenschaften..... | 18 |
| 3.2 Wechselwirkung von Laser und Materie..... | 19 |
| 3.3 Grundprinzipien des Laserschneidens..... | 21 |
| 3.4 Vor- und Nachteile des Laserschneidens..... | 23 |
| 3.4.1 Vergleich zwischen Laserschneiden und traditionellem Schneiden..... | 23 |
| 3.4.2 Vor- und Nachteile des Laserschneidens..... | 24 |
| 3.5 Qualitätsicherung in der Lasermaterial- Bearbeitung beim Laser- Schneiden..... | 25 |
| 4. Die Lösung der technischen Einrichtungen..... | 27 |
| 4.1 CO ₂ - Laserschneiden..... | 27 |
| 4.1.1 Definition..... | 27 |
| 4.1.2 Wirkprinzip..... | 27 |
| 4.1.3 Einsatzgrenzen, -möglichkeiten..... | 28 |
| 4.1.4 Vor- und Nachteile..... | 29 |
| 4.2 Unterwasser- Laserschneiden..... | 29 |
| 4.2.1 Definition..... | 29 |
| 4.2.2 Wirkprinzip..... | 29 |

| | |
|---|----|
| 4.2.3 Einsatzgrenzen, -möglichkeiten..... | 30 |
| 4.2.4 Vor- und Nachteile..... | 32 |
| 4.3 Faserlaserschneiden..... | 32 |
| 4.3.1 Definition..... | 32 |
| 4.3.2 Wirkprinzip..... | 32 |
| 4.3.3 Einsatzgrenzen, -möglichkeiten..... | 33 |
| 4.3.4 Vor- und Nachteile..... | 33 |
| 5. Auslegung und Bewertung von Lösungsvarianten..... | 34 |
| 5.1 Hilfsmitteln..... | 34 |
| 5.2 Schneidgeschwindigkeit..... | 34 |
| 5.3 Schneidqualität..... | 35 |
| 5.4 zusätzlicher Prozess..... | 35 |
| 5.5 Wirtschaft..... | 36 |
| 5.6 Tabelle für die Kriterien..... | 37 |
| 6. Ausgewählte Betrachtung zur Vorzugsvarianten- Faserlaser..... | 38 |
| 6.1 Merkmale des Electra FL-3015s..... | 39 |
| 6.2 Automation des Electra FL-3015s..... | 40 |
| 7. Zusammenhang zwischen den maschinenbaulichen und organisatorischen Schnittstellen | 42 |
| 7.1 Materialfluss..... | 42 |
| 7.2 Transport..... | 44 |
| 7.3 Handhabung..... | 46 |
| 8. Tabellenverzeichnis..... | 47 |
| 9. Abbildungsverzeichnis..... | 48 |
| 10. Literaturverzeichnis..... | 49 |

1. Einleitung

Die Erzeugung von Laser ist eine der größten Erfindungen in der Geschichte der Menschheit. In der dritten wissenschaftlichen und technologischen Revolution des 20. Jahrhunderts waren Laser mit großen technologischen Errungenschaften wie Nukleartechnologie, Weltraumtechnologie, Halbleitertechnologie und Computertechnologie vergleichbar.

Das Prinzip wurde 1916 von Einstein und 1960 von dem amerikanischen Wissenschaftler Mei Man (T. H. Maiman) entwickelte erfolgreich den weltweit ersten Laser, der die Entwicklung des Lasers von der Theorie zur Technologie kennzeichnete. [1]

Mit der rasanten Entwicklung von Lasertechnologie und -anwendungen wird Laser seit fast 50 Jahren mit mehreren Disziplinen kombiniert und ist in nahezu allen Bereichen der Industrie, Information, Messung, Medizin, Wirtschaft, wissenschaftlichen Forschung und Militär. Z. B. Laserbearbeitung, Laserschneiden, Glasfaserkommunikation, Speicherung optischer Platten, Laserchirurgie, Laserdruck, Barcode-Technologie, Lidar usw. Gleichzeitig entstehen ständig neue Anwendungen und Technologien.

Die Laserbearbeitung ist eines der vielversprechendsten Gebiete der Laseranwendung. Die Laserbearbeitung besteht darin, den Laser auf das zu verarbeitende Objekt zu bestrahlen und die Wechselwirkung zwischen Laser und Substanz zu nutzen, um die Leistung, Eigenschaften, Form usw. des Materials zu ändern, um den Verarbeitungszweck zu erreichen. [2]

Das Laserschneiden ist die am weitesten verbreitete Laserverarbeitungstechnologie. Derzeit macht das Laserschneiden mehr als 70% der Laserbearbeitung aus. [3]

In diesem auf der Laserschneidtechnologie basierenden Arbeit wird das Konzept zur Lösung von Qualitätssicherungsaspekten in automatisierten Fertigungssystemen erstellt.

1.1 Aufgabenstellung

Zunehmend gewinnt die Automatisierung in mannigfaltiger Form in der Produktionstechnik an Bedeutung, so dass es bei der Auslegung der einzusetzenden Fertigungstechnik eine Vielzahl an technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen zu beachten gilt.

Im Rahmen der Bachelorarbeit sind, gemäß der o. g. Themenstellung, das Qualitätssicherungskonzept zu erstellen, deren Struktur darzustellen sowie dazugehörige maschinenbautechnische und organisatorische Besonderheiten aufzuzeigen und deren Einbindung in den Prozessablauf zu analysieren.

1.2 Lösung der Aufgabestellung

1. Analyse des gegenwärtigen Standes vorhandener technischer Lösungen als Basisvorgänge unter Beachtung der Prozessabläufe, der einsetzbaren Materialien, und der möglichen Anlagentechniken sowie erforderlichen Hilfseinrichtungen und Überwachungsmitteln
2. Dokumentation der vorhandenen Lösungen für die o. g. technischen Einrichtungen in derartigen Prozessen
3. Auslegung und Bewertung von allgemeinen Lösungsvarianten für die automatische Laser- Schneidbearbeitung
4. Beschreibung einer möglichen Lösung an einem selbst gewählten Beispielteil (mit Begründung)
5. Darstellung des Zusammenhangs zwischen den maschinenbaulichen und organisatorischen Schnittstellen Materialfluss (Ausgangsteil, Fertigteil, Werkzeuge), Transport und Handhabung sowie Ver- und Entsorgung der einzelnen Elemente für die Vorzugsvariante gemäß Abschnitt 4

2. Flexible Fertigungssystem (FFS)

FFS ist keine neue Technologie, die man einfach einkauft, anschließt und einschaltet, um dann nach alten Prinzipien weiterzuproduzieren, nur mit dem Ziel, Lohnkosten zu senken. FFS ist eine neue Fertigungsphilosophie, die sich die neuen Möglichkeiten der Informationsverarbeitung und Informationserfassung zunutze macht, um die von den Prozeßindustrien und aus der Großserienfertigung bekannten Prinzipien flußorientierter Fertigung auf Kleinserien- und Einzelteilerfertigung zu übertragen. Wie der Name ‚Flexibles Fertigungssystem‘ sagt, hat sie zwei Elemente, nämlich „Flexibilität“ und „System“. [4]

Flexible Fertigungssysteme sind dazu befähigt, unterschiedliche Werkstücke aus einer bestimmten Sparte nacheinander zu bearbeiten, ohne dass es zu zeitintensiven Umrüstaktivitäten kommt. In der Regel arbeiten mehrere Maschinen innerhalb eines flexiblen Fertigungssystems zusammen. Im Verlauf des Produktionsprozesses wird das Produkt über den Produktionsweg von einer Maschine zur nächsten weitergegeben. Dieses automatisierte Transportsystem ist der Strang, der die aneinander gekoppelten Maschinen verbindet. Ein Computer sorgt dafür, dass die Maschinen die vorgesehenen Arbeitsschritte durchführen. [5]

Das Besondere an flexiblen Fertigungssystemen ist, dass sie ohne großen Zeitaufwand für die Umrüstung von Werkzeugen zu verursachen, unterschiedliche Produkte nacheinander fertigen können. Dazu greifen sie auf vorhandene Werkzeuge zu. Diese Werkzeuge befinden sich in der Regel direkt lokal an der Maschine. Die Werkzeuge sind voreingestellt, so dass sie innerhalb kurzer Zeit einsatzbereit montiert werden können. Der Werkzeugwechsel läuft in vielen Fällen vollautomatisch ab, doch es gibt auch flexible Fertigungssysteme, die teilweise manuelle Unterstützung benötigen. In jedem Fall ist die erforderliche Umrüstung, auch wenn sie manuell erfolgt, in kurzer Zeit erledigt. [5]

2.1 Entwicklungstendenzen in der Fertigungstechnik

Unter den heutigen Gegebenheiten ist eine weitere Senkung von unproduktiven Nebenzeiten nicht mehr ausreichend, so dass weitere Rationalisierungsschritte erforderlich sind. Dazu zählen u. a. derzeit vorrangig

- die Verlagerung der Rüstzeiten in die Hauptzeiten
- die Reduzierung der Warte- und Ausfallzeiten
- die Realisierung eines unterbrechungslosen Programmwechsels
- die automatische Werkzeugverwaltung und -zubringung
- die automatische Werkstückzubringung.

Das Hauptziel dieser Maßnahmen sind somit die kürzeren Durchlaufzeiten der Werkstücke, beginnend bei der Einzelfertigung bis hin zu mittleren Losgrößen.

Der Lösungsansatz dafür ist die flexible, rechnergestützte Fertigung (CAM – Computer Aided Manufacturing). [6]

Um dies zu erreichen, sind jedoch Veränderungen der industriellen Rahmenbedingungen Voraussetzung. In diesem neuen Grundkonzept bildet die CNC-Maschine mit automatischer Programmänderung über Rechneranschluss (DNC-Betrieb) die Basiseinheit der flexiblen automatisierten Fertigung.

Die Aufgaben, die das übergeordnete Leit- und Steuerungssystem übernehmen muss, um den Zeitbedarf von Auftragseingang bis zur Auslieferung der Erzeugnisse zu minimieren, sind im Einzelnen:

- Auftragseingangsabwicklung und Verlaufsplanung
- Ermittlung und Überwachung der Liefertermine
- Auftragsplanung, Fertigungsplanung, Materialdisposition
- auftragsbezogene Nachkalkulation
- Einflussnahme auf Entwicklungs- und Konstruktionsmaßnahmen
- Realisierung eines Fabrikleitsystems
- Steuerung der Fertigungseinrichtungen und
- übergeordnete Steuerung/Überwachung von Fertigung und Montage.

Das in diesem Zusammenhang angestrebte Ziel ist die flexible Automation in der

Fertigung. Dabei gilt es, folgende Aspekte zu beachten:

Flexibilität unter Produktionsbedingungen ist die Möglichkeit, unterschiedliche Fertigungsaufgaben mit minimalem Umrüstaufwand an den Produktionseinrichtungen zu verwirklichen. [6]

Bei der Fertigungsautomatisierung wird ein permanenter, automatischer Informationsfluss zu und von allen integrierten Stationen realisiert.

Automatisierung im Fertigungsbereich ist die frei programmierbare (flexible) Verkettung numerisch gesteuerter Einzelmaschinen mit Hilfe elektronischer Steuerungen, Sensoren, Rechnern und Stellgliedern, wodurch die Fertigung von unterschiedlichen Werkstücken in beliebiger Reihenfolge und in wechselnden Losgrößen wirtschaftlich erfolgen kann. [6]

Anhand dieser allgemeinen Zielstellung lässt sich ableiten, dass ein flexibles Fertigungssystem (FFS) nur begrenzt flexibel sein kann, und zwar

- für ein begrenztes Teilesortiment
- für eine begrenzte Stückzahl pro definierte Zeiteinheit
- für einen begrenzten Umfang der durchzuführenden Arbeitsinhalte sowie
- für einen begrenzten Toleranzbereich.

Diese Grenzen müssen bereits bei der Planung klar abgesteckt werden, was jedoch ein genau festgelegtes Anforderungsprofil seitens des Anwenders voraussetzt. [6]

Bevor an die Lösung des flexiblen automatisierten Fertigungsvorhabens gegangen wird, sind Ziel und Zweck der flexiblen Automation zu klären. Aus betrieblicher Sicht sind somit folgende Vorgaben zu treffen:

- organisatorische Zielvorgaben (z. B. schnelles Reagieren auf Veränderung der Auftragslage)
- technische Zielvorgaben (z. B. Aufstellen der Anlage in einem vorgegebenen, räumlich begrenzten Hallenbereich)
- kostenbezogene Zielvorgaben (z. B. Verkürzung der Durchlaufzeiten).

2.2 Voraussetzungen und Charakteristika des Einsatzes von FFS

2.2.1 Voraussetzungen für den Einsatz von FFS

Grundvoraussetzung für die Einführung eines FFS ist die systematische Analyse der Schwachstellen der Fertigung. Dazu zählen im Einzelnen:

- Sicherstellung, dass die bestehenden Probleme mit einem FFS beseitigt werden können
- Überprüfung, ob eine erforderliche Grundlogistik vorhanden ist, da in den meisten Fällen FFS keine autarken Fertigungsbereiche darstellen
- Erfassung, welche technischen und/oder organisatorischen Maßnahmen in den angrenzenden Bereichen getroffen werden müssen, um eine reibungslose Versorgung des FFS (z. B. mit Material, Fertigungshilfsmitteln, Informationen) zu gewährleisten.

Bei der Einführung flexibler Produktionstechnik ist das Hauptaugenmerk auf die Einflussgrößen

- Motivation (z. B. Kapazitätserweiterung/-ersatz)
- Vorgaben (z. B. Prioritätensetzung durch die Geschäftsleitung)
- unternehmensspezifische Gegebenheiten (z. B. Grundlogistik, Schwachstellenanalyse)

zu richten. [6]

2.2.2 Einsatzcharakteristika für FFS

Flexible Fertigungssysteme sind unter heutigen Gesichtspunkten nach dem Maschinenkonzept systematisiert. Es existieren das Einzelmaschinenkonzept (NC-Maschine — NCM, Bearbeitungszentrum — BZ, Flexible Fertigungszelle — FFZ) sowie das Mehrmaschinenkonzept (Flexible Taktstraße — FTS, Flexibles Fertigungssystem – FFS). [6]

Die wichtigsten charakteristischen Kennzeichen flexibler Maschinenkonzepte sind dabei bezüglich der Automatisierung

- die Prozessdurchführung
- der Werkstückwechsel
- der Werkstücktransport
- der Werkzeugwechsel
- die Prozessüberwachung.

Zu beachtende Kenngrößen im Hinblick auf die Bearbeitung sind

- ein wahlfreier Materialfluss
- die Simultanbearbeitung
- sich ersetzend/ergänzende Stationen
- eine Mehrverfahrenbearbeitung

die mittels einer übergeordneten Steuerung realisiert werden.

Somit gilt:

Flexible Fertigungssysteme (FFS) stellen Mehrmaschinensysteme mit übergeordneter Steuerung in Form eines Leitrechners dar.

Das Hauptmerkmal eines FFS besteht darin, dass unterschiedliche Werkstücke auf verschiedenen Fertigungseinrichtungen simultan bearbeitet werden können.

Die Bearbeitungsstationen, die von den einzelnen Werkstücken wahlfrei angelaufen werden, können dabei sowohl ersetzend oder auch ergänzend sein. Weiterhin kann ein großes Variantenspektrum im Teilemix bearbeitet werden. [6]

Rüstvorgänge werden parallel zur Hauptzeit durchgeführt. Werkzeug- und Werkstückver- und -entsorgung erfolgen automatisch.

Alle diese prozessorientierten Vorgänge innerhalb des FFS werden durch den Leitreechner gesteuert und koordiniert.

Das in Abb. 1 dargestellte Beispiel eines FFS ist für die Bearbeitung prismatischer Teile ausgelegt und besteht aus acht Bearbeitungszentren, die rechts und links des Transportsystems angeordnet sind. Die Be- und Entladung jeder dieser integrierten Fertigungseinrichtungen erfolgt automatisch durch ein Handhabegerät (jeweils vier Spannvorrichtungen mit je zwei Werkstücken, d. h. acht identische Teile. Im Anschluss an die Bearbeitung wird eine der vier Paletten zur Messmaschine transportiert und in dieser kontrolliert. Bei positivem Messergebnis erfolgt die Freigabe aller acht Teile für deren Montage. Das automatische Umspannen in die zweite Spannlage geschieht in der so genannten Schraub- und Umsetzstation. [6]

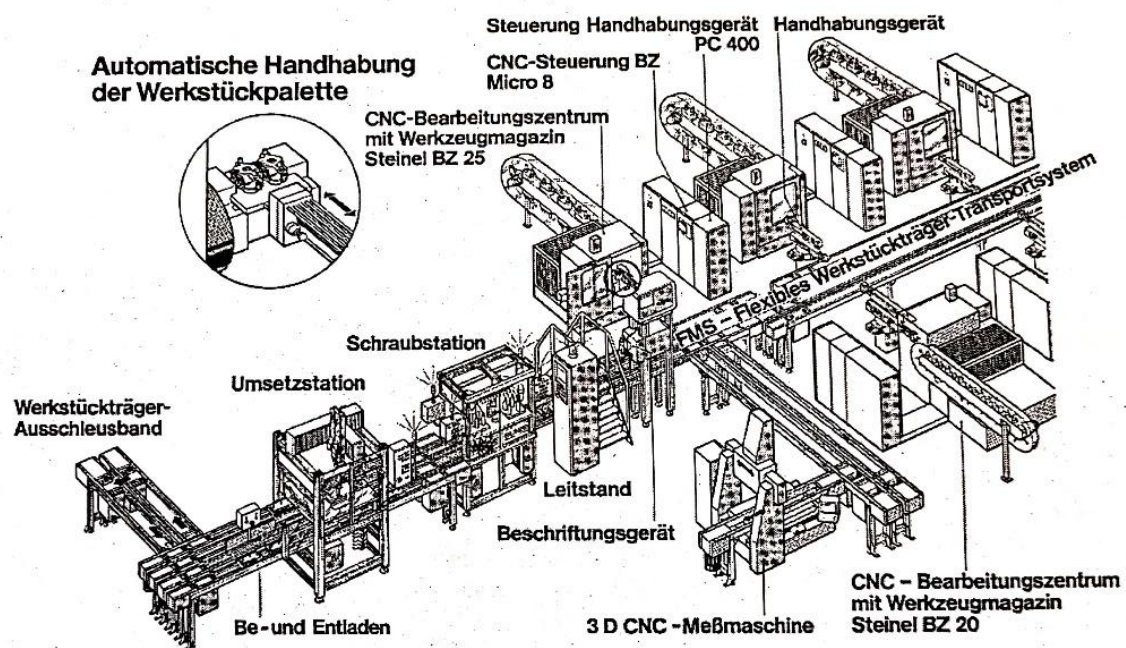


Abb.1 Elemente und Grundaufbau eines FFS (BOSCH Industrieausrüstung, Anwender BOSCH Stuttgart) [6]

Eilaufträge können unter Berücksichtigung vorgegebener Bearbeitungsprioritäten sehr kurzfristig in den aktuellen Auftragspool eingelastet werden. Dieser Eigenschaft ist es zu verdanken, dass ein FFS heute dem hohen Flexibilitätsbedarf gerecht werden kann. [6]

Die Berücksichtigung dieser Aspekte muss im Endeffekt zur organisatorischen Gestaltung eines Verbundbetriebes mit hohem Geschlossenheitsgrad führen (Tab.1).

Die Möglichkeit einer weit gehenden Komplettbearbeitung im FFS charakterisiert den Geschlossenheitsgrad des Systems und kann durch die Kriterien

- Anzahl der Ein-/ Ausschleusungen eines Teiles,
- Anzahl der Fertigungsvorgänge innerhalb des Systems und/ oder
- Summe der Fertigungszeiten innerhalb des Systems.

ausgedrückt werden. [6]

Der Geschlossenheitsgrad lässt sich unter Berücksichtigung der genannten drei Bezugsgrößen wie folgt definieren:

Der Geschlossenheitsgrad (η) bezogen auf die Anzahl der Ein-/ Ausschleusungen eines Teiles (η_{GEA}) lässt sich aus dem Verhältnis von je einem Ein- und Ausschleusungsvorgang (2) zur notwendigen Anzahl der Systemein-/ -ausgänge eines Teiles ermitteln und liegt in der Größenordnung von 0,3 bis 1,0 (30% bis 100%).

Der Geschlossenheitsgrad (η) bezogen auf die Anzahl der Fertigungsvorgänge innerhalb des Systems (η_{GFV}) ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl der Fertigungsvorgänge innerhalb des Systems zur Gesamtzahl der Fertigungsvorgänge eines Teiles und beträgt zwischen 0,4 und 0,75 (40% bis 75%).

Der Geschlossenheitsgrad (η) bezogen auf die Anzahl der Fertigungszeiten innerhalb des Systems (η_{GTF}) errechnet sich aus dem Verhältnis der Summe der Fertigungsvorgangszeiten im System zur gesamten erforderlichen Fertigungszeit pro Stück und liegt allgemein im Bereich von 0,45 bis 0,6 (45% bis 60%).

Tab. 1: Kenngrößen, resultierend aus Erfahrungswerten bereits realisierter FFS (nach VDI) [6]

| | Kenngröße | Bewertungsmerkmal | Kennwert |
|---|-----------------------------------|---|-----------------|
| 1 | Teilfamilien(TF) in Stück | Durchschnittliche Anzahl an TF | 12 |
| | | Durchschnittliche Anzahl an Werkstücken je TF | 100 |
| | | Durchschnittliche Anzahl neuer Werkstück pro Jahr | 45 |
| 2 | Losgröße in Stück | Minimal Losgröße | 1 |
| | | Maximal Losgröße | 100 |
| | | Durchschnittliche Losgröße | 26 |
| | | Wiederholhäufigkeit der Lose/ Jahr | 7 |
| 3 | Bearbeitungszeiten in min | Minimal Bearbeitungszeit | 5 |
| | | Maximal Bearbeitungszeit | 720 |
| | | Durchschnittliche Bearbeitungszeit | 115 |
| 4 | Anzahl der Ausspannungen in Stück | Minimal | 1 |
| | | Maximal | 7 |
| | | Durchschnittliche | 2 ... 3 |
| 5 | Stückkosten in Euro | Durchschnittliche MK+MGK (ca. 35% der HK) | 513,00 |
| | | Durchschnittliche FK+FGK (ca. 65% der HK) | 977,00 |
| | | Durchschnittliche Herstellkosten pro Stück | 1490,00 |
| 6 | Fertigungsart in % | Einzelfertigung | 13 |
| | | Wiederholte Einzelfertigung | 8 |
| | | Kleinserien fertigung (< 20 Stück) | 57 |
| | | Kleinserien fertigung (> 20 Stück) | 21 |
| | | Mittel-/ Großserienfertigung (> 200 Stück) | 1 |

2.3 Planungsgrundlagen für FFS

Bei der Planung, Inbetriebnahme und dem Betrieb sind für die Aspekte

- Systemkomponenten
- Informationssystem
- notwendiges Personal

eine Reihe von grundsätzlichen Merkmalen zu beachten.

Im Einzelnen sind dies:

- Grundsätze bezüglich des FFS-Merkmals Systemkomponenten
 - Aus den Unternehmenszielen ist das langfristige Produktionskonzept abzuleiten, das durch den Planer auf der Grundlage einer erstellten Zielhierarchie erarbeitet werden kann.
 - Die FFS-Planung erfolgt nach einer sukzessiven systematischen Vorgehensweise.
 - Das Pflichtenheft ist die Grundvoraussetzung für die Planung. Es ist für jede einzelne Systemkomponente zu erstellen.
 - Zeitparallel zur Planung der Systemkomponenten muss die Planung der Systemsoftware erfolgen. [6]
- Grundsätze bezüglich des FFS-Merkmals Informationssystem
 - Die inhaltliche Erstellung des Informationssystems erfolgt durch sich ständig einengende Optimierungsschleifen, wobei eine Abstimmung der Bestandteile Datenmodelle, Software, Hardware, Vernetzung und innere Abläufe erforderlich ist.
 - Es ist eine schrittweise Vernetzung der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems anzustreben, wobei die genaue Terminierung mit dem gesamten Terminplan des FFS konform gehen muss und eine frühzeitige Schulung des Bedienpersonals auf den eingesetzten Systemen berücksichtigt. [6]

- Grundsätze bezüglich des FFS-Merkmals Personal
 - Das System muss trotz steigender Komplexität der Aufgaben mit weiterqualifizierten Fachkräften betrieben werden können.
 - Jedes Mitglied des Systempersonals muss die Eigenschaften Verantwortungsbewusstseins und Teamfähigkeit besitzen. [6]
- Grundsätze bezüglich des FFS-Merkmals Organisatorische Einbindung
 - Die enge Verzahnung des FFS mit den konventionellen Bereichen des Produktionsumfeldes erfordert eine hohe Durchgängigkeit des PPS-Systems.
 - Qualitätssicherungsaspekte sind planungsseitig und ablaufbedingt bei der Gestaltung des Maschinenaufstellungsplanes und des fertigungstechnischen Materialflusses technisch-technologisch und informationstechnisch zu berücksichtigen.
 - Für die NC-Programme ist eine zentrale Verwaltung sowie eine hauptzeitparallele Abrufbarkeit vorzusehen.
 - Lager bzw. Puffer sind für Fertigungsmaterial und -hilfsmittel so einzurichten, dass eine Schichtüberdeckende Menge verfügbar ist, wobei die Verwaltung dieser Einrichtungen und Materialien über den Leitrechner erfolgen sollte. [6]
- Grundsätze bezüglich des FFS-Merkmals Wirtschaftlichkeit
 - Die Einbindung der veränderten Fertigungsstrukturen in die vorhandenen betrieblichen Bewertungsmechanismen ist unabdingbar für einen fundierten Wirtschaftlichkeitsnachweis.
 - Bei der Feinplanung sind Simulationsprogramme für die technische Bewertung von flexiblen Fertigungskonzepten einzusetzen.
 - Die Einbindung der peripheren Systemkomponenten in die Kostenkalkulation der Stückkosten ist notwendig, da die Wertschöpfung auf der Grundlage der Bearbeitungszeit nicht für die reale Wertschöpfung am Produkt genügt. [6]

2.4 Aufbau des FFS

Das FFS bildet unter betrieblichen Bedingungen eine technische und organisatorische Einheit aus verschiedenen Einzelkomponenten (Abb. 2), wobei periphere Komponenten im Gegensatz zu konventionellen Maschinen fest integrierte Bestandteile des Gesamtsystems sind, sodass das FFS als komplexe Einheit geplant werden muss. [6]

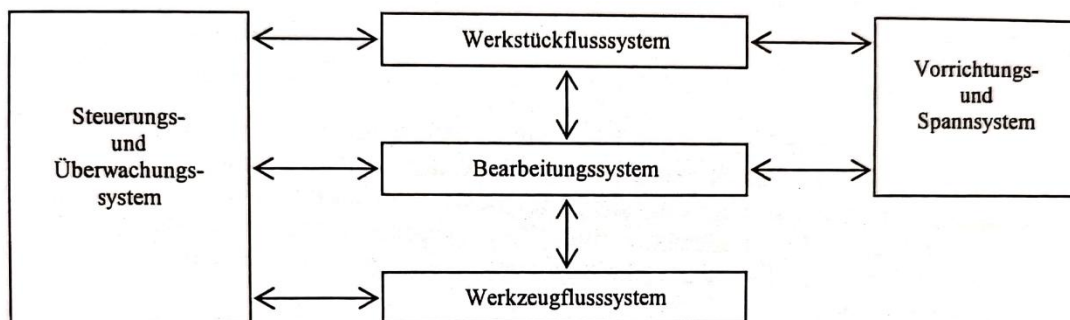


Abb. 2: Elemente eines FFS und deren Wechselwirkungen [6]

Das Grundschaema eines derartigen Fertigungskonzeptes ist Abbildung 3 zu entnehmen.

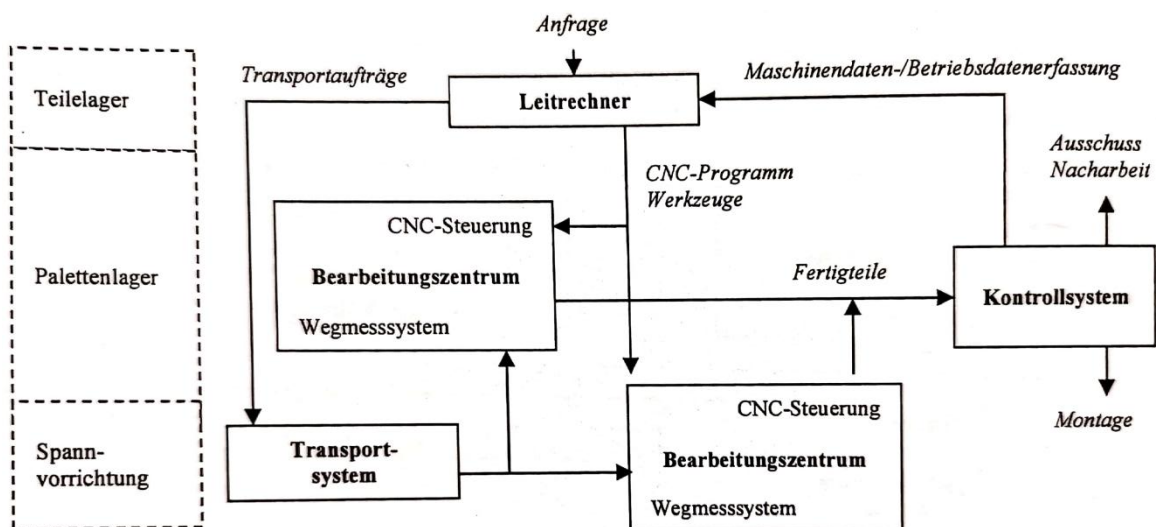


Abb. 3: Struktur eines FFS [6]

2.5 allgemeine Qualitätsaspekte in FFS

Stabile Bearbeitungsprozesse sind die Grundlage für eine gute Qualität. Die Qualitätssicherung in der Fertigung beinhaltet damit die kontinuierliche Erfassung, Analyse und Bewertung relevanter Daten bezogen auf

- das Produkt
- die fertigungs- und systeminternen Zusatzeinrichtungen sowie
- den Gesamtprozess. [6]

3. Laser- Schneidtechnik

Das Laserschneiden basiert auf dem Prinzip des Lasers, der Lasertechnologie und der Wechselwirkung zwischen Laser und Material. In diesem Kapitel werden daher zunächst das Prinzip und die Eigenschaften der Lasererzeugung erläutert und anschließend der Wechselwirkungsprozess von Laser und Material analysiert. Auf dieser Grundlage wird das Prinzip des Laserschneidens erläutert. Und die Vorteile des Laserschneidens werden durch Vergleich erhalten. Schließlich wird der Sicherheitsschutz während des Einsatzes des Lasers eingeführt. [2]

3.1 Lasererzeugung und Eigenschaften

Laser ist die Abkürzung für "Light amplification by stimulated emission of radiation", was bedeutet, dass der Laser durch atomstimulierte Strahlung und Resonanzverstärkung gebildet wird.

Atome haben Energieniveaus mit diskontinuierlicher Energieverteilung. Unter normalen Bedingungen befinden sich Atome auf dem niedrigsten Energieniveau, dem so genannten Grundzustand, der ein stabiler Zustand ist. Zu diesem Zeitpunkt bewegt sich das Elektron in der dem Kern am nächsten gelegenen Umlaufbahn. Bei externem Energieeintrag absorbiert das Elektron Energie und wird auf ein höheres Energieniveau angeregt, das als angeregter Zustand oder Hochenergiezustand bezeichnet wird. Die auf ein hohes Energieniveau angeregten Atome sind instabil und es besteht die Tendenz, zu einem niedrigeren Energieniveau zurückzukehren. Wenn ein Atom von einem hohen Energieniveau zu einem niedrigen Energieniveau übergeht, wird seine Energiedifferenz in Form von Photonen abgestrahlt, dh spontaner Strahlung, auch als Fluoreszenz bekannt. Wenn der Atomübergang durch fremde Photonen induziert wird, emittiert das Atom ein Photon mit genau der gleichen Frequenz, Phase, Ausbreitungsrichtung und Polarisationsrichtung wie das einfallende Photon. Dies ist stimulierte Strahlung. Unter der Anregung externer Energie ist die Anzahl der Atome im hohen Energieniveau viel größer als die Anzahl der niedrigen Energieniveaus, was als Teilchenzahlinversion bezeichnet wird. Zu diesem Zeitpunkt

wird unter der Stimulation externer Photonen eine stimulierte Strahlung erzeugt, und diese Photonen werden durch die Wirkung des Resonanzhohlraums verstärkt, um einen Laser zu bilden (Abb.4). [2]

Übliche Lichtquellen sind inkohärente Lichtquellen. Sie emittieren hauptsächlich spontane Strahlung, und das von jedem Lichtemissionspunkt emittierte Licht ist in Frequenz, Richtung, Phase und Polarisation zufällig. Der wichtigste Unterschied zwischen Laser und gewöhnlicher Lichtquelle besteht darin, dass der Laser eine kohärente Lichtquelle ist. Er weist eine hohe Intensität, eine hohe Richtwirkung, eine hohe Monochromatizität und eine hohe Kohärenz auf. Genau diese vier hervorragenden Eigenschaften bestimmen den Anwendungsbereich und das Feld des Lasers. [2]

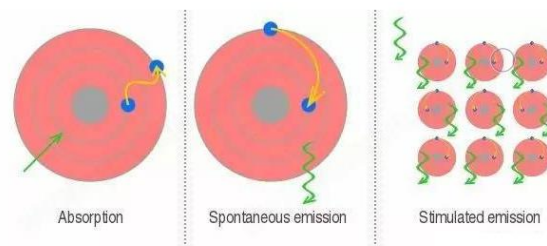


Abb.4 Lasererzeugung [7]

3.2 Wechselwirkung von Laser und Materie

Das Zusammenspiel von Laser und Material ist die physikalische Grundlage der Laserbearbeitung. Nur durch Untersuchung seines Mechanismus kann das Anwendungsfeld des Lasers kontinuierlich geklärt und konkretisiert werden. Dies ist ein Prozess, der viele mikroskopische Prozesse und makroskopische Phänomene umfasst.

Die Wechselwirkung zwischen dem Laser und dem Material zielt hauptsächlich auf die Energieänderung in diesem Prozess ab, d.h. auf den Mechanismus des Lasers, der Energie auf die Substanz überträgt. Wenn der Laser die Oberfläche des Materials bestrahlt, wird die elektromagnetische Energie in die Anregungsenergie von Elektronen umgewandelt und dann in andere Energieformen wie Wärmeenergie,

elektrische Energie, chemische Energie, mechanische Energie usw. umgewandelt. Während dieses Prozesses treten unterschiedliche Temperaturänderungen und Änderungen des physikalischen Zustands auf, wie z. B. Erhitzen, Schmelzen, Vergasen, Plasma usw. Dies hängt hauptsächlich mit der Laserwellenlänge, der Energiedichte, der Einwirkungszeit und den Materialeigenschaften (Absorptionsrate, Wärme) zusammen Leitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Schmelzsiedepunkt usw.). [2]

In der Wechselwirkung zwischen dem Laser und dem Material können wir das Material grob in zwei Typen unterteilen: Metall und Nichtmetall. Der Hauptunterschied zwischen ihnen ist der Absorptionsmechanismus und die Absorptionsrate des Lasers (Tab.2).

Tabelle 2: Verschiedene Mechanismen von Metall und Nichtmetall für Laser [2]

| Metall | Nichtmetall |
|-------------------|--------------------|
| starke Absorption | starke Absorption |
| hohe Reflexion | niedrige Reflexion |

Ein weiterer wichtiger Prozess bei der Wechselwirkung zwischen Laser und Material ist die Erzeugung von Plasma. Der Laser bestrahlt die Oberfläche des Materials. Die dünne Schicht der Oberfläche absorbiert in kurzer Zeit viel Energie. Die Temperatur steigt schnell an und wird gasförmig. Zu diesem Zeitpunkt ist auch die Wärme der Oberflächenschicht Es diffundiert nach innen, um eine Wärmeeinflussschicht zu bilden, aber die Wärmeeinflussschicht absorbiert Laserlicht viel weniger als die Oberflächenschicht, wodurch der Dampf der Oberflächenschicht weiter ansteigt und ein Plasma bildet. Die Rolle des Plasmas nach seiner Bildung ist abhängig von der Leistungsdichte des Lasers unterschiedlich. Der Absorptionsprozess des Plasmagases zum Laser und seine Wechselwirkung mit dem Laser sind komplizierter. [2]

3.3 Grundprinzipien des Laserschneidens

Beim Laserschneiden wird das Material des Werkstücks fokussiert, indem der Laserstrahl mit hoher Leistungsdichte auf die Oberfläche des Werkstücks fokussiert wird. Es erfolgt ein Schmelzen oder eine Vergasung, und gleichzeitig wird der koaxiale Hochdruckluftstrom verwendet, um das geschmolzene oder vergaste Material abzublasen, um den Zweck der Schneidverarbeitung zu erreichen.

Die Gesamtanordnung des Laserschneidsystems ist in Abb. 5 hauptsächlich vom Laser (mit Verschluss- Steuerungssystem, Strahlübertragungssystem, Fokussieroptik) Lichtbündel und Relativbewegungsvorrichtung für das Strahlwerkstück dargestellt. Der Verschluss ist normalerweise ein einziehbarer Spiegel, der den Strahlengang blockiert und den Laserstrahl zum Strahlabfall lenkt. Wenn ein Lichtstrahl benötigt wird, bewegt die elektromagnetische Spule oder der pneumatische Kolben den Verschluss aus dem Strahlengang heraus, und der Laserstrahl tritt durch das Lichtleitersystem und wird von der Fokussierlinse (Linse oder Reflektor) fokussiert, bevor er auf die Oberfläche des Werkstücks einwirkt. [8]

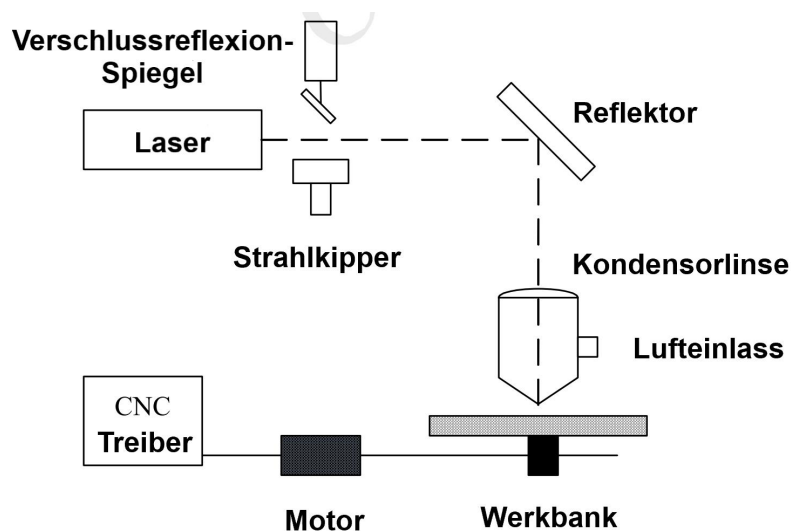


Abb. 5 Laserschneiden allgemeine Anordnung [8]

Der Laser wird nach dem Fokussieren auf das Material bestrahlt, und die Lichtenergie wird in Wärmeenergie umgewandelt, wodurch die Temperatur des zu schneidenden Materials schnell ansteigt, um eine Temperatur des Siedepunkts oder darüber zu erreichen, das Material schmilzt oder verdampft. Wenn es verdampft wird, entweicht es direkt und das geschmolzene Material Das Material wird durch den Luftstrom koaxial zum Strahl vom Boden des Einschnitts weggeblasen. Gleichzeitig spielt das Gas auch eine Rolle bei der Kühlung der Schnittfläche und der Verringerung der Hitzeschattenfläche. Wenn das Gas Sauerstoff oder ein anderes aktives Gas ist und eine exotherme Reaktion mit dem zu schneidenden Material erzeugt, bietet diese Reaktion zusätzlich zur Laserenergie einen weiteren Schneidplatz. Die zusätzliche Wärmequelle, die benötigt wird, um den Schneidprozess zu beschleunigen. Der Luftstrom stellt auch sicher, dass die Fokussierlinse nicht verunreinigt ist. Mit der Relativbewegung des Lasers und des zu schneidenden Materials wird ein Schlitz in dem Schneidmaterial gebildet, um den Zweck des Schneidens zu erreichen, wie in Abb. 6 gezeigt. [2]

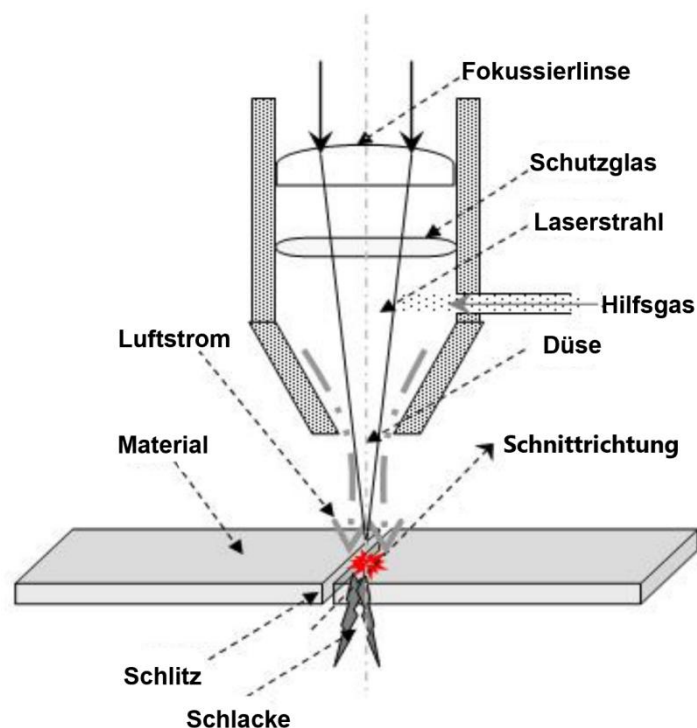


Abb.6 Prinzip des Laserschneides [2]

Darüber hinaus kann durch Laserschneiden der Fokuspunkt auf der Oberfläche oder der Mitte des Materials liegen. Aufgrund der Konzentration von thermischer und mechanischer Beanspruchung im Teil der Linie reißt das Material entlang der Linie oder des Schnitts, solange eine geringe äußere Kraft ausgeübt wird. Gleichzeitig wird das Verfahren des schnellen Einfrierens (koaxiale Einspritzung von Niedertemperaturgas) oder des Erhitzens (Doppelstrahlschneiden) verwendet, um die thermische Beanspruchung des Schneidteils zu ändern, und das Material wird entlang der Schneidlinie von selbst gespalten, so dass das Material und seine Schnittgeschwindigkeit kontrolliert geschnitten werden können. Schnelle Anforderungen mit geringem Stromverbrauch, dies schneidet einen Schnitt auf der Oberfläche des Materials, dh das Halbschnittverfahren, auch als Laser-Ritzverfahren bekannt, das üblicherweise zum Trennen zerbrechlicher Objekte wie Siliziumwafer, Keramik, Saphirsubstrate usw. verwendet wird, wenn der Fokus liegt. Die Position befindet sich in der Mitte des Materials, was zu inneren Spannungsänderungen und keinen Spuren auf der Oberfläche führt, die sogenannte "unsichtbare Schneidmethode".

Zusammenfassend kann das Laserschneiden nach dem Schneidprinzip in Vergasungsschneiden, Schmelzschneiden, sauerstoffunterstütztes Schmelzschneiden und unterteilt werden. [2]

3.4 Vor- und Nachteile des Laserschneidens

3.4.1 Vergleich zwischen Laserschneiden und traditionellem Schneiden

Im Vergleich zu anderen thermischen Schneidverfahren: wie dem Schneiden von sauerstoffverbrennbaren Gasen (wie Acetylen) und dem Plasmaschneiden, auch als thermisches Schneidverfahren, können andere Verfahren Energie nicht auf einem sehr kleinen Bereich wie einem Laserstrahl konzentrieren, was zu einem breiten Schnitt und Wärme führt. Große und offensichtliche thermische Verformung des Werkstücks. Darüber hinaus können Laser Nichtmetalle schneiden, andere thermische Schneidmethoden jedoch nicht. [2]

Im Vergleich zur mechanischen Bearbeitung: Mechanisches Stanzen, Scheren, Sägen und andere Bearbeitungen erfordern ein starres Spannen des Werkstücks, was zu Verformungen, Grat und Verschleiß der Klinge beim Schneiden führt. Der Schnitt ist breiter, die Materialausnutzungsrate geringer und für den Bediener sicher. Die Bedrohung ist größer und es gibt ernsthafte Lärm- und Staubverschmutzung. [2]

Im Vergleich zur elektrischen Bearbeitung: Es gibt im Allgemeinen zwei Methoden der elektrischen Entladungsbearbeitung und der elektrochemischen Bearbeitung, bei denen die Auswirkungen elektrischer Korrosion und Auflösung genutzt werden. Sie werden hauptsächlich für die Feinbearbeitung von harten Materialien verwendet. Die Rauheit des Schnitts ist besser, aber die Geschwindigkeit ist mehrere Größenordnungen langsamer als beim Laserschneiden.

Im Vergleich zum Wasserschneiden: Druckwasser auf 2700 bis 5500 kg / cm² durch Bildung eines Hochdruckwasserstroms aus einer Saphirdüse mit kleinem Durchmesser können viele Materialien geschnitten werden, und der Effekt ist nach dem Hinzufügen von Schleifmitteln besser, aber die Verbrauchsmaterialien und Betriebskosten sind hoch. Der Prozess ist komplex und die Präzision gering. [2]

3.4.2 Vor-, und Nachteile des Laserschneidens

Im Vergleich zu anderen Schneidmethoden fasst die folgende Tabelle die Vor-, und Nachteile des Laserschneidens zusammen. (Tab. 3, Tab. 4)

Tabelle 3: Vor-teile des Laserschneidens [2],[8]

| Vorteile | |
|---|---|
| berührungslose Verarbeitung | hohe Verarbeitungspräzision |
| keine Spannungsverformung | breites Einsatzspektrum |
| kein Verschleiß und Verbrauchs-materialien | weniger Prozess, bequemer Betrieb |
| konzentrierte Energie, gute Schnittqualität | schnelle Schnittgeschwindigkeit, kurzer |
| kleine Spaltbreite, hohe | Produktionszyklus |
| Materialausnutzungsrate | keine Umweltschäden |

Tabelle 4: Nachteile des Laserschneidens [2],[8]

| Nachteile |
|--|
| begrenzt durch Laser |
| schneiden von Materialien mit geringer Dicke (allgemein < 10 mm) |
| hoher Ausstattungspreis |

3.5 Qualitätsicherung in der Lasermaterialbearbeitung beim Laser- Schneiden

Derzeit gibt es im In- und Ausland keinen einheitlichen Qualitätsstandard für das Laserschneiden. Beim eigentlichen Laserschneidverfahren werden üblicherweise folgende Eigenschaften verwendet, um die Schnittqualität zu beurteilen: Spaltbreite, Breite der Wärmeeinflusszone, Oberflächenrauheit des Querschnitts, Adhäsionsmenge der am Boden des Schlitzes hängenden Schlacke und Querschnittsstreifen. [9]

- 1) Spaltbreite: Der Schlitz ist ein Schlitz, der in dem geschmolzenen Material gebildet wird, das während des Schneidprozesses der dicken Platte abgeblasen wird, was die Menge an Material darstellt, die während des Schneidvorgangs abgeblasen wird. Die Spaltbreite bezieht sich auf den kürzesten Abstand zwischen den beiden Seiten des Spaltes.
- 2) Breite der Wärmeeinflusszone: Die Wärmeeinflusszone bezieht sich auf den Teil des Bereichs neben dem Schlitz, der aufgrund des Einflusses der auf das Substrat während des Schneidprozesses übertragenen Wärme eine Phasenänderung des Substrats oder eine Änderung der Korngröße erfährt. Die Breite der Wärmeeinflusszone ist auch ein wichtiger Indikator für die Schnittqualität.

- 3) Oberflächenrauheit des Querschnitts: Es gibt viele Parameter, die die Oberflächenrauheit im Querschnitt darstellen. Für den Laserschnittquerschnitt wird hauptsächlich die arithmetische mittlere Abweichung R_a des Profils verwendet. Dicke Platten werden normalerweise im Querschnitt $1/2$ vom oberen Einschnitt entfernt gemessen. [9]
- 4) Adhäsionsmenge der am Boden des Schlitzes hängenden Schlacke: Die Schlacke wird durch die Schmelze gebildet, die im Schlitz nicht vollständig ausgeblasen und dann wieder verfestigt und am Boden des Schlitzes haftet. Die Bildung von Schlacke hängt hauptsächlich von den Fließeigenschaften der Schmelze im Schlitz ab. Eine große Oberflächenspannung und eine viskose Schmelze sind schwieriger aus dem Schlitz herauszublasen, was zu einer leichteren Bildung von Schlacke führt.
- 5) Querschnittsstreifen: Schneidstreifen sind ein wesentliches Merkmal des Laserschneidens. Unabhängig von der Art des Prozesses hat das Laserschneiden Schneidstreifen. Da die Schnittfrontreaktion zu kompliziert ist und die Querwirkungen von Wärme, Kraft, Flüssigkeit, Aerodynamik und anderen Aspekten umfasst, haben die einheimischen Wissenschaftler keinen Konsens über die Gründe für das Auftreten von Querschnittsstreifen erzielt. Querschnittsstreifen sind schwer direkt zu quantifizieren. Im Allgemeinen ist die Schnittqualität umso geringer, je kleiner die Streifen sind. [9]

4. Die Lösung der technischen Einrichtungen

Es gibt viele Formen des Laserschneidens. In diesem Kapitel werden hauptsächlich drei Laserschneidmethoden aufgelistet und zusammengefasst. Sie sind CO₂-Laserschneiden, Unterwasserlaserschneiden und Faserlaserschneiden.

4.1 CO₂ Laser- Schneiden

4.1.1 Definition

CO₂-Laser sind leistungsstarke Strahlquellen und zu einem wichtigen Werkzeug auf dem Gebiet der Materialbearbeitung geworden. Das Funktionsprinzip beruht auf einem Gemisch aus Kohlendioxid und Gas, welches durch elektrische Impulse angeregt wird. Diese Gaslaser garantieren eine erstklassige Bearbeitungsqualität und können zum Schneiden, Schweißen und Beschriften eingesetzt werden. Die Wellenlänge des liegt im fernen Infrarot und beträgt 10,6 Mikrometer. Von Metall über Kunststoff, Leder bis hin zu Glas – Der CO₂-Laser ist aufgrund der hohen Strahlqualität und Leistungsdichte immer eine gute Wahl und zu einem der am weitesten verbreiteten Lasertypen geworden.

4.1.2 Wirkprinzip

Beim CO₂-Laserschneiden wird der CO₂-Laserstrahl mithilfe einer Fokussierlinse auf die Oberfläche des Materials fokussiert, um das Material zu schmelzen. Gleichzeitig bläst das mit dem Laserstrahl koaxiale Schneidgas das geschmolzene Material weg und die relative Bewegung des Laserstrahls und des Materials entlang einer bestimmten Flugbahn bilden Sie einen Schnitt mit einer bestimmten Form. (Abb. 7)

Das Schneiden mit Gaslasern erfolgt auf automatisierten Anlagen im Leistungsbereich von 10 Watt bis über 20.000 Watt. Beim Schneidprozess trifft ein gebündelter Laserstrahl auf das Werkstück und erhitzt punktgenau die zu bearbeitende Stelle. Dabei durchbricht der Laserstrahl das Material und bewegt sich entlang der vorgegebenen Schnittkante, wobei der Werkstoff an den Kanten fortlaufend geschmolzen wird. Die dabei entstehenden Schneidrückstände werden

mit Hilfe eines Gasstromes aus der Schnittfuge geblasen. Eine Nachbearbeitung entfällt in den meisten Fällen, da CO₂-Laserschneiden hohe Schneidgüten mit gratfreien Schnittkanten ermöglicht. Dabei gilt: Je höher die verfügbare CO₂-Laserleistung, umso produktiver erfolgt der Schneidprozess. [10]

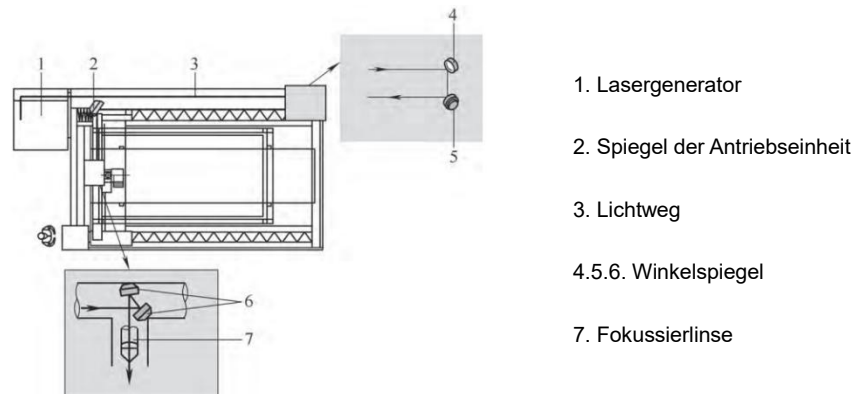


Abb.7 CO₂ Laser [10]

4.1.3 Einsatzgrenzen, -möglichkeiten

CO₂-Laser können Kohlenstoffstahl, Edelstahl, Aluminiumlegierungen und nichtmetallische Materialien schneiden, jedoch nicht Kupfer Material. Für den CO₂-Laser ist Kupfer ein stark reflektierendes Material. Der 10,6- μ m-Frequenzlaser wird fast vollständig reflektiert, ohne absorbiert zu werden, und das reflektierte Licht kehrt zum Laser zurück und verursacht Schaden. [10]

Geeignet zum Schneiden von Platten über 3 mm. Insbesondere wenn die Platte mehr als 6 mm groß ist, sind sowohl die Schnittgeschwindigkeit als auch die Effizienz erheblich besser als bei anderen Schnittmethoden. [10]

4.1.4 Vor- und Nachteile

Tab.5 Vor-, und Nachteile des CO2 Laser- schneidens [10]

| Vorteile | Nachteile |
|--|--|
| Präzises Schneiden von komplexen Formen | großes Volumen des CO2-Lasergenerators |
| Keine Gratbildung an den Schnittkanten | Schnelle optische Wegdämpfung |
| Breiter Schnittbereich | Großer Energieverlust |
| Geringe thermische Beeinflussung | niedrige photoelektrische Umwandlungsrate(nur 10%) |
| Hohe Prozesssicherheit durch Leistungskonstanz | hohe Betriebskosten |

4.2 Unterwasser- Laserschneiden

4.2.1 Definition

Beim Unterwasserlaserschneiden wird Wasser als Hilfsschneidmedium verwendet, das Material in Wasser getaucht und anschließend mit einem Laser das Material direkt durch die Wasserschicht geschnitten. Das Prinzip des Unterwasserlaserschneidens ist im Wesentlichen dasselbe wie das Laserschneiden in Luft. Die spezielle Unterwasserumgebung unterscheidet das Unterwasserlaserschneiden jedoch hinsichtlich des Schneidprozesses und der Schneidausrüstung erheblich vom Laserschneiden in der Luft und beeinflusst den endgültigen Schneideffekt. [2]

4.2.2 Wirkprinzip

Beim Unterwasserlaserschneiden kann Wasser die Funktionen Kühlen, Entfernen von Spänen und Isolieren erfüllen. Erstens wird das Material in Wasser eingetaucht. Der Kühleffekt des Wassers verringert den thermischen Effekt des Lasers am Schneidpunkt und vermeidet die übermäßige Ablation des Materials durch den Laser und den nachteiligen Einfluss der Temperatur auf das Material. Zweitens dient

Wasser als Isolationsschicht, um das Schmelzen des Materials zu verhindern Nach dem Abkühlen haften sie wieder zusammen und können nicht getrennt werden. Die dritte Verwendung von Wasser als Hilfsmedium zum Schneiden kann die Schneidreste schneller entfernen, den Grad der Spanentfernung verbessern und einen guten Schneideffekt erzielen, das vierte Wasser kann spielen Die Wirkung von Luft wird blockiert, so dass einige Materialien, die beim Schneiden von Luft leicht oxidieren, verarbeitet werden können. (Abb. 8) [2]

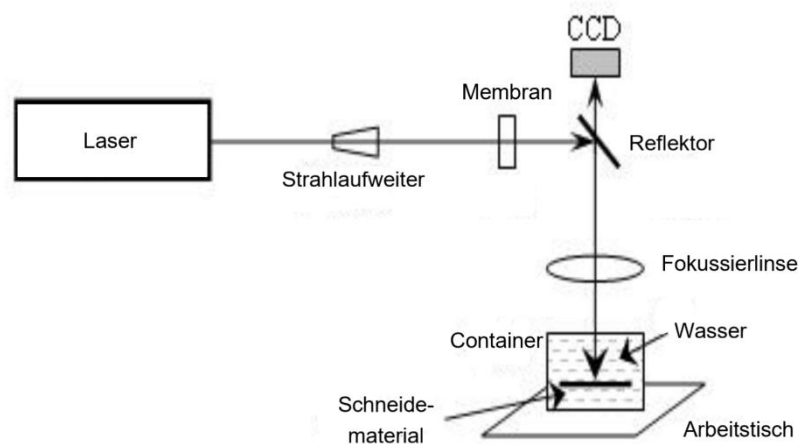


Abb. 8 Wirkprinzip des Unterwasser- Laserschneidens [2]

4.2.3 Einsatzgrenzen, -möglichkeiten

Laser ist das wichtigste Gerät zum Laserschneiden. Die Wahl der Laserwellenlänge ist entscheidend für ein erfolgreiches Laserschneiden. Die Laserwellenlänge, die das Unterwasserlaserschneiden erfolgreich implementieren kann, muss die folgenden zwei Grundanforderungen erfüllen: Erstens ist der Absorptionsverlust von Wasser an der Ausgangsenergie des Lasers gering, um die Energie des Unterwassertransmissionsverlusts des Lasers zu verringern, zweitens die Reife des Lasers Hoch, um sicherzustellen, dass der erforderliche Laser leicht zu kaufen oder zu bauen ist, und um seinen zuverlässigen und stabilen Betrieb zu gewährleisten. Daher wird beim Unterwasserlaserschneiden im Allgemeinen ein YAG-Laser verwendet. [2]

Beim Unterwasserlaserschneiden geht es vor allem darum, den Einfluss von Wasserwellen auf die Laserübertragung zu eliminieren. Während des Schneidens schwankt die freie Flüssigkeitsoberfläche aufgrund von Faktoren wie Tischbeschleunigung und -verzögerung, Vibration der mechanischen Struktur und Luftstrom, wodurch der Laser gebrochen und fokussiert wird. Die Position driftet, was zu einer schlechten Schnittqualität oder Leistungsunfähigkeit führt. Daher müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Auswirkungen von Schwankungen der freien Flüssigkeitsoberfläche zu beseitigen. Zu diesem Zweck werden zwei Lösungen vorgeschlagen: Wie in Abb. 9 gezeigt, ist der Behälter in (a) verbessert. An der Seite des Haupthohlraums des Behälters befindet sich ein hervorstehender Hilfshohlraum. Die Öffnung am Haupthohlraum ist mit Quarzglas verschlossen. Injizieren Sie dann Wasser in den Behälter, bis die Oberkante des Glases nicht mehr gekreuzt ist, so dass die freie Wasseroberfläche nur im Hilfshohlraum vorhanden ist und sich keine freie Wasseroberfläche auf dem Weg des Lasers befindet, wodurch der Effekt der freien Flüssigkeitsoberfläche beseitigt wird. (b) Das Lasereinfallsverfahren wird in der Figur geändert, der Laserschneidkopf wird direkt in Wasser eingetaucht und Wasser wird in den Behälter gegeben, bis die Oberkante der Schutzlinse nicht überschritten wird, so dass der Laser nach dem Passieren der Schutzlinse direkt in das Wasser eintritt und dies nicht tut. Es gibt eine freie Flüssigkeitsoberfläche, wodurch der Einfluss der freien Flüssigkeit auf die Laserübertragung beseitigt wird. Beide Systeme sind mit einem Wasserzirkulationssystem ausgestattet, so dass das Wasser gleichmäßig mit einer stabilen Geschwindigkeit fließt, um die Schneidreste zu entfernen. [2]

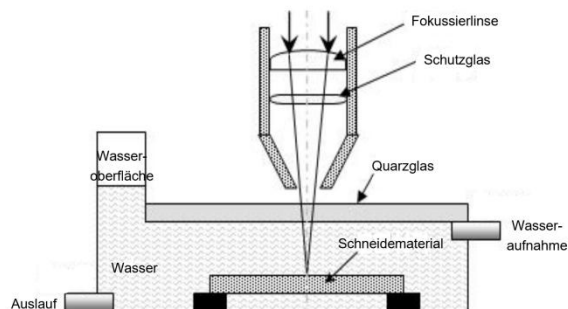


Abb. 9a Lösung 1 [2]

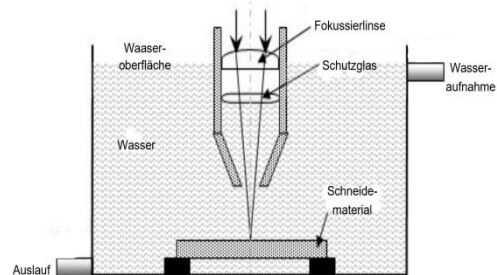


Abb. 9b Lösung 2 [2]

4.2.4 Vor- und Nachteile

Tab.6 Vor-, und Nachteile des Unterwasser- Laserschneidens [2]

| Vorteile | Nachteile |
|---|---|
| kleine Wärmeeinflusszone | Instabilität des Unterwasserlichtbogens |
| besser Entfernung des Schmutzes | geringe Effizienz |
| geeignet für leicht oxidierbare Materialien | hohe Betriebskosten |
| Breiter Schnittbereich | niedrige Schnittgeschwindigkeit |

4.3 Faserlaserschneiden

4.3.1 Definition

Die Faserlaserschneidemaschine ist eine Laserschneidmaschine, die einen Faserlasergenerator als Lichtquelle verwendet.

Es werden mehrere parallel angeordnete Multimode-Pumpdioden als Laserquelle verwendet, um einen Laser mit einer Frequenz von $10,6 \mu\text{m}$ zu erzeugen, der nach Einstellung durch den Resonator in eine einzelne optische Faser eingekoppelt wird, um einen Laser mit höherer Leistung zu bilden. [10]

4.3.2 Wirkprinzip

Der Faserlasergenerator erzeugt Licht und überträgt es durch die Faser auf den Laserkopf, wobei ein Laserstrahl mit hoher Dichte freigesetzt wird. Bilden Sie dann einen Lichtfleck, um die Metallplatte zu bestrahlen, schmelzen oder verdampfen Sie das Schneidmaterial sofort bei hoher Temperatur und verwenden Sie dann das Hochdruckgas, um die geschmolzene Schmelze und den Rückstand abzublasen, um den Schlitz zu erreichen, und dann durch die dreiachsige Verbindung X, Y, Z. Schneiden realisieren.

Der Faserlaser verwendet mehrere Sätze von Multimode-Pumpdioden, die parallel als Laserquelle eingestellt werden sollen. Der erzeugte Laser wird von der Faser übertragen, und der Lichtstrahl wird in der Faser eingeschlossen, um eine "Kurvenausbreitung" zu erreichen, und wird von der äußeren Umgebung nicht beeinflusst. (Abb. 10) [10]

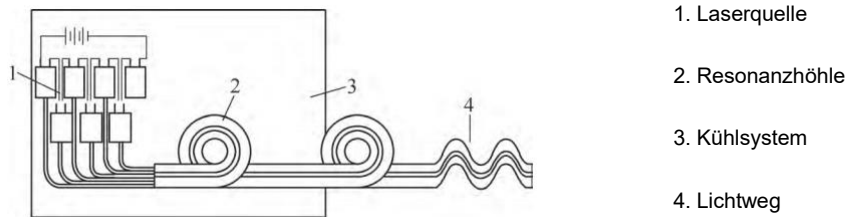


Abb. 10 Faser Laser- Schneiden [10]

4.3.3 Einsatzgrenzen, -möglichkeiten

Faserlaser können Kohlenstoffstahl, Edelstahl, Aluminiumlegierung und Kupfer schneiden, jedoch keine nichtmetallischen Materialien wie Holz, Kunststoff, Leder usw. Materialien mit einer Beschichtung auf der Oberfläche können nicht geschnitten werden, wie gewöhnlicher beschichteter Edelstahl, spezielle Stahlplatten mit Rostschutz usw.

Faserlaser haben Vorteile beim Schneiden dünner Platten, insbesondere die Dicke unter 3 mm ist offensichtlicher.

4.3.4 Vor- und Nachteile

Tab.7 Vor-, und Nachteile des Faser Laser- schneidens [10]

| Vorteile | Nachteile |
|---|--------------------------------------|
| hervorragende Strahlqualität | relativ begrenzt des Schnittbereichs |
| hohe Schnittgeschwindigkeit | Schlechte Querschnittsqualität |
| sehr hohe Stabilität | Lange Perforationszeit |
| hohe photoelektrische Umwandlungsrate (bis 30%) | |
| niedrig Betriebskosten | |

5. Auslegung und Bewertung von Lösungsvarianten




Im vorherigen Kapitel wurden hauptsächlich drei Laserschneidmethoden beschrieben. In diesem Kapitel werden durch die Aspekte, die Hilfsmittel, Schneidgeschwindigkeit, Schneidqualität, Emission, Zusätzlicher Prozess und Wirtschaft, bewertet und die am besten geeignete Laserschneidmethode ausgewählt.

5.1 Hilfsmitteln





Tab. 8 Hilfsmitteln des Lösungsvarianten

| Lösungsvarianten | Hilfsmittel | Verwendungsgrund |
|----------------------------------|----------------------|------------------|
| CO ₂ - Laserschneiden | CO ₂ | Hilfsgas |
| Unterwasser- Laserschneiden | Wasser (+Quartzglas) | Hilfsmedium |
| Faserlaserschneiden | Faser | Lasersendung |




5.2 Schneidgeschwindigkeit

-  : niedrige Schneidgeschwindigkeit
-  : hohe Schneidgeschwindigkeit
-  : sehr hoch Schneidgeschwindigkeit




Tab. 9 Schneidgeschwindigkeit des Lösungsvarianten

| Lösungsvarianten | Schneidgeschwindigkeit | Bewertung |
|----------------------------------|--|--|
| CO ₂ - Laserschneiden | schnell |  |
| Unterwasser- Laserschneiden | langsam |  |
| Faserlaserschneiden | sehr schnell (<3mm); ähnlich wie CO ₂ - Laserschneiden (>6mm) |   |

5.3 Schneidqualität

-  : schlechte Schneidqualität
-  : normale Schneidqualität
-  : gute Schneidqualität

Tab. 10 Schneidqualität des Lösungsvarianten

| Lösungsvarianten | Schneidqualität | Bewertung |
|----------------------------------|--|---|
| CO ₂ - Laserschneiden | gut |  |
| Unterwasser- Laserschneiden | gut aber instabilität |  |
| Faserlaserschneiden | schlechter als CO ₂ - Laserschneiden |  |

5.4 Zusätzlicher Prozess

Der Prozess des Laserschneidens kann in einen Piercingprozess und einen Schneidprozess unterteilt werden. Die Piercing-Effizienz des CO₂-Laserschneidens ist besser als das Unterwasser- Laserschneiden und das Faserlaserschneiden während des Piercingprozesses.

5.5 Wirtschaft

In diesem Abschnitt werden am Beispiel 5 mm Edelstahl geschnitten, um die drei Variantenn zu vergleichen.

Tab. 11 Kostenanalyse des Lösungsvarianten [10]

| Kategorie | | Verbrauch | | |
|------------------------------|---|------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| | | CO2- Laserschneiden | Unterwasser- Laserschneiden | Faser- Laserschneiden |
| Lasergas- verbrauch | He (99.999%) /L·h ⁻¹ | 13 | — | — |
| | N2 (99.999%) /L·h ⁻¹ | 6 | — | — |
| | CO2 (99.999%) /L·h ⁻¹ | 1 | — | — |
| | Druckluft /Nm ³ ·h ⁻¹ | — | 35 | 25 |
| Gas- verbrauch | Schneidgesch- windigkeit/m·min ⁻¹ | 2, 5 | 8, 2 | 0, 9 |
| | N2 (99.99%) /Nm ³ ·h ⁻¹ | 20, 27 | 39, 35 | — |
| Energie- verbrauch | Gesamtleistung der Ausrüstung / kW | 47, 56 | 28, 56 | 18,75 |
| Wartung der Ausrüstung | Kosten für die routinemäßige Wartung der Ausrüstung / Euro · Jahr ⁻¹ | 12, 500 | 8, 750 | 15, 500 |
| Teile tragen | Linsen, Düsen usw. | 675 | 675 | 675 |

5.6 Tabelle für die Kriterien

Tab. 12 Beurteilungskriterien des Lösungsvarianten

| Kategorie | Beurteilungskriterien | Ergebnis |
|-----------------------------|----------------------------------|----------|
| Hilfsmitteln | eine Hilfsmittel | 1 |
| | zwei Hilfsmitteln | 2 |
| Schneid- geschwindigkeit | sehr hoch Schneidgeschwindigkeit | 1 |
| | hohe Schneidgeschwindigkeit | 2 |
| | niedrige Schneidgeschwindigkeit | 3 |
| Schneidqualität | gute Schneidqualität | 1 |
| | normale Schneidqualität | 2 |
| | schlechte Schneidqualität | 3 |
| zusätzlicher Prozess | hohe Perforationseffizienz | 1 |
| | niedrige Perforationseffizienz | 2 |
| Wirtschaft | niedrige Betriebskosten | 1 |
| | normale Betriebskosten | 2 |
| | hohe Betriebskosten | 3 |

Tab. 13 Bewertung des Lösungsvarianten

| Varianten | Hilfs- mitteln | Schneid- geschwindigkeit | Schneid- qualität | zusätzlicher Prozess | Wirt- schaft | Gesamt- punkt |
|-------------------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|------------------|
| CO ₂ - Laserschneiden | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 8 |
| Unterwasser- Laserschneiden | 1/2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 11 / 12 |
| Faser- Laserschneiden | 1 | 1/2 | 2 | 2 | 1 | 7 / 8 |

Basierend auf den obigen Bewertungen wird der Schluss gezogen, dass das Faserlaserschneiden die beste Wahl ist.

6. Ausgewählte Betrachtung zur Vorzugsvarianten-Faserlaser

Im letzten Teil habe ich die beste Variante gewählt, was Faserlaserschneiden ist. In diesem Kapitel wird die von LDV hergestellte Faserlaserschneidemaschine vorgestellt. Es gibt in diesem Unternehmen mehrere Modelle von Faserlaserschneidemaschinen. In diesem Kapitel wird das Modell von Electra FL-3015 vorgestellt.

Die Faserlaserschneidanlage bietet ein Spitzensystem welches ultraschnelle Geschwindigkeiten und eine hohe Flexibilität . Die Electra ist darauf ausgelegt, so schnell zu schneiden, wie es der thermische Prozess zulässt und dazu in der Lage, eine große Vielfalt an Eisen-, Nichteisenmetalle zu verarbeiten. Durch die Touchscreen-Steuerung von LVD, zusammen mit dem User-Interfaca, sind die problemlose Einstellung und der Betrieb des Systems gewährleistet. (Abb.11) [13]



Abb.11 Electra FL-3015 [13]

Eine kräftige IPG 6 oder 8 kW Faserlaserquelle optimiert die Maschinenleistung und bietet die Flexibilität, dicke und dünne Materialien mit hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu schneiden. Die extreme Steifigkeit der geschlossenen, geschweißten Stahlrahmenstruktur und des Portals aus Aluminiumguss sind entscheidend für die Aufrechterhaltung einer optimalen

Teilegenauigkeit über den gesamten Schnittbereich. Durch die Ausstattung mit einem hochentwickelten Zoomfokus, welcher die Einstellung des Fokusbereichs ohne Bedieneingriff ermöglicht, werden durchgängig Oberflächen von hoher Qualität geschaffen. Die 19" Touchscreen-Steuerung Touch-L ermöglicht die schnelle und unkomplizierte Einstellung und zeigt Schnitttechnologie und Verschachtelungen bequem an. Zeichnungen können direkt in die Steuerung importiert werden. Das Maschinenportal verfügt über einen Linearantriebsmotor, der eine extrem hohe Dynamik und 2G-Beschleunigung beim Schneiden gewährleistet. Integrierte Wechseltische mit spindelangetriebene Hubeinheiten, sorgen für reibungslose Bewegung und eine unterbrechungsfreie Bearbeitung der Teile. Ein Tischwechsel ist in 30 Sekunden abgeschlossen.

6.1 Merkmale des Electra FL-3015s

- Verarbeitet Eisen- und Nichteisenmetalle sowie viele andere Materialien
- Schnelle 2G-Beschleunigung während des Schneidens
- Fliegendes Schneiden von dünnen Materialstärken
- Nahezu wartungsfreie IPG YLS Faserlaserquelle
- Hohe Energieeffizienz von bis zu 40%
- Die grafische TOUCH-L Touchscreen-Steuerung mit User-Interface ist intuitiv und bedienerfreundlich
- Integriertes, automatisches Wechseltischsystem

6.2 Automation des Electra FL-3015s

- Düsenwechsler

Ohne den erforderlichen Bedieneringriff reduziert der Düsenwechsler die Stillstandsdauer durch zügig ausgeführte Düsenwechsel, Düsenreinigung und Prüfung der Düsenausrichtung. Diese Option schafft eine größere Autonomie, reduziert die Einstichdauer und steigert den Gesamtdurchsatz der Laserschneidanlage. (Tab. 14) (Abb. 12) [13]

Tab. 14: Eigenschaften des Düsenwechslers [13]

| Eigenschaften |
|--|
| Lagerung von 10 Düsen |
| Düsenreinigung nach einer bestimmten Anzahl von Einstichen |
| Automatische Kalibrierung der kapazitiven Höhenabtastung |
| Kamera zur Kontrolle der Größe und Position der Düse sowie Überwachung der Düsenqualität |



Abb.12 Düsenwechsler [13]

- Kompaktturm (CT-L)

Der CT-L ist ein kostengünstiger Turm zur Beschickung und Entnahme, sowie zur Lagerung von Rohmaterialien und fertigen Teilen auf 4, 6 oder 10 Paletten. Das System handhabt Bleche mit einer Größe von bis zu 3050 x 1525 mm und einer Materialstärke von bis zu 25 mm, und bei einer maximalen Lagerkapazität der Palette von 3000 kg. Die CT-L-Einheit ermöglicht die bedienungsfreie Produktion in einer kompakten Umgebung. (Abb.13) [13]



Abb. 13 Kompaktturm (CT-L) [13]

- Flexible Automation (FA-L)

Das schnelle und flexible Belade-/Entladesystem FA-L ist eine ideale Ergänzung der hochschnellen Electra. Es kann innerhalb von nur 40 Sekunden ein bearbeitetes Blech entnehmen und ein neues auf den Tisch auflegen. Das System handhabt Bleche bis zu einer Größe von 3050 x 1525 mm und einer Blechdicke von 20 mm, bei einer maximalen Palettenkapazität von 3000 kg. Das FA-L ist insbesondere geeignet für Anwendungen mit einem großen Produktionsvolumen mit geläufigen Materialien, Blechdicken und Abmessungen. (Abb.14)[13]



Abb.14 Flexible Automation (FA-L) [13]

7. Zusammenhang zwischen den maschinenbaulichen und organisatorischen Schnittstellen

7.1 Materialfluss

Materialfluss ist die Zusammenfassung aller Lager-, Speicher- und Bewegungsvorgänge beim Ver- und Entsorgen von Lagern Puffen und Arbeitsstationen. Diese Prozesse betreffen Rohstoffe, Werkstücke, Werkzeuge, Betriebsmittel und Abfallstoffe. [6]

In diesem Kapitel wird nach dem neuesten von Bystronic entwickelten System "Bytrans Cross" gesucht. (Abb.15)



Abb. 15 „Bytrans Cross“ [12]

Um den laufenden Materialfluss beim Laserschneiden zu beschleunigen, hat Bystronic nach eigenen Angaben flott agierende Be- und Endlademöglichkeiten geschaffen, die mit dem schnellen Laserschneidprozess Schritt halten.

Die Bystronic hat, wie es dazu heißt, mit „Bytrans Cross“ eine Be- und Entladelösung für das Faserlaserschneiden entwickelt. Das Besondere daran sei die grosse Freiheit, die das System dem Anwender biete. „Bytrans Cross“ schafft laut Bystronic den Spagat, der herkömmliche Automationsansätze bisher stets an die Leistungsgrenze führte: eine Automation für Großserien bei genügend hoher Flexibilität, um auch kleine Aufträge wirtschaftlich abzuarbeiten. [12]

Viele Blechverarbeiter, die auf Faserlaser setzen kennen folgendes Problem: Innerhalb der Produktion ist das Laserschneiden so schnell, dass die Materialzufuhr und das Abräumen der fertigen Teile und Restbleche zum Engpass werden, so Bystronic. Dabei komme der Fertigungsfluss auch schon mal ins Stocken. Das maximale Potenzial dieser Schneidtechnologie aber schöpfen die Anwender folglich nur mit einem Materialhandling aus, das optimal auf die hohen Prozessgeschwindigkeiten abgestimmt sei. Optimal bedeutet im industriellen Umfeld aber zweierlei, wie Bystronic anmerkt: Einerseits ist ein automatisierter Zu- und Abfluss bei großen Fertigungsserien sinnvoll. Andererseits benötigten Anwender aber auch die Freiheit für manuelle Einschübe. Die Automation sollte bei Letzterem aber auch nicht als Hemmschuh fungieren. [12]

Das System „Bytrans Cross“ ist eine Automationsidee, die sich laut Hersteller auch wechselnden Auftragslagen und Fertigungsrhythmen beim Laserschneiden flexibel anpasst. Der Schlüssel dazu sei der modulare Aufbau der Be- und Entladeeinheit. Damit würden verschiedene Einsatzszenarien „spielbar“. Als Automationsbrücke kann „Bytrans Cross“ zwischen Laserschneidanlage und Materiallager integriert werden, um, wie es weiter heißt, den Materialfluss quasi zu dirigieren. Ebenso gut könne man es aber auch als Stand-alone-System ohne Lageranbindung nutzen, um die Laserschneidanlage mit Rohblechen in verschiedenen Stärken und Materialien zu versorgen. In der Basisversion verfüge Bystronics „Bytrans Cross“ über zwei Beladewagen, die im Stand-alone-Einsatz als Materiallager dienen. [12]

7.2 Transport

An Veränderungen der Situation (z. B. Auftragsbestand, Kapazität) anpassbare Kombination aus Werkstattproduktion und Fließproduktion, welche mit Hilfe eines automatischen Transportsystems einen reibungslosen Arbeitsablauf garantieren soll. Voraussetzung für die Planung und Steuerung eines FFS ist eine möglichst exakte Abschätzung der Konfigurationsvariablen wie z. B. Anzahl und Kapazität der Bearbeitungsmaschinen, die logische Abfolge des Materialflusssystems sowie notwendige Lagerbestände und Durchlaufzeiten. Teil des FFS ist somit ein flexibles Montagesystem mit einem flexiblen Transportsystem. Man spricht auch von gerichtetem Materialfluss und taktgebundener Werkstückweitergabe im Sinne einer Innenverkettung als Gegenstück zur Außenverkettung bei der Fließfertigung. [11]

Die Gesamtheit des Werkstücktransportes ist in Flexiblen Fertigungssystemen durch ein integriertes Transportsystem vorzunehmen, das sowohl eine technische als auch eine informationsorientierte Schnittstelle zum innerbetrieblichen Gesamtprozess sowie zur jeweiligen Leiteinheit des FFS besitzt. Da die werkstückseitige Verkettung der Bearbeitungsstationen das wesentliche Kennzeichen eines FFS darstellt, kommen dem Transportsystem die Aufgaben

- Erkennen
- Handhaben
- Transportieren

der Werkstücke mit oder ohne Spannvorrichtungen zu. [6]

Eine wichtige Grundlage für die Auslegung eines FFS bezüglich der Anordnung der Bearbeitungsstationen stellt das Transportsystem dar, woraus sich prinzipiell die vier Grundstrukturen

- Linearstruktur
- Ringstruktur
- Flächenstruktur
- Leiternstruktur

des Transportsystems ableiten lassen. [6]

Ein wesentliches Element des Transportsystems stellt das Transportmittel dar. Für prismatische (kubische) Werkstücke werden in FFS vorrangig Paletten verwendet. Als technische Ausführungen dieses Transportmittels kommen

- einfache Transportunterlagen
- Transportpaletten
- Wechselpaletten und
- System-Paletten mit Standardabmessungen nach DIN: Euro-Palettenmaß 800 mm x 1200 mm zur Anwendung.

Aufgrund der Tatsache, dass die Aufspannung in den meisten Einsatzfällen nicht direkt auf der Palette erfolgt, sind entsprechende Spannvorrichtungen erforderlich. Je nach verwendetem Transportmittel (mit oder ohne Spannvorrichtung) werden auch die Paletten-Transportsysteme systematisiert. Deren Hauptaufgabe ist es, alle im System technisch und technologisch eingebundenen Einrichtungen u. a. unterstützenden Anlagen unterbrechungslos mit Werkstücken zu versorgen. [6]

7.3 Handhabung

Moderne Laser- Schneiden- Maschinen sind mit CNC- Steuerungen ausgestattet.

Die wichtigsten Aufgaben dieser computergestützten Steuerung zur numerischen Verarbeitung der Daten in Form von CNC-Befehlen bestehen in der präzisen Steuerung der Bewegungsachsen und in der konkreten, zeitgenauen Ausführung der Schaltinformationen. Liegt eine höhere Ausbaustufe dieser Fertigungseinrichtung vor (z. B. Bearbeitungszentrum, Fertigungszelle oder Fertigungssystem), dann müssen weitere zusätzliche Anforderungen durch die CNC erfüllt werden. Demnach wird diese Steuerung wie folgt definiert:

Die CNC ist eine leistungsfähige Steuerung, die je nach Ausbaustufe mittels einem oder mehrerer integrierter Mikrocomputer technische und technologische Informationen numerisch verarbeiten und an entsprechende Stellglieder weitergeben kann. Dadurch werden mechanische Vorgänge ausgelöst, die zur zielgerichteten Beeinflussung eines Werkstückes und/oder eines Prozessschrittes führen und in deren Ergebnis die Komplettbearbeitung eines Teiles entsprechen dem in Programmform vorliegendem Arbeitsplan erfolgt, wobei alle erforderlichen Haupt- und Nebenprozesse berücksichtigt werden. [6]

8. Tabellenverzeichnis

| Tab.- Nr. | Bezeichnung | Seite | Quelle |
|----------------------|--|--------------|---------------|
| 1 | Kenngrößen,resultierend aus Erfahrungswerten bereits realisierter FFS (nach VDI) | 13 | [6] |
| 2 | Verschiedene Mechanismen von Metall und Nichtmetall für Laser | 20 | [2] |
| 3 | Vor-teile des Laserschneidens | 24 | [2],[8] |
| 4 | Nachteile des Laserschneidens | 25 | [2],[8] |
| 5 | Vor-, und Nachteile des CO2 Laser- schneidens | 29 | [10] |
| 6 | Vor-, und Nachteile des Unterwasser- Laserschneidens | 32 | [2] |
| 7 | Vor-, und Nachteile des Faser Laser- schneidens | 33 | [10] |
| 8 | Hilfsmitteln des Lösungsvarianten | 34 | - |
| 9 | Schneidgeschwindigkeit des Lösungsvarianten | 34 | - |
| 10 | Schneidqualität des Lösungsvarianten | 35 | - |
| 11 | Kostenanalyse des Lösungsvarianten | 36 | [10] |
| 12 | Beurteilungskriterien des Lösungsvarianten | 37 | - |
| 13 | Bewertung des Lösungsvarianten | 37 | - |
| 14 | Eigenschaften des Düsenwechsleres | 40 | [13] |

9. Abbildungsverzeichnis

| Tab.- Nr. | Bezeichnung | Seite | Quelle |
|------------------|---|--------------|---------------|
| 1 | Elemente und Grundaufbau eines FFS (BOSCH Industrierausrüstung, Anwender BOSCH Stuttgart) | 11 | [6] |
| 2 | Elemente eines FFS und deren Wechselwirkungen | 16 | [6] |
| 3 | Struktur eines FFS | 16 | [6] |
| 4 | Lasererzeugung | 19 | [7] |
| 5 | Laserschneiden allgemeine Anordnung | 21 | [8] |
| 6 | Prinzip des Laserschneides | 22 | [2] |
| 7 | CO2 Laser | 28 | [10] |
| 8 | Wirkprinzip des Unterwasser- Laserschneidens | 30 | [2] |
| 9 a); b) | Lösung 1; Lösung 2 | 31 | [2] |
| 10 | Faser Laser- Schneiden | 33 | [10] |
| 11 | Electra FL-3015 | 38 | [13] |
| 12 | Düsenwechsler | 40 | [13] |
| 13 | Kompaktturm (CT-L) | 41 | [13] |
| 14 | Flexible Automation (FA-L) | 41 | [13] |
| 15 | „Bytrans Cross“ | 42 | [12] |

10. Literaturverzeichnis

- [1] Zhou, Bingkun: Laserprinzip [M]; 2003. 1-3; Beijing
- [2] Yang, Wei: Forschung zu Theorie und Anwendungstechnologie des hochpräzisen Laserschneidens; 2009
- [3] Yan, Jixiang: Laserprinzip Technologie und Anwendung; 2006. 268-269; Beijing
- [4] <https://link.springer.com/chapter>
- [5] <https://www.onpulsion.de/lexikon/flexibles-fertigungssystem/>
- [6] Prof. Dr.- Ing. R. Kademmann: Fertigungssystem; Hochschule Merseburg (FH);2011
- [7] www.explainthatstuff.com
- [8] Lv, Shanjin: Forschung zu Laserbearbeitungs- CNC- Systemen und Zustands-erkennungstechnologien; Haerbin; 2007
- [9] G. Thawari, J. K. Sarin Sundar, G. Sundararajan, et al. Influence of process parameters during pulsed Nd: YAG laser cutting of nickel-base superalloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005(170):229-239.
- [10] Qu, Zhiyuan: CO2-Laser- und Faserlaser-Schneidprozess und Kostenanalyse; Laser Welding Topic
- [11] <https://www.finanzen.net/wirtschaftslexikon/Flexibles-Fertigungssystem- FFS>
- [12] <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/produktiveres-laserschneiden-durch-gestraffte-prozesskette-a-689880/>
- [13] <https://www.lvdgroup.com/de/produkte/faserlaser-schneidanlagen/electra-fl>