



**Thema: Erstellung eines Konzeptes für ein  
Bearbeitungszentrum zu den Laserstrahlschneiden mit  
einem Festkörperlaser zur Formgebung an  
rotationssymmetrischen Teilen**

**Bachelorarbeit**

zur Erlangung des Grades eines  
Bachelor of Engineering (B. Eng.)  
an der Hochschule Merseburg (FH)

von

Chen Xiaowei (Matrikel-Nr.: 18414)

**Betreuender Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Rolf  
Kademann**

**Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Thomas Kirchhofer**

**Datum: 29.08.2014**

**Aufgabenstellung**  
**für die Bachelorarbeit (B. Eng.)**  
**von Herrn Chen Xiaowei**  
**(Matrikel MIPM 10 18414)**

**Thema:**

**Betreuer:**

**Aufgabenstellung**

## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass die vorgelegte Arbeit zum Thema:

**Erstellung eines Konzeptes für ein Bearbeitungszentrum zu den  
Laserstrahlschneiden mit einem Festkörperlaser zur Formgebung an  
rotationssymmetrischen Teilen**

selbständig von mir nach bestem Wissen und nur unter  
Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt wurde.

Merseburg, 29.08.2014

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Menschen bedanken, die es mir ermöglichten diese Arbeit zu realisieren. Ein besonderer Dank gilt Prof. Kademann für die Bereitstellung des interessanten Themas und der Möglichkeit diese Arbeit in seinem Arbeitskreis anfertigen zu können und seine wunderbare Betreuung während dieser Arbeit. Bei Herr Kirchhofer möchte ich mich für die Einweisung in die Gerätschaften und seine Ratschläge bedanken.

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung .....	7
2 Grundlagen der Rohrführung aus Blech .....	8
2.1 Art der Rohre .....	8
2.2 Rohrformungsverfahren .....	8
2.2.1 Formwalzverfahren <sup>[1]</sup> .....	9
2.2.2 Rohrformungsverfahren beim Schmelzschweißen <sup>[1]</sup> .....	9
2.3 Die vorhandenen Einrichtungen in Fertigungsprozessen .....	10
2.3.1 Schweißprozess <sup>[1]</sup> .....	11
2.4 Schleifprozess <sup>[1]</sup> .....	12
3 Laserstrahlbearbeitung zum Schneiden mit Festkörperlaser .....	12
3.1 Lasertechnik <sup>[2]</sup> .....	12
3.2 Optische Grundlagen .....	18
3.3 Anlagenkonzepte .....	19
3.3.1 1D Anlagen .....	21
3.3.2 2D-Anlage .....	21
3.3.3 3D-Anlagen .....	22
3.4 Laseranlagentechnik .....	24
3.4.1 Laserstrahleigenschaften <sup>[2]</sup> .....	26
3.5 Anlagensteuerung .....	28

3.6 Grundaufbau eines Festkörperlasers.....	29
3.6.1 Nd:YAG-Laser (Variante 022) <sup>[2]</sup> .....	30
3.6.2 Rubin Körperlaser (Variante 022) <sup>[2]</sup> .....	31
3.6.3 Yb: YAG-Laser <sup>[2]</sup> .....	33
3.6.3 Eigenschaften von Laserlicht .....	34
3.7 Technik des Laserschneidens.....	34
3.7.1 Systematik der Fertigungsverfahren.....	35
3.7.2 Laserschneiden .....	35
3.7.3 Sublimierschneiden (Variante 031) <sup>[2]</sup> .....	36
3.7.4 Brennschneiden <sup>[2]</sup> .....	38
3.7.5 Schmelzschnitten <sup>[2]</sup> .....	40
3.8 Beurteilungskriterien für das Laserschneiden .....	41
3.9 Arbeitsschutz beim Umgang mit dem Laser .....	41
3.9.1 Laserwarzeichen .....	43
3.10 Handhabungsgerät.....	43
3.10.1 Brückenkran .....	44
3.10.2 Manipulator .....	44
4 Gestaltung einer Anlage.....	44
4.1 Auswahl von Bewertungskriterien.....	45
4.2 Grund für Vergleich der Bewertungskriterien .....	47

4.3 Bewertung von allgemeinen Lösungsvarianten.....	47
4.4 Grund für Auswahl der Lösungsvariante .....	50
4.5 Zusammenhänge zwischen den maschinenbaulichen und organisatorischen Schnittstellen <sup>[4]</sup> .....	51
5 Konzeptieren aus Beispielteilen.....	52
5.1 Lang Loch .....	52
5.2 Oval Förmiges Loch .....	53
7 Literatur.....	60
9 Quelle .....	62

# 1 Einleitung

## Ziel der Bachelorarbeit

Zunehmend spielt Lasertechnik immer wichtiger Rolle in der industriellen Praxis, besonders für Materialbearbeitung. An diese Stelle sei der Leser darauf hinwiesen, dass zum besseren Verständnis die grundlegenden Kenntnisse der Lasertechnik und Laserschneiden Technik, sowie das Aufbau des Systems.

Diese Arbeit lässt sich in vier Abschnitte unterteilen. Der erste Abschnitt umfasst die Kapitel 1 und 2, in denen ein grundlegender Überblick über Aufgabenstellung, Rohr Fertigungsverfahren gewährt wird. Das Kapitel 3 zeigt die grundlegenden Inhalt über Lasertechnik und Laserschneiden. Das Kapitel 4 besteht die Bewertung von Varianten und das Konzept von diese Aufgabe.

Die Parametrierungsdaten und dieses Dokument befinden sich als PDF-Dateien auf der beigefügten CD-ROM.

## **2 Grundlagen der Rohrführung aus Blech**

### **2.1 Art der Rohre**

Zunehmend gibt es 2 Arten von Rohrherstellung in Industriefeld, geschweißtes Rohr und nahtloses Rohr.

Im Jahre 1900 bis 1950 waren geschweißten Rohren ausgiebig in der industriellen Fertigung produziert. Und dabei durch Walzen wurde Blechteile zum Rundquerschnitt geformt. Danach wurde die Rundquerschnitte mit hohem Temperatur geschweißt. Aber wegen die Technik von schweißen ist die Qualität des Rohrs nicht so gut, weil die naht eine Schwachstelle ist. Das ist auch die Schwäche von dem Fertigungsverfahren. In Nächsten 50 Jahren wurde ein anderes Fertigungsverfahren erfunden, das sind nahtloser Rohre. Die sind viel besser als nahtloser Rohre.

In der Folgezeit mit Entwicklung der Schweißtechnik hat das Rohrschweißverfahren auch großen Fortschritt. Geschweißte Rohre sind günstiger und schneller herzustellen als nahtlose Rohre. Zunehmend besitzen geschweißte Rohre in der Welt gegen 2/3 Stahlrohrproduktion. Geschweißte Rohre sind meistens das Form kleiner Wanddicken und großer Außendurchmesser.

### **2.2 Rohrformungsverfahren**

Das erste wichtige Verfahren in der Rohrherstellung ist, dass das Ausgangsmaterial zum Rohr geformt wird. Unten sind einige Beispiele von Formungsverfahren.

### 2.2.1 Formwalzverfahren

„Die Einformung zum Schlitzrohr für Leitungsrohre sind von etwa 20-609 mm Außendurchmesser und Wanddicken von 0,5 bis ca. 16mm und auch von Luppen zu Vorrohre für ein nachgeschaltetes Streckreduzierwalzwerk erfolgt in einem Formwalzwerk (Rollforming). In folgendes Bild ist das Formwalzverfahren dargestellt und eine entsprechende Anlage wird dargestellt.“ [1]

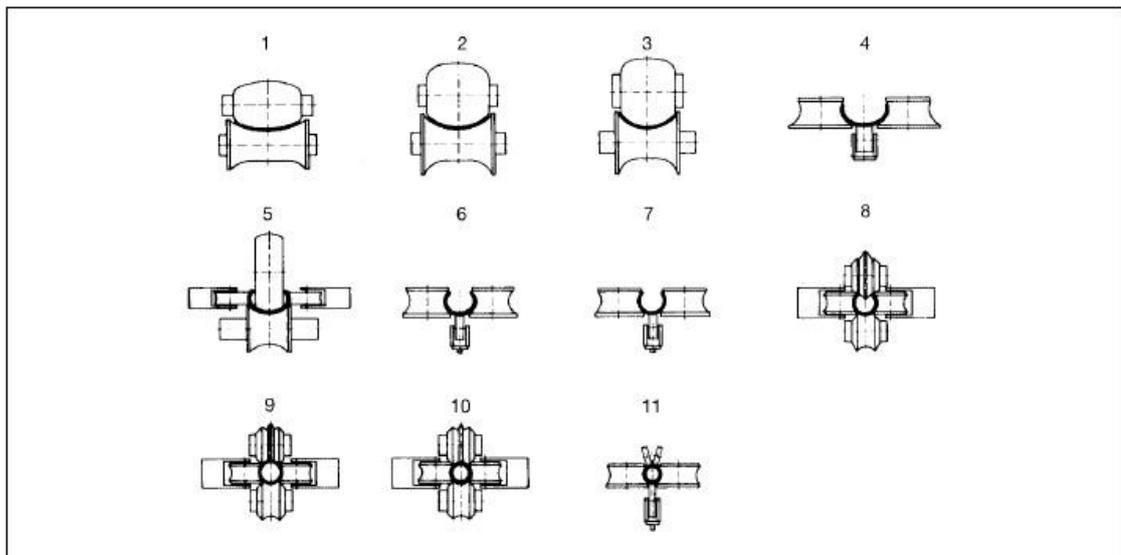


Abbildung 1 Prinzip Formwalzverfahren

### 2.2.2 Rohrformungsverfahren beim Schmelzschweißen

Schmelzgeschweißte Stahlrohre sind zurzeit hauptsächlich in Durchmessern über 457,2 mm (18“) produziert. Für die Rohrformung können Sie unten folgende Verfahren zum Einsatz (Abbildung 2) finden :

- „- Das 3-Walzenbiegeverfahren für das Einformen von Grobblechen als Kalt- oder Warmumformung,
- Das C-Pressenverfahren für Grobbleche als Kaltumformung,

- Das U-O-Pressenverfahren für Grobbleche als Kaltumformung,
- Die Schraubenlinien-(Spiral-)einförmung von Breitband oder Grobblech als Kaltumformung.

In der weltweiten modernen Großserienfertigung finden die beiden letzten Verfahren die häufigste Anwendung.“ [1]

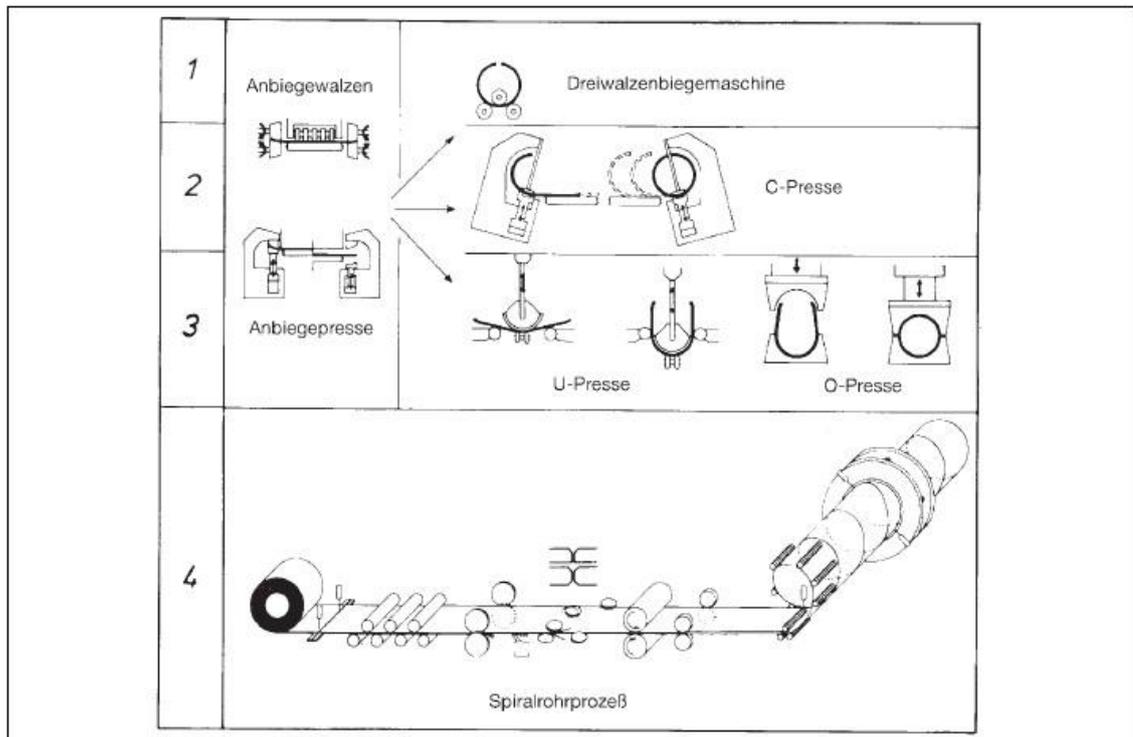


Abbildung 2 Rohrformungsverfahren

### 2.3 Die vorhandenen Einrichtungen in Fertigungsprozessen

Das Fertigungssystem da oben besteht aus Schweißprozess, Schleifprozess Handhabe- und Transportprozess. Nach diese Dokumentationen werden die Lösungen in den Prozessen für die technischen Einrichtungen wie folgend gezeigt.

### 2.3.1 Schweißprozess<sup>[1]</sup>

Beim Schweißprozess wird Laserstrahlschweißen angewendet.

Laserstrahlmaterialbearbeitung hat folgende Vorteile :

- hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten
- bessere und feine Fertigungsqualität
- hohe Automatisierungsfähigkeit
- berührungslose Bearbeitung
- günstiger und umweltfreundlich
- die Fähigkeit unterschiedliche Materialien (metallische und nicht metallische) bearbeitet zu können.

Die Vorteile des Lasers verglichen mit konventionellen Verfahren besonders für Schweißen in den erzielbaren Energiedichten im Fokus. Dies führt zu einem reduzierten Verzug der Werkstücke und einer geringeren thermischen Belastung und dadurch deutlich kleinere Wärmeeinflusszonen.

Das Laserstrahlschweißen gehört zu dem Schmelz-Verbindungsschweißen „Die erforderliche Wärme entsteht durch Umwandlung gebündelter energiereicher Strahlung beim Auftreffen auf bzw. Eindringen in das Werkstück“ (DIN 1910).

## **2.4 Schleifprozess** <sup>[1]</sup>

Schleifen ist ein Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden. (DIN 8589-0) Der rotierenden Schleifkörper sind aus gebundenen Schleifkörnern und eingeschlossenen Poren, die als Spankammern dienen. Beim Abstumpfen der Schneiden kommt es zum Herausbrechen des Kornes und damit zum Freiwerden neuer scharfer Schneiden kommt es zum Herausbrechen des Kornes und damit zum Freiwerden neuer scharfer Schneidkeile. Die Vorzüge des Schleifens sind:

- hohe Oberflächengüte der geschliffenen Teile
- gute Bearbeitbarkeit harter und schwer zerspanbarer Werkstoffe
- hohes Zerspanungsvolumen (bei besonderen Schleifverfahren und steifen Maschinen).

Das Hauptkriterium ist die Form der am Werkstück erzeugten Fläche. Auf Plan- oder Flachsleifmaschinen werden ebene Flächen erzeugt, auf Rundschleifmaschinen kreiszylindrische.

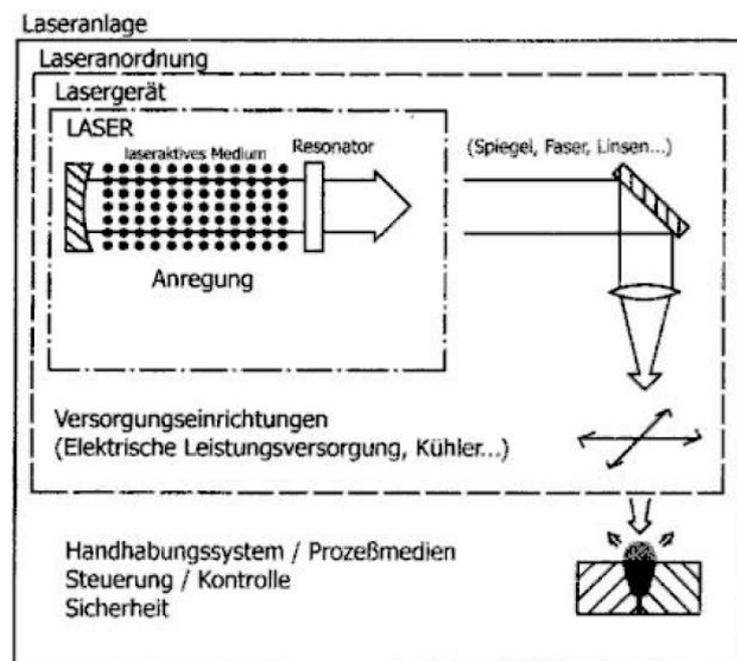
## **3 Laserstrahlbearbeitung zum Schneiden mit Festkörperlaser**

### **3.1 Lasertechnik** <sup>[2]</sup>

Das Wort LASER, besteht aus ein Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, beschreibt streng genommen einen physikalischen Verfahren, besonders die Lichtverstärkung durch stimulierte (gebräuchlich auch: induzierte, d.h. erzwungene) Aussendung von Strahlung. Unmittelbar im Zusammenhang mit seiner erstmaligen Realisierung (Mai-man, 1960) hat sich jedoch im allgemeinen Sprachgebrauch eingebürgert, das dafür genutzte Gerät so zu bezeichnen. Entsprechend dessen technischer Gestaltung lässt sich elektromagnetische Strahlung - Laserstrahlung - mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften erzeugen und in einer großen Vielfalt von Anwendungsfeldern nutzen, beispielsweise in der Informations-

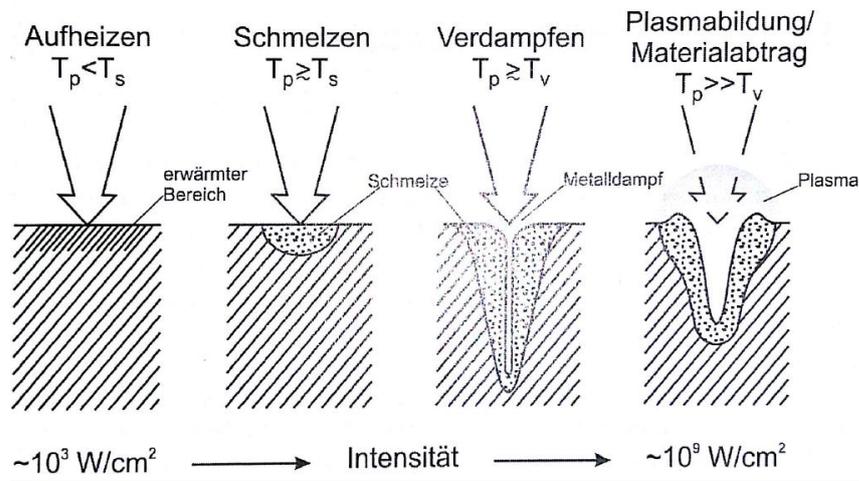
und Messtechnik, der Biophysik sowie der Medizin, der Materialbearbeitung und der Fusionsforschung. In allen Fällen dient der Laserstrahl primär entweder als Informations- oder als Energieträger.

Die fertigungstechnische Nutzung des Lasers bedarf neben der Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung mit den gewünschten Eigenschaften der maschinentechnischen Einbeziehung weiterer optischer, mechanischer und steuerungstechnischer Komponenten, um zu einer „Werkzeugmaschine“ für den industriellen Einsatz zu gelangen. So muss das eigentliche Werkzeug, der Laserstrahl als Energieträger, vom Ort seiner Entstehung zur Einwirkzone am Werkstück mit Hilfe von Spiegeln oder flexiblen Glasfasern geführt werden. Den Erfordernissen des durchzuführenden Fertigungsprozesses entsprechend hat zudem eine Strahlformung zu erfolgen, bei der es sich meist um eine Fokussierung des Strahls handelt. Des Weiteren ist für eine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück bei bahnförmigen Bearbeitungen, wie z. B. dem Schneiden oder Schweißen, zu sorgen. Das Schema einer derartigen Werkzeugmaschine zeigt Abbildung 3, worin Definition und Benennung der Komponenten der Norm entsprechen.



**Abbildung 3 Der Laser als fertigungstechnische Einrichtung: Schema und Begriff nach ISO 11145**

Die häufig auch gebrauchte Bezeichnung "thermisches" Strahlwerkzeug Laser bringt zum Ausdruck, dass die für den Bearbeitungsprozess benötigte Energie in Form von Wärme bereitgestellt wird. In den meisten fertigungstechnischen Anwendungen entsteht sie bei der Absorption der eingestrahltten elektromagnetischen Energie in den oberflächennahen Bereichen des Werkstücks, die vom Laserstrahl getroffen werden. Welche physikalischen Effekte sich in dieser Wechselwirkungszone einstellen, wird von der Temperatur dort bestimmt; sie ergibt sich aus der Bilanzierung von freigesetzter und in das Werkstück abfließender Wärme. Damit hängt die Wirkung des Laserstrahls über den Mechanismus der Energieabsorption von seinen Eigenschaften sowie der Einwirkzeit und von den physikalischen und geometrischen Eigenschaften des Werkstücks gleichermaßen ab.



**Abbildung 4 Wechselwirkungen Laserstrahl "Werkstück bei steigender Intensität und dabei auftretende Veränderungen in der WWZ; einhergehend ändern sich auch die Mechanismen der Energieeinkopplung.**

Anhand von Abbildung 4 seien mögliche Phänomene, wie sie typischerweise bei metallischen Werkstoffen auftreten, qualitativ diskutiert. Die genannten

Leistungsdichten sollen hier lediglich als Orientierungsdaten dienen; im Einzelfall bestimmen die Materialeigenschaften und die Wellenlänge des verwendeten Lasers die genaueren Werte.

Bei niedrigen Leistungsdichten im Bereich einiger  $10^3$  bis etwa  $10^4$  W/cm<sup>2</sup> und hinreichend großem Volumen des Werkstücks wird die Temperatur in der Wechselwirkungszone unterhalb der Schmelztemperatur bleiben. Würde der Strahl bei solchen Bedingungen über die Werkstückoberfläche geführt, so wäre damit das Grundprinzip des Laserhärtens realisiert.

Wird die Leistungsdichte durch Steigerung der eingestrahlten Leistung und/oder stärkere Fokussierung auf die Größenordnung um  $10^5$  W/cm<sup>2</sup> erhöht, so wird in der Wechselwirkungszone (WWZ) Schmelztemperatur erreicht (oder überschritten), was zur Ausbildung eines Schmelzbades führt. Dieser Zustand stellt die Basis des so genannten Wärmeleitungsschweißens dar.

Bei eingestrahlten Leistungsdichten von einigen  $10^5$  bis zu einigen  $10^6$  W/cm<sup>2</sup> wird die Verdampfungstemperatur erreicht, und durch den Rückstoßdruck des abdampfenden Materials bildet sich in dem Schmelzbad eine in das Werkstück eindringende Kapillare aus; ihr Durchmesser entspricht etwa dem des fokussierten Strahls. Die seitliche Ausdehnung der sie umgebenden Schmelze wird maßgeblich von der Einwirkzeit des Laserstrahls bestimmt. Dieser Fall nun ist charakteristisch für das Schneiden (wenn die Schmelze durch einen koaxial zum Laserstrahl gerichteten Gasstrahl weggeblasen würde) und insbesondere für das so genannte Tiefschweißen, dem mit Abstand bedeutendsten Fügeprozess mit Laserstrahlen.

Wird die Leistungsdichte weiter gesteigert bis zu Werten zwischen  $10^7$  und  $10^8$  W/cm<sup>2</sup>, so steigt damit auch die Verdampfungsrate. Dies hat zur Folge, dass sich in der Wechselwirkungszone ein extrem hoher Druck (bis zu mehreren kbar) einstellen kann, welcher die dort vorhandene Schmelze austreibt. Diesen Mechanismus des

Materialabtrags macht man sich beim Prozess des Bohrens zunutze. Aufgrund der hohen Leistungsdichten wird weiterhin ein Teil des Metaldampfes und auch des Umgebungsgases oberhalb der Einwirkzone ionisiert. Das so entstandene Plasma modifiziert in erheblichem Maße die Energieeinkopplung in das Werkstück.

Es ist nun diese Möglichkeit, ganz gezielt eine bestimmte Prozesstemperatur einstellen zu können, worauf die Vielseitigkeit des Strahlwerkzeugs Laser beruht. Nicht ohne Berechtigung kann deshalb auch von einem Universal Werkzeug gesprochen werden. Zur Illustration dieser Aussage sind in Abbildung 4 sämtlichen nach DIN 8580 definierten Fertigungsverfahren solche mit dem Laser durchführbare zugeordnet.

Hieraus soll indessen keinesfalls der Anspruch abgeleitet werden, fertigungstechnische Aufgaben nur mit dem Laser lösen zu wollen. Vielmehr bedingt ein wirtschaftlicher Erfolg des Lasereinsatzes eine sorgfältige Abwägung aller Vor- und Nachteile gegenüber konkurrierenden Verfahren. Da relativ hohe Investitionskosten ein Hemmnis darstellen könnten, ist es immer wichtig, die fertigungstechnischen Vorzüge der Lasermaterialbearbeitung in jedem Anwendungsfall herauszuarbeiten.

Im Gegensatz zu spanenden Werkzeugmaschinen stellen Laseranlagen Werkzeuge mit berührungsloser, kräftefreier und weitgehend verschleißfreier Wirkungsweise dar. Der Einsatz von Laseranlagen ist nicht auf das Trennen von Werkstoffen begrenzt, sondern vielmehr ermöglicht der Laser die Anpassung an vielfältige Bearbeitungsaufgaben.

Noch vor einigen Jahren beurteilte man den Einsatz von Lasern in der Industrie skeptisch. Hohe Investitionskosten, geringe Prozessgeschwindigkeiten und Wartungsprobleme waren die Hauptgründe hierfür. Die abwartende Haltung hat sich in vielen Bereichen der Metallverarbeitung geändert, nachdem weiterentwickelte

Laser mit besserer Stabilität, Wartungsfreundlichkeit und reduzierten Abmessungen zur Verfügung stehen.

Ein wichtiger Aspekt war dabei, dass diese Entwicklungen kostenneutral erfolgten. Hinzu kommt, dass heute nicht mehr die einzelne Fertigungsaufgabe separat beurteilt wird, sondern Fertigungsabläufe betrachtet werden. Möglichkeiten der Automatisierung und flexiblen Fertigung sind deshalb weitere Ursachen für die Zunahme von Lasern in metallverarbeitenden Betrieben.

Von den auf dem Markt erhältlichen Lasertypen ist der CO<sub>2</sub>-Laser am weitesten entwickelt und für die Fertigungsaufgaben Trennen, Fügen sowie Oberflächen behandeln industriell akzeptiert. Bei den Festkörperlaser hat sich der Nd:YAG-Laser durchgesetzt. Beispiele sind Laserlöten bei der individuellen Leiterplattenbestückung, Schneiden und Schweißen von Feinwerkteilen sowie Beschriften von Metall- und Nichtmetallbauteilen.

Treffen	Fügen	Oberflächenbehandeln
Schneiden	Schweißen	Härten
Bohren	Löten	Umschmelzen
		Glasieren
		Legieren

**Tabelle 1 Bearbeitungsaufgaben von Laserlagen**

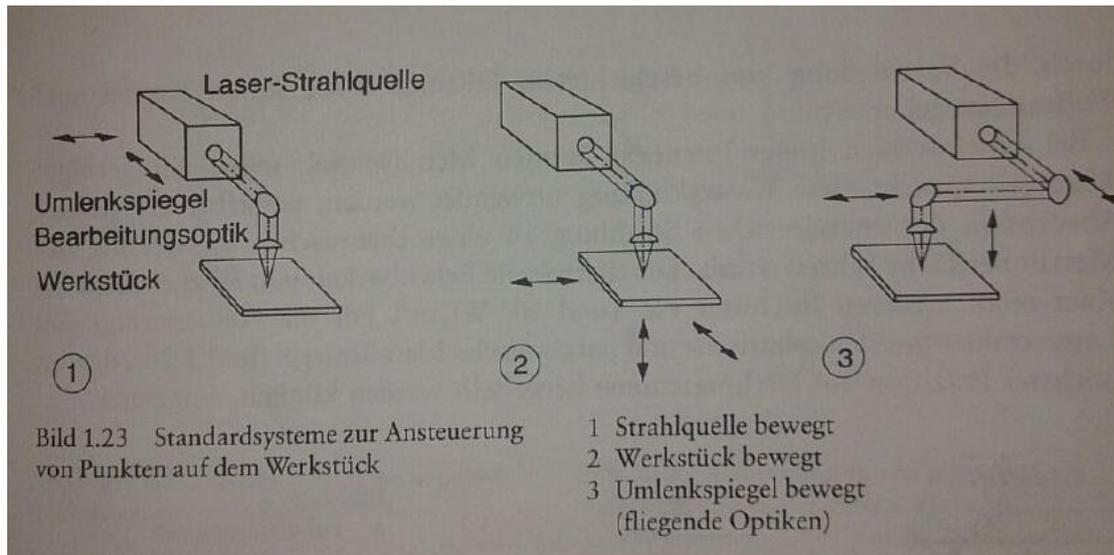
Unabhängig von produktionstechnischen Gesichtspunkten wie Werkstückhandhabung, Werkstückfluss und Automatisierung muss eine Laseranlage zur Bearbeitung von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen generell folgende Aufgaben erfüllen:

- Aufnahme und Positionieren der zu bearbeitenden Werkstücke,
- Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück in zwei oder drei Dimensionen mit der gewünschten Geschwindigkeit und Bahngenaugigkeitsdurchführen
- Verknüpfung von Steuerungs- und Kontrollfunktionen der Bearbeitungsstation mit denen der Strahlquelle,
- Versorgung mit Prozessmedien wie Gasen, Wasser und eventuell Zusatzwerkstoffen,
- Entsorgung von Verschnitt, Prozessmedien und Absaugung von Stäuben und Dämpfen,
- Schutz der Mitarbeiter gewährleisten.

### **3.2 Optische Grundlagen**

Die Gesetze der geometrischen Strahlen gelten für Laserstrahlen genauso wie die Gesetze der Wellenoptik. Wegen der Übersicht werden diese Gesetze nicht ähnlich erläutert.

Es wird der Laserstrahl für mehrerer Betrachtungen idealisiert, so dass die geringe Divergenz des Strahls (deren Bedeutung bei langen Lichtwegen nicht unwesentlich ist) sowie die andere Intensitätsverteilung (vor allen Dingen im Randbereich) unberücksichtigt sind. In den folgenden geometrischen Überlegungen wird derr als Gerade betrachtet. Weil Laserstrahlen mit Spiegel und Glaskörper umgelenkt werden können (Abbildung 5), ist mit dem Laserstrahl jeder beliebige Raumpunkte erreichbar.



**Abbildung 5 Standardsysteme zur Ansteuerung von Punkten auf dem Werkstück**

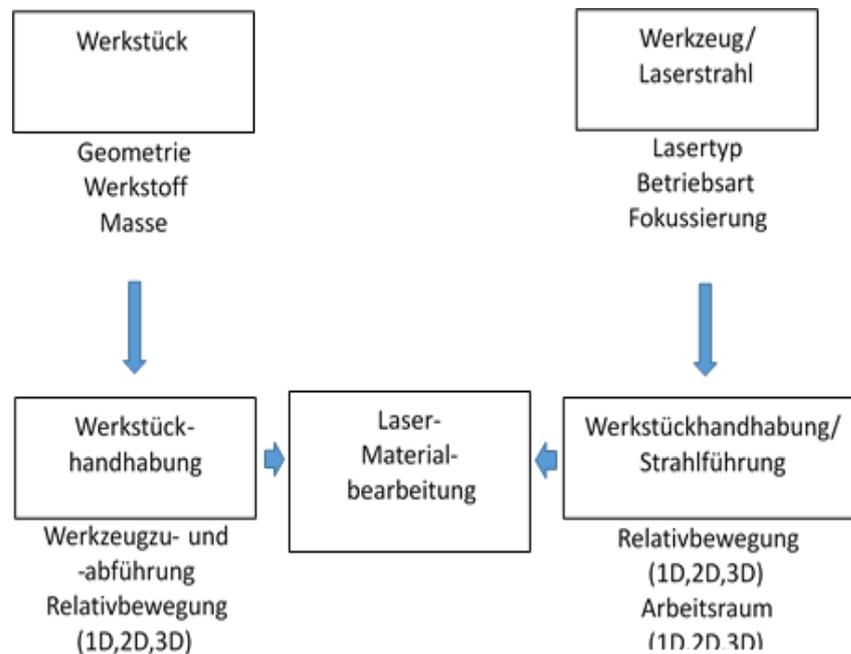
Im Bild zeigt 3 Arten Bewegung, Laserquelle Bewegung, Werkstück Bewegung, Umlenkspiegel Bewegung. Mit diesen 3 Bewegungen kann Laserstrahl jede Stelle erreichen.

### 3.3 Anlagenkonzepte

Im Gegensatz zu Werkzeugmaschinen der spanenden Materialbearbeitung weisen Laseranlagen zur Materialbearbeitung einen ähnlichen funktionellen Aufbau auf, der sich in die in der Abbildung 6 dargestellten Funktionen gliedert. Die wichtigen Komponenten von Laseranlagen sind der Laserstrahlquelle/erzeuger (Lasergerät) und die Führungssystem/Bewegungssysteme für Strahlführung und Werkstückhandhabung.

„Der Energielieferant für den Bearbeitungsprozess, die Laserstrahlquelle, stellt in Verbindung mit der Strahlfokussierlinse im Bearbeitungskopf das Werkzeug dar. Das Strahlführungssystem, vergleichbar mit der Werkzeughandhabung, überträgt die erzeugte thermische Energie an die Bearbeitungsstelle des Werkstückes. Die für die Materialbearbeitung erforderliche Relativbewegung zwischen Bearbeitungskopf und

Werkstück erfolgt durch rechnergesteuerte Verknüpfung der Werkzeug- und Werkstückbewegung.“ [3]



**Abbildung 6 Schema: Funktionen einer Laserbearbeitungsanlage**

„Sowohl produktionstechnische Gesichtspunkte als auch werkstückbedingte Einflussfaktoren wie Größe und Geometrie sowie die unterschiedlichen Laserbearbeitungsaufgaben Trennen, Fügen, Oberflächenbehandlung und den damit verbundenen Anforderungen haben zur Entwicklung verschiedener Laseranlagenkonzepte geführt.“ [3] Das geradlinige Bearbeiten rotationssymmetrischer oder ebener Werkstücke erfordert eine 1D, die Bearbeitung ebener Bauteile eine 2D, und die Bearbeitung räumlicher Bauteile eine 3D Bewegungsveränderlichkeit der Laseranlage während des Bearbeitungsvorgangs. Bereits weit verbreitet sind Laseranlagen zur 2D- Bearbeitung.

### 3.3.1 1D Anlagen

Die geradlinige Bewegung von rotationssymmetrischen Werkstücken ist durch die Drehen von den Werkstücken zu verwirklichen und schafft eine Achsbewegung (Abbildung 7 und Abbildung 8). Die Positionierung des Werkstücks und/ oder Bearbeitungskopf manuell erfolgt. Wegen Flexibilität sind meistens 2D- oder 3D-Anlagen werden in der Praxis häufiger als 1D-Materialbearbeitungen verwendet.

Bild 2.3  
Laseranlagenkonzept zur  
1D-Bearbeitung

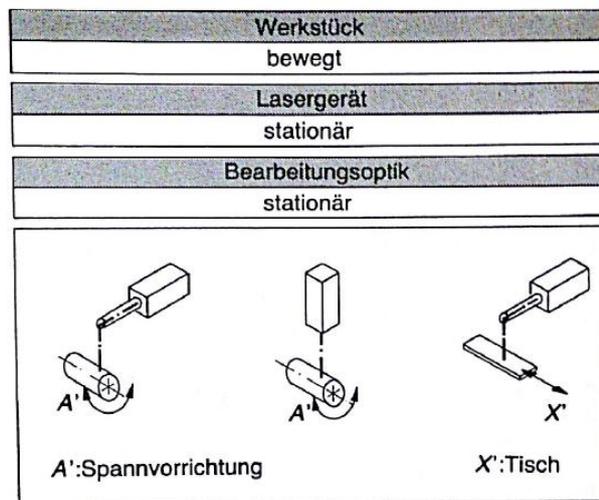


Abbildung 7 Laseranlagenkonzept zur 1D-Bearbeitung

### 3.3.2 2D-Anlage

2D-Laseranlagen (Abbildung 8) mit zwei Achsantrieben werden am ersten zum Schneiden von ebenen Bauteilen eingerichtet und sind gefragt, wo Werkstücke bearbeitet werden und bessere Flexibilität gegen Geometrieänderungen der Werkstücke gefordert ist. Das Laserstrahlschneiden wird im Fahrzeug-, Maschinen-, Werkzeug- und Anlagenbau usw. zum Trennen von Stahl-, Edelstahl- und Nichteisenmetall-blechen verwendet.

Daneben kann der Laserstrahl zum Schneiden hochschmelzender Metalle und Sonderwerkstoffe bearbeitet werden. Laseranlagen, die mit weniger als 100 W

Leistung sind gut zum Schneiden nichtmetallischer Werkstoffe wie Kunststoffe und Holz. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Laserstrahlenergie dokumentieren auch die Laseranlagen, die zum Schneiden und Schweißen rotationssymmetrischer Werkstücke.

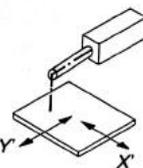
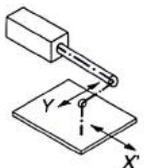
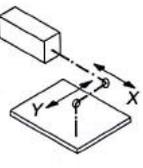
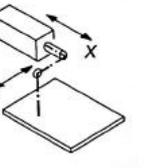
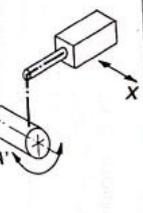
Werkstück				
bewegt	bewegt	stationär	stationär	bewegt
Lasergerät				
stationär	stationär	stationär	bewegt	bewegt
Bearbeitungsoptik				
stationär	bewegt	bewegt	bewegt	mitbewegt
 <p>X':Tisch Y':Tisch</p>	 <p>X':Tisch Y: Spiegel</p>	 <p>X: Spiegel Y: Spiegel</p>	 <p>X: Lasergerät Y: Spiegel</p>	 <p>A':Spannvorrichtung X: Lasergerät</p>
Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5

Bild 2.5 Laseranlagenkonzepte zur 2D-Bearbeitung

Abbildung 8 Laseranlagenkonzept zur 2D-Bearbeitung

### 3.3.3 3D-Anlagen

Der Anwendungsbereich von Laseranlagen zur 3D Materialbearbeitung sind vor allem auf das Schneiden Stahlblechteile oder Kunststoffteile, die einen Randbeschnitt hat. Das Laserschweißen vorgeformter Stahlbleche in eingeschränkten Arbeitsräumen ist eine Anwendung im Bereich Automobilbau.

„Soll beispielsweise ein dreidimensionales Werkstück geschnitten werden, muss der Laserstrahl nicht nur entsprechend der zu schneidenden Kontur bewegt, sondern im Interesse einer guten Schnittqualität immer senkrecht zur Werkstückoberfläche ausgerichtet werden. Dies erfordert bei einem ruhenden Werkstück eine Strahlführung mit normalerweise fünf Achsen, bei einer Laseranlage mit stationärer

Bearbeitungsoptik eine Werkstückhandhabung mit ebenso vielen Bewegungsachsen. Dabei sind drei Bewegungsachsen zur Positionierung notwendig (Hauptachsen), die weiteren Bewegungsachsen werden zur Orientierung von Werkzeug oder Werkstück benötigt (Nebenachsen).“ [3]

„Ausgehend von einem vorgegebenen Werkstückspektrum stellt sich die Aufgabe, eine geeignete 3D-Anlage aus einer Vielzahl denkbarer Anlagenkonzepte auszuwählen. Erste Auswahlkriterien sind Werkstückabmessungen und Werkstückgewicht. Sie geben den benötigten Arbeitsraum und die Grundstruktur einer Laserbearbeitungsanlage vor, beispielsweise, ob das Werkstück bewegt oder ob es im ruhenden Zustand bearbeitet wird. Weitere Abhängigkeiten sind aus der Laserbearbeitungsaufgabe abzuleiten. Für Laserschneiden und -schweißen sind bei gleichzeitig reduzierten Bahnpositionsabweichungen gegenüber Oberflächenbehandlungsverfahren höhere Bahngeschwindigkeiten gefordert.“ [3]

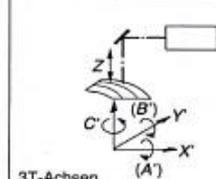
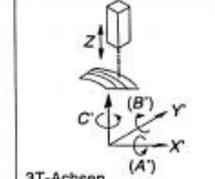
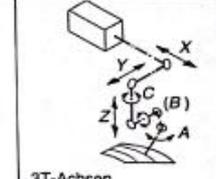
Werkstück			
bewegt	bewegt	bewegt	stationär
Lasengerät			
stationär	stationär	bewegt	stationär
Bearbeitungsoptik			
stationär	bewegt	mitbewegt	bewegt
 <p>Werkstückhandhabung durch Industrieroboter</p> <p>5(6)R-Achsen</p> <p>Variante 6</p>	 <p>3T-Achsen 1(3)R-Achsen</p> <p>Variante 7</p>	 <p>3T-Achsen 1(3)R-Achsen</p> <p>Variante 9</p>	 <p>3T-Achsen 2(3)R-Achsen</p> <p>Variante 10</p>
 <p>3T-Achsen 2R-Achsen</p> <p>Variante 8</p>		<p>Werkzeughandhabung mit Industrieroboter und</p> <p>a) externer Laserstrahlführung</p> <p>11 mit Teleskopauszug</p> <p>12 mit Knickgelenk</p> <p>13 mit Lichtleitkabel (Nd:YAG-Laser)</p> <p>b) interner Laserstrahlführung</p> <p>14 Knickarmroboter</p> <p>Varianten 11 12 13 14</p>	

Bild 2.12  
Laseranlagenkonzepte zur  
3D-Bearbeitung

Abbildung 9 Laseranlagenkonzept zur 3D-Bearbeitung



**Abbildung 10 Nd:YAG-Laseranlage**

Verwendet man bei der Konzeptvariante 6 die Werkstückhandhabung mittels Industrieroboter entspricht dies der Arbeitsweise an einem Laserhandarbeitsplatz.

### **3.4 Laseranlagentechnik**

Eine Laseranlage zur Materialbearbeitung sind nicht nur aus den Hauptbaugruppen Laserstrahlerzeuger, Strahlführung, Strahlfokussierung und Werkstückhandhabung, sondern wegen Laser Typ, der Bearbeitungsaufgabe und der angestrebten Arbeitsqualität sind andere Baugruppen auch notwendig, die als Funktionseinheiten in Abbildung 11 schematisch zusammengestellt sind. „Die zum Betrieb notwendigen Baugruppen einer Laseranlage sind:

- der Laserstrahlerzeuger mit Versorgungs- und Steuereinheit (Lasergerät),

Elemente der Laserstrahlübertragung (externe Optik) vom Laserstrahlerzeuger bis zum Werkstück (falls erforderlich):

- Strahlaufweitung,
- Zirkularpolarisation,
- Strahlführung,
- Strahlfokussierung (mit Düse und Prozessgaszuführung),
- Strahlformung,

Einrichtung(en) zur Überwachung/Diagnose der Laserstrahlparameter,

Aufnahmevorrichtung für das Werkstück,

Elemente der Strahlhandhabung und/oder Werkstückhandhabung (CNC-gesteuerte Linear- und/oder Drehachsen),

Versorgungseinrichtungen für Kühlung, Prozessgas, Luftspülung und Zusatzwerkstoff,

eine Auffang- bzw. Absaugeinrichtung für Werkstück, Dämpfe und Schlacken.“[3]

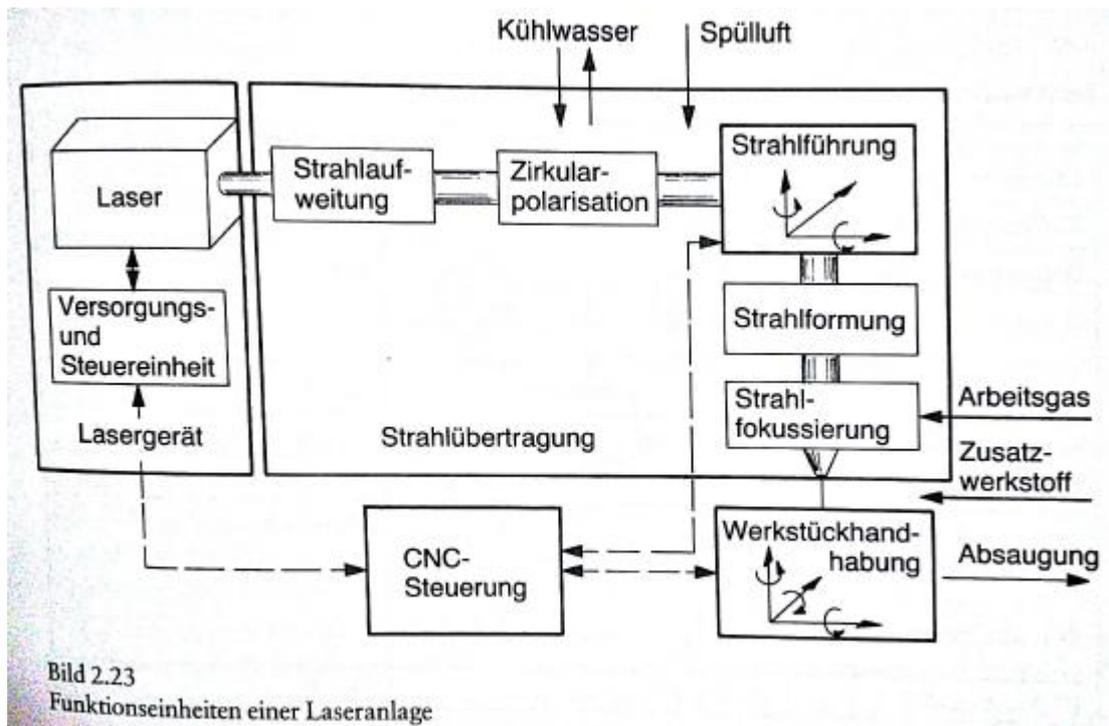


Abbildung 11 Funktionseinheiten einer Laseranlage

### 3.4.1 Laserstrahleigenschaften <sup>[2]</sup>

Der vom Lasergerät ausgesandte Laserstrahl weist in Abhängigkeit vom Lasertyp und der Gestaltung des optischen Resonators typische systembedingte Eigenschaften auf

- Die Laserstrahlung ist monochromatisch. Der Laserstrahl besteht aus elektro-magnetischen Wellen mit einer für den jeweiligen Laser spezifischen, genau definierten Wellenlänge. Die Laserstrahlen der meistens für die Materialbearbeitung verwendeten Laser liegen im infraroten Bereich (Wellenlänge größer 750 nm) und sind deshalb für das menschliche Auge unsichtbar.
- Die Laserstrahlung ist kohärent. Mit Kohärenz wird die Gleichphasigkeit der elektromagnetischen Wellen der Laserstrahlung beschrieben.
- Die Laserstrahlung ist in der Regel nicht polarisiert. Lasersysteme, deren Strahlengang mehrfach gefaltet ist, liefern jedoch linear polarisierte Strahlung, d.h.,

die Lage der Schwingungsebene des monochromatischen und kohärenten Lichts ist konstant.

Die Laserstrahlung ist nahezu parallel. Im Laser werden nur elektromagnetische Wellen verstärkt, die sich parallel zur optischen Achse bewegen. Der am Laser austretende Strahl verläuft daher nahezu parallel, jedoch mit der Tendenz, sich mit zunehmender Entfernung von der Strahlungsquelle aufzuweiten (Strahldivergenz).

Die Laserstrahlung hat keine konstante Intensität im Strahlquerschnitt. Die Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt wird als Mode (TEM = Transversaler Elektromagnetischer Mode) bezeichnet und wird vor allem durch den Aufbau des Lasers und die Art des Lasermediums bestimmt. Modenordnung und Laserstrahldivergenz bestimmen die Laserstrahlqualität.

Die Laserstrahlung ist gut fokussierbar. Die Leistungsdichte des Laserstrahls am Ausgang der Strahlquelle (bis  $10^3 \text{ W/cm}^2$ ) reicht nicht zur thermischen Materialbearbeitung aus. Durch Fokussierung des Strahls auf einen Brennpunktdurchmesser unter 0,5 mm wird die dazu notwendige große Leistungsdichte von  $10^5$  bis  $10^7 \text{ W/cm}^2$  erreicht.

Von der Strahldivergenz, der Strahllagestabilität und dem Strahldurchmesser hängen die Strahlübertragungs- und Fokussierungsmöglichkeiten ab. Ebenso von der Wellenlänge, die allerdings konstruktiv nicht verändert werden kann.

Auf der Grundlage der systembedingten Eigenschaften lassen sich die für den Bearbeitungsbetrieb maßgeblichen steuerbaren Laserparameter ableiten. Die maximale mittlere Laserausgangsleistung bestimmt im Wesentlichen das durchführbare Bearbeitungsverfahren. Die für die Materialbearbeitung notwendige Leistungsdichte des Laserstrahls ist über die Strahlleistung bzw. Pulsleistung und die Fokussierung in einem weiten Bereich steuerbar. In der Praxis werden die

steuerbaren Parameter, ausgehend von Erfahrungswerten, durch Versuche optimiert.

### 3.5 Anlagensteuerung

„Da die Laserbearbeitungsverfahren thermische Verfahren sind, hängt das Bearbeitungsergebnis besonders von der Wechselwirkungszeit mit dem Werkstoff ab. Für die Materialbearbeitung mit Laser ist deshalb die Ausstattung der Laserwerkzeugmaschine mit einer laserspezifischen Steuerung erforderlich, die zusätzlich zur Strecken- und Bahnsteuerung mittels rechnernumerischer Steuerung (CNC) über eine Laserleistungssteuerung verfügt.“ [3] Nach Betriebsablauf kann die Laseranlagensteuerung auch mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) verwendet werden. Bild Abbildung 12 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Laseranlagensteuerung.

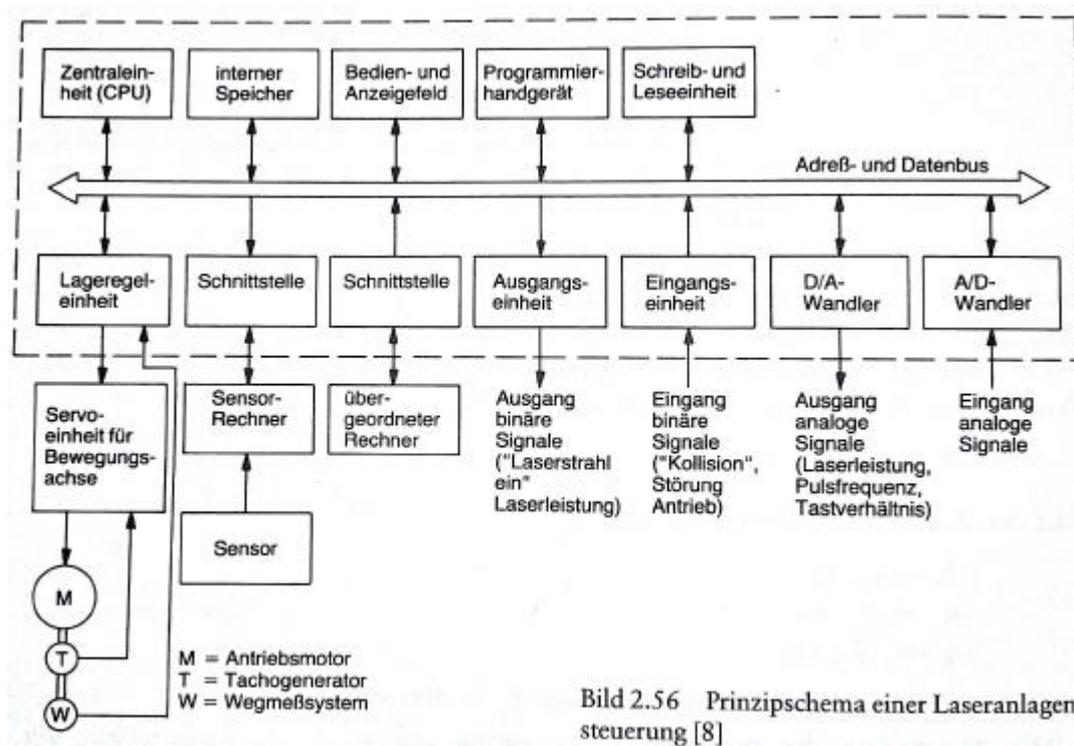


Bild 2.56 Prinzipschema einer Laseranlagensteuerung [8]

Abbildung 12 Prinzipschema einer Laseranlagensteuerung

„Die Aufgaben der zentralen Informationsverarbeitung in der Laseranlagensteuerung sind die gleichen wie beispielsweise bei CNC-Werkzeugmaschinen- oder Industrierobotersteuerungen:

- Steuerung des Bedien- und Anzeigefeldes,
- Programmspeicherung und -Verwaltung,
- Erzeugung von Bewegungssignalen durch Interpolation und gegebenenfalls Koordinatentransformation,
- Regelung der Bewegungsachsen,
- Ein- und Ausgabe der Daten zur Anlagenperipherie.

Die laserspezifischen Funktionen, um vor und während der Materialbearbeitung sämtliche Laser- und Anlagenfunktionen zu steuern und zu überwachen, bestehen in folgenden Aufgaben:

- Bahnsteuerung von Bearbeitungskopf/Werkstück,
- Abstandsregelung des Bearbeitungskopfes,
- Steuerung der Strahlleistung“ [3]

### **3.6 Grundaufbau eines Festkörperlasers**

„Durch die sich an den Enden des Lasermaterials befindlichen Spiegel wird ein Teil des Laserlichts hin und her reflektiert, so dass immer mehr Zwischenzustände abgerufen werden. Es genügen also wenige Photonen, die bei spontanen Übergängen entstehen, den Prozess der induzierten Emission einzuleiten. Die dabei entstehenden Photonen induzieren ihrerseits wieder neue Übergänge. Dies bedeutet: der Prozess setzt sich lawinenartig fort. Durch eine mehrfache Reflexion an den Spiegeln wird dieser Vorgang weiter verstärkt.

Da der Spiegelabstand ein Vielfaches der Wellenlänge des Laserlichts beträgt, entsteht zwischen den Spiegeln eine stehende Lichtwelle. Ein Teil dieses kohärenten, nahezu parallelen Lichts kann die Anordnung durch den sich auf einer Seite befindenden halbdurchlässigen Spiegel verlassen. Dieser Grundaufbau auch optischer Resonator genannt, liegt allen Lasern zugrunde, so dass im weiteren Verlauf lediglich auf die Anregungsmöglichkeiten verschiedener Lasertypen und deren Besonderheiten eingegangen wird.“ [2]

### **3.6.1 Nd:YAG-Laser (Variante 022) [2]**

Der Grundaufbau eines Yttrium-Aluminium-Granat-Lasers ist mit dem eines Rubinlasers (Abbildung 13) zu vergleichen. Die laseraktiven  $Y^{3+}$ -Ionen und die  $Nd^{3+}$ -Ionen sind im laseraktiven Material in einer Konzentration von 0,5% bis 3,0% vorhanden. Die Laser Übergänge finden zwischen zwei angeregten Zuständen nach dem unten abgebildeten Termschema statt.

Im Impulsbetrieb erfolgt das Pumpen des laseraktiven Materials in den energiereicheren Zustand mittels einer Blitzlampe, bei kontinuierlichem Betrieb mittels einer Bogenlampe.

Damit das laseraktive Material gleichmäßig bestrahlt wird, werden die stabförmigen Lampen in der Brennpunktlinie eines elliptischen Zylinders so angeordnet, dass das von den Lampen ausgehende Licht an den mit Gold oder Aluminium beschichteten Gehäusewänden reflektiert wird, und ebenfalls das laseraktive Material trifft (Bild 1.16).

Der Leistungsbereich von industriell verwendbaren Festkörperlasern ist derzeit noch auf eine Leistung von ca. 1,2 kW begrenzt. Der Nd:YAG-Laser wird hauptsächlich in der Feinwerktechnik eingesetzt.

Bild 1.15 Termschema des Nd:YAG-Lasers

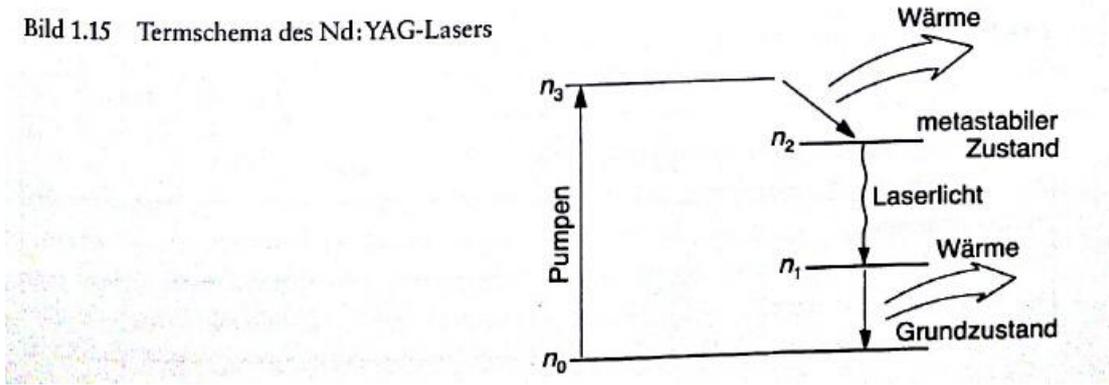


Abbildung 13 Termschema des Nd: YAG Lasers

### 3.6.2 Rubin Körperlaser (Variante 022) [2]

Die erste experimentelle Realisierung eines Lasers gelang T. H. Maiman 1960 mit einem blitzlampengepumpten Rubin. Heute ist dieser Laser allerdings nur noch von historischer Bedeutung und soll hier auch aus diesem Grund erwähnt werden. Der Rubin ist ein Edelstein aus der Familie der Korunde ( $Al_2O_3$ , auch Saphir genannt), der aufgrund eines geringen Anteils von Chrom eine rötliche Verfärbung aufweist. Für die Verwendung als Laserkristall sind im Rubinkristall bis zu 1 % der  $Al_{3+}$ -Ionen des Saphir-Kristallgitters durch  $Cr_{3+}$ -Ionen ersetzt. Das Energiespektrum (ausgedrückt in so genannten Wellenzahlen  $\nu = 1 / \lambda$ , einer in der Spektroskopie üblichen Energieeinheit) dieser Cr-Ionen ist in Bild 2.28 wiedergegeben. Beim Rubinlaser handelt es sich also um einen reinen 3-Niveaux-Laser.

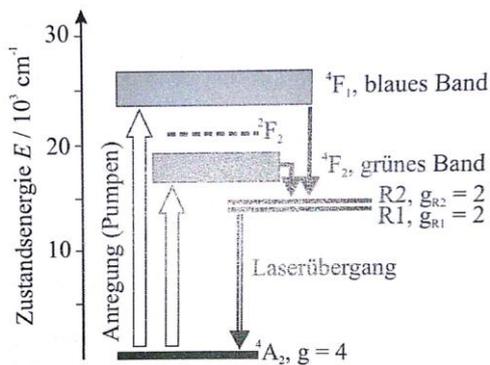
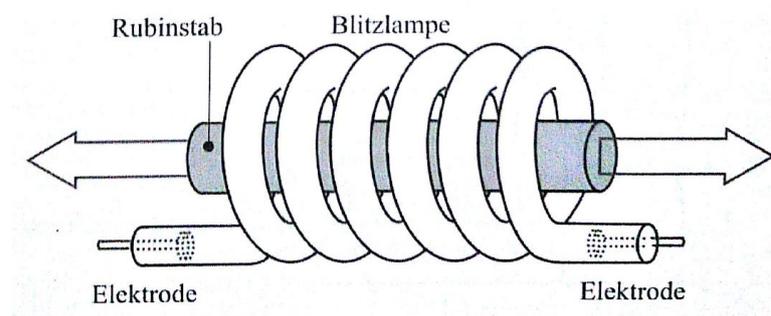


Abbildung 14 Energieschema des Rubinlasers

Die optische Anregung des Rubinlasers erfolgt über die zwei spektroskopisch mit  ${}^4F_2$  und  ${}^4F_1$  bezeichneten Absorptionsbänder im grünen und blauen Spektralbereich. Die Absorptionsbänder sind breit genug, um die Anregung mittels Blitzlampen zu ermöglichen. Die Anregung des ersten Rubinlasers erfolgte mit einer Blitzlampe, welche spiralförmig um den Rubinstab angeordnet war, so wie dies in Bild 2.29 skizziert ist. Die beiden polierten Endflächen des Rubinstabes von Maiman waren teildurchlässig verspiegelt und bildeten so den optischen Laserresonator.



**Abbildung 15 Aufbau des ersten Rubinlasers**

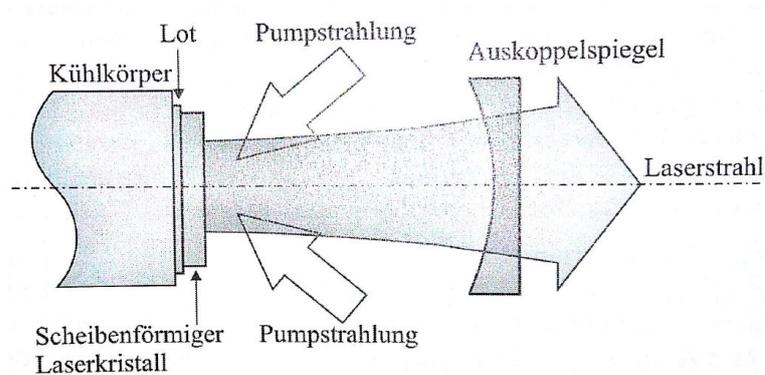
Wegen der höheren Boltzmannbesetzung im tiefer liegenden Laserniveau R1 erreicht der Laserübergang, der vom Zustand R1 ausgeht, die Inversionsbedingung vor dem Übergang ab dem Niveau R2. Die Laseremission erfolgt somit immer über das Niveau R1 und weist eine Wellenlänge von 694,3 nm auf.

Die Entartungen der beteiligten Energiezustände kommen dem Laserbetrieb vereinfachend zugute. Da der Grundzustand im Gegensatz zur zweifachen Entartung des oberen Laserniveaus R1 sogar vierfachen entartet ist, muss die totale Besetzung in R1 nur die Hälfte der totalen Besetzung des Grundzustandes betragen, um die Inversionsbedingung zu erreichen.

Ähnlich wie der Rubinlaser wurden später auch andere Festkörperlaser aufgebaut, insbesondere - zumindest in den Anfängen - der Nd:YAG-Stablaser.

### 3.6.3 Yb: YAG-Laser<sup>[2]</sup>

Die Erzeugung guter Strahlqualität in Stab- und Stablasern wird durch die quer zur Strahlausbreitungsrichtung inhomogene Temperaturverteilung im laseraktiven Medium stark beeinträchtigt. Diesbezüglich bietet der Scheibenlaser einen ganz entscheidenden Vorteil. Wie in Abbildung 14 dargestellt, besteht hier das Lasermedium aus einer dünnen Scheibe von typisch 0,1 bis 0,3 mm Dicke, die in Richtung der Strahlachse flächig gekühlt wird. Dies hat den großen Vorteil, dass quer zum Strahl die Temperaturgradienten und die damit verbundenen inhomogenen Veränderungen der optischen Eigenschaften stark vermindert werden.



**Abbildung 16 Schematischer Aufbau eines Lasers**

Das günstige Verhältnis von gekühlter Stirnfläche zu Volumen erlaubt zudem eine sehr effiziente Kühlung des Laserkristalls. Dazu wird die Scheibe auf eine wassergekühlte Wärmesenke gelötet oder geklebt. Zur Vermeidung von Spannungen und Verformungen sollten dabei die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kühlkörper und Lot auf den des Laserkristalls abgestimmt sein. Die gekühlte Rückseite der Laserkristallscheibe dient gleichzeitig als Resonatorspiegel. Der Laserstrahl wird also in seinem Doppeldurchgang durch die dünne Scheibe verstärkt.

### **3.6.3 Eigenschaften von Laserlicht**

„Das Laserlicht zeichnet sich durch eine Anzahl besonderer Eigenschaften aus. Das Lichtbündel eines Lasers ist nahezu parallel, so dass beim Laserlicht die Winkeldivergenz sehr gering ausfällt. Das Laserlicht besteht nur aus Licht einer Wellenlänge (entsprechend dem Übergang von einem Energiezustand zu einem tieferen Energiezustand), d.h., beim Laserlicht handelt es sich um monochromatisches Licht. Fokussiert man das Lichtbündel auf einen Fleck von geringer Größe, so erhält man eine sehr hohe Energiedichte. Dies bedeutet, mit einem fokussierten Laserstrahl lassen sich auf Werkstückoberflächen sehr hohe Temperaturen erzielen.“ [2]

Die Lichtwellen sind zeitlich und räumlich gleich. Das bedeutet, dass einzelne Wellen von Lichtbündel gleiche Phasenbeziehungen haben, und zu verschiedenen Zeiten in gleicher Entfernung zum Ausgangspunkt ist es zeitliche gleich und an verschiedenen Stellen zur gleichen Zeit ist es räumliche gleich.

### **3.7 Technik des Laserschneidens**

Das Laserschneiden ist ein thermisches Trennverfahren, bei dem der Laserstrahl als Werkzeug dient. Bei allen abtragenden Bearbeitungsverfahren wird der Werkstoff, beginnend an der Oberfläche, durch thermische oder chemische Energieumsetzung in Partikel aufgelöst, geschmolzen oder verdampft.

### 3.7.1 Systematik der Fertigungsverfahren

Abbildung 11 zeigt die Gliederung von Laserschneiden in die Systematik der Fertigungsverfahren.

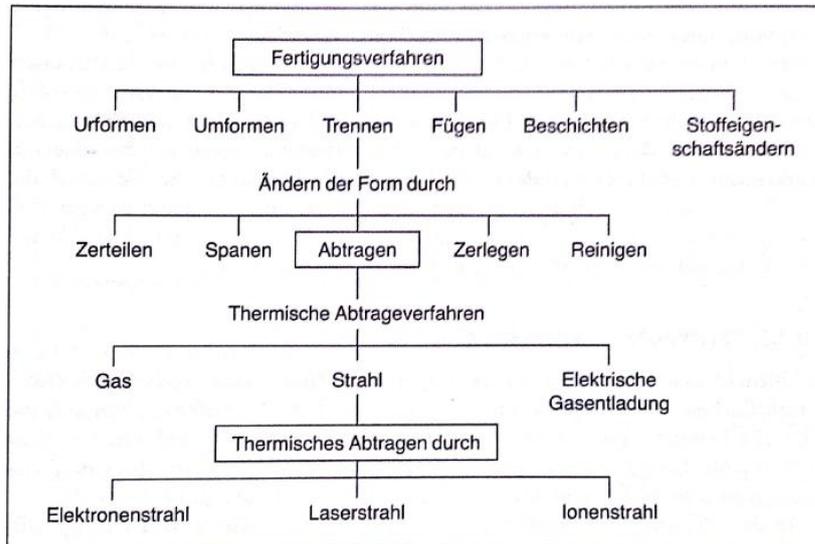


Bild 5.1 Ordnung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

### Abbildung 17 Ordnung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

### 3.7.2 Laserschneiden

Das Laseraggregat kann den fast parallelen Lichtstrahl mit einer Energieverteilung kann. Die eingebrachte hohe Leistungsdichte führt zum Erhitzen und schnellen Schmelzen des Werkstoffes. Je nach Entfernungsmechanismus des Werkstoffs aus der Schnittfuge sind 3 Verfahrensvarianten mit dem Laser möglich:

- Sublimierschneiden,
- Brennschneiden,
- Schmelzschneiden.

Die Schneidverfahren sind nach dem zu bearbeitenden Werkstoff ausgewählt.

### **3.7.3 Sublimierschneiden (Variante 031) <sup>[2]</sup>**

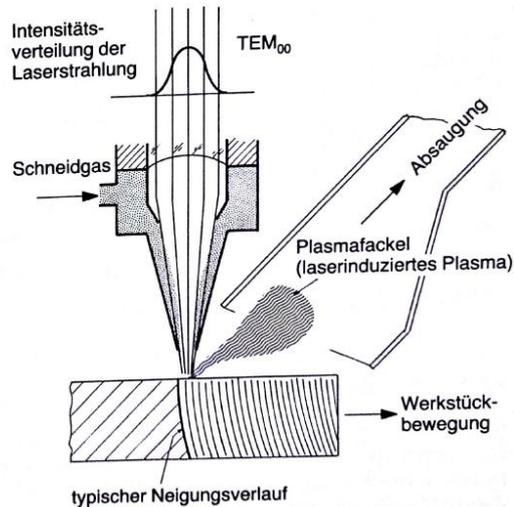
„Beim Sublimierschneiden wird der Werkstoff durch die Einwirkung des Laserstrahls im Bereich der Schnittfuge verdampft (Bild 5.2). Es werden Werkstoffe bearbeitet, die keinen ausgeprägten bzw. sehr kleinen Temperaturbereich für den schmelzflüssigen Zustand aufweisen. Solche Werkstoffe sind: Holz, Papier, Keramik und Kunststoffe. Bei diesen Werkstoffen muss das Verbrennen, also eine exotherme Reaktion, durch einen Schutzgasstrom verhindert werden.

Bei Metallen ist eine sehr hohe Laserintensität erforderlich, die durch Pulsen erreicht wird, bei der zugleich kleine Wärmeleitungsverluste auftreten sollen. Der Bereich der schmelzförmigen Phase, im Gebiet der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück, wird dabei auf ein Minimum reduziert. Bei dickeren Werkstücken ist dieses Verfahren ungünstig, weil der verdampfte Werkstoff die Kapillare wieder zum Schließen bringen kann. Allgemein kann gesagt werden, dass die Schnittkanten und -flächen gute geometrische Werte aufweisen. Die Flächen weisen dagegen optische Mängel (z. B. Ruß, Brandflecken) auf.

#### **3.7.3.1 Merkmale des Sublimierschneidens**

Es entsteht fast keine Schmelze. Mit Hilfe des Zusatzgases ergeben sich glatte Schnittflächen. Die Schnittflächen weisen nicht die typische Riefenstruktur auf, wie sie beim Schmelz- und Brennschneiden vorliegen. Die hohe und meist gepulste eingebrachte Energie fördert eine sehr schmale WEZ. Die Wärmebelastung des Bauteils ist sehr gering und ein Verziehen des Bauteils kaum zu beobachten.

Bild 5.2  
Lasersublimierschneiden mit  
koaxialer Schneidgaszufuhr



**Abbildung 18 Lasersublimierschneiden mit koaxialer schneidgaszufuhr**

An den schnittkanten entsteht keine Oxidation. Für weitere Arbeitsgänge fällt eine Nachbehandlung weg. Als ungünstig erweist sich für das Sublimierschneiden:

- Die hohe Energieeinbringung, die durch Pulsen gemildert wird.
- Die Verfahrensgeschwindigkeiten sind im Vergleich zum Schmelzschnneiden sehr gering.
- Die Materialdicke liegt bei metallischen Werkstoffen unter 1 mm.
- Eine unerwünschte Nebenerscheinung ist die Plasmawolke, die bis zum endgültigen Durchbrennen des Werkstoffes aus dem Einstichloch herausdampft, wenn der Trennvorgang innerhalb des Bauteils beginnt. Der Werkstoff erreicht dabei schlagartig den 4. Aggregatzustand. Solche «Wolken» beschlagen die Fokussierlinse, die eventuell durch die Metaldämpfe Risse bekommen kann (Abbildung 19).

Der Sublimiereffekt kann generell eintreten. Aus diesem Grunde ist eine Absauganlage, die die gefährlichen Metaldämpfe abzieht, immer in Betrieb zu halten.

Absauganlagen mit Aktivkohlefilter eignen sich dazu am besten.“ [2]

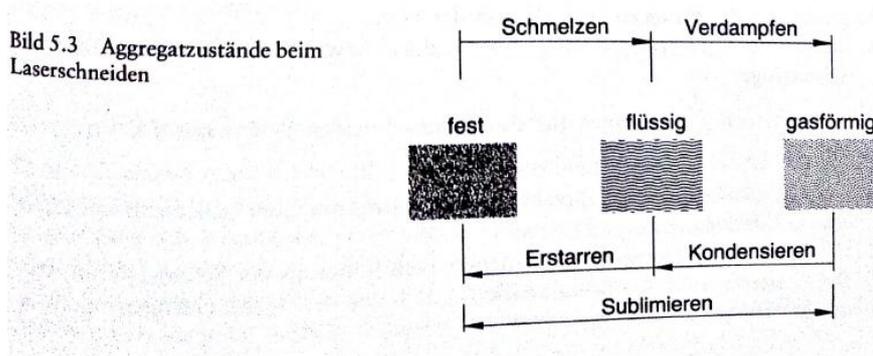


Abbildung 19 Aggregatzustände beim Laserschneiden

### 3.7.4 Brennschneiden <sup>[2]</sup>

„Dieses Verfahren wird fast ausschließlich zum Trennen von Metallen eingesetzt. Das Zusatzgas ist Sauerstoff. Die exotherme Reaktion erbringt eine höhere Wärmeleistung als der Laserstrahl. Die erreichbaren Verfahrensgeschwindigkeiten liegen um den Faktor 6 bis 8 über denen des Schmelzscheidens.

#### 3.7.4.1 Phasen des Brennschneidvorgangs

Brennschneiden von Kohlenstoffstählen erfolgt in nachstehenden Schritten:

1. Vorwärmen des Stahles,
2. Verbrennen der Fe- und C-Anteile,
3. Ausblasen der flüssigen Schlacke aus der Fuge,
4. durch die Vorwärtsbewegung des Strahles bzw. Werkstückes entsteht die Schnittfuge.

Die allgemeinen Bedingungen für das Brennschneiden gelten nur für unlegierte Stähle:

- Der Werkstoff muss eine chemische Verbindung mit dem Sauerstoff eingehen, eine Oxidation bilden.
- Die Entzündungstemperatur des Metalls muss höher als der Schmelzpunkt sein.
- Der Schmelzpunkt des Metalloxides muss unter der Verbrennungstemperatur des Metalls sein.
- Das gebildete Oxid muss leichtflüssig sein.
- Die Verbrennungswärme sollte möglichst groß sein.
- Der Werkstoff sollte eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen.

#### **3.7.4.2 Bereich des Brennschneidens**

Die werkstofftechnische Grenze ergibt sich aus Schmelzlinie und Zündkurve an der Stelle, an der sie sich kreuzen (Bild 5.5). Die praktische Schneidgrenze liegt bei einem C-Gehalt von 1,5 % bei unlegiertem Stahl. Die Gründe für die Differenz zur theoretischen Schneidgrenze sind:

- Bei hohem C-Gehalt liegt die Entzündungstemperatur über dem Metallschmelzpunkt,
- Begleit- und Legierungselemente beeinflussen den Schmelzpunkt.

In der Materialbearbeitung mit dem Laser wird beim Schneiden überwiegend das Brennschneiden angewendet. Es kann größere Blechdicken als beim Schmelz- oder Sublimierschneiden erreicht werden. Außerdem sind höhere Schneidgeschwindigkeiten möglich. Als typische Nachteile sind zu sehen:

- Durch den Einsatz von Sauerstoff weisen die Schnittkanten eine Oxidschicht auf.
- Das turbulente Schmelzbad führt zu stärkeren Ausbildungen von Riefen auf der Schnittfläche als beim Schmelzschneiden.“ [2]

### 3.7.5 Schmelzschnneiden <sup>[2]</sup>

„Beim Schmelzschnneiden muss die Zeit berücksichtigt werden, die der Werkstoff benötigt, eine Schmelze zu bilden. Dieser Schmelzanteil wird durch die Schnittfuge ausgeblasen. Als Zusatzgase verwendet man meistens die Inertgase Stickstoff (N<sub>2</sub>) oder Argon (Ar).

Der CO<sub>2</sub>-Laser bietet eine sanfte Energieumsetzung durch den TEM<sub>00</sub>-Mode oder den erforderlichen cw-Betrieb. Typische Werkstoffe sind Glas und Kunststoffe, die ein amorphes Verhalten haben, und bestimmte Metalle. Bei hochschmelzenden Werkstoffen aller Art ist man auf eine hohe örtliche Energiedichte (TEM<sub>00</sub>) angewiesen. Der kurzzeitig erschmolzene Werkstoff wird in solchen Fällen, durch die Unterstützung eines neutralen Gasstrahles, aus der Schnittfuge geblasen. Reines Schmelzen der Werkstoffe erfordert sehr sorgfältiges Arbeiten, weshalb auch das Laserschweißen höhere technische Ansprüche stellt. Um die Schnittfuge gratfrei zu halten, muss der Gasdruck entsprechend hoch sein.

#### 3.7.5.1 Merkmale des Schmelzschnneidverfahrens

Das standardisierte Schmelzschnneiden weist folgende Merkmale auf:

- Dem Werkstoff muss nicht die Zeit zum Verdampfen gegeben werden, deshalb kann mit höheren Schnittgeschwindigkeiten als beim Sublimierschnneiden gefahren werden.
- Inerte Gase, also Edelgase wie Ar, bilden keine Oxidation an der Schnittkante.
- Im Vergleich zum Brennschnneiden ist die Schnittgeschwindigkeit geringer.
- Als Metalle kommen bevorzugt hochlegierte Stähle und sämtliche NE-Metalle (besonders Aluminium) in Betracht. Um die Schnittfugenqualität zu verbessern, muss das Ausblasen des Werkstoffes gezielt erfolgen.“ [2]

### **3.8 Beurteilungskriterien für das Laserschneiden**

„Das wichtigste Kriterium ist die Beurteilung für die Schnittfläche wie bei allen anderen thermischen Abtragsverfahren. Neben der Schnittfläche kann die entstehende Form mit der Zeichnungsangabe verglichen werden. Daneben ist es auch möglich, den thermischen Einflussbereich, von der Schnittfläche beginnend, ins Werkstückinnere zu beurteilen.

Die bearbeiteten Werkstücke sollten möglichst ohne große Form- und Maßabweichungen angefertigt werden. Formabweichungen der Schnittflächen sollten so kleingehalten werden, dass Nacharbeit nicht notwendig und die Weiterverarbeitung möglich ist. Die Güte der Schnittfläche wird durch die Rauhtiefen wesentlich mitbestimmt.“ [3]

Nach DIN 2310 sind für die Schnittflächen folgende Kriterien festgelegt:

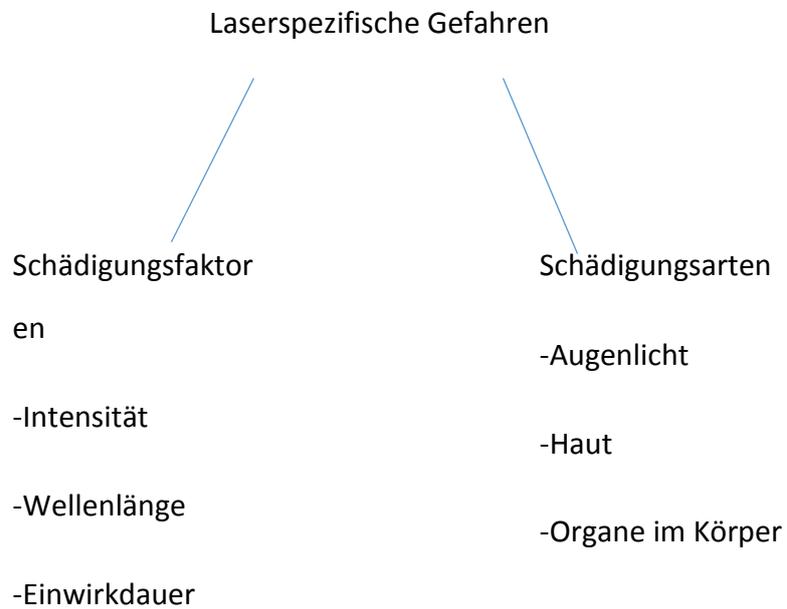
- Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz,
- Rillennachlauf und Abschmelzradius,
- gemittelte Rauhtiefe.

Die geometrisch ideale Oberfläche ist durch den Konstrukteur festgelegt werden. Die Summe ver Abweichungen von der Istoberfläche wird als Gestaltungsabweichung gezeigt.

### **3.9 Arbeitsschutz beim Umgang mit dem Laser**

Wegen menschliches oder technisches Versagen entstehen Unfälle. Die können dann vermieden werden, wenn die Gefahrenquellen und Gefahrenstellen bekannt sind (Abbildung 20), nur qualifizierte und geschulte Fachkräfte können mit einer Laseranlage verantwortungsvoll umgehen. Unfallverhütungsvorschriften (Abbildung

21) kennzeichnen das durch die zugängliche Laserstrahlung vorhandene Gefährdungspotential. Der Laserstrahl ist die primäre Gefahr. Beim Bearbeitungsprozess entstehen zusätzliche Gefahren.



**Abbildung 20 Ursache und Wirkung von Laserstrahlung**



**Abbildung 21 Übersicht möglicher Gefahrenbereich bei Laseranlagen**

### 3.9.1 Laserwarnzeichen

Unterschiedliche Warnzeichen zeigen unterschiedliche gefährliche Bereiche und Arten der Gefährdung, um die Sicherheit am Arbeitsplatz zu bestimmen (Abbildung 22).

Laserwarnzeichen sind in gleichseitigen Dreiecks und sind in den Farben Gelb und Schwarz dargestellt. Die Schutzvorrichtungen, Hinweisschilder und Sicherheitseinrichtungen dürfen niemals entfernt werden.

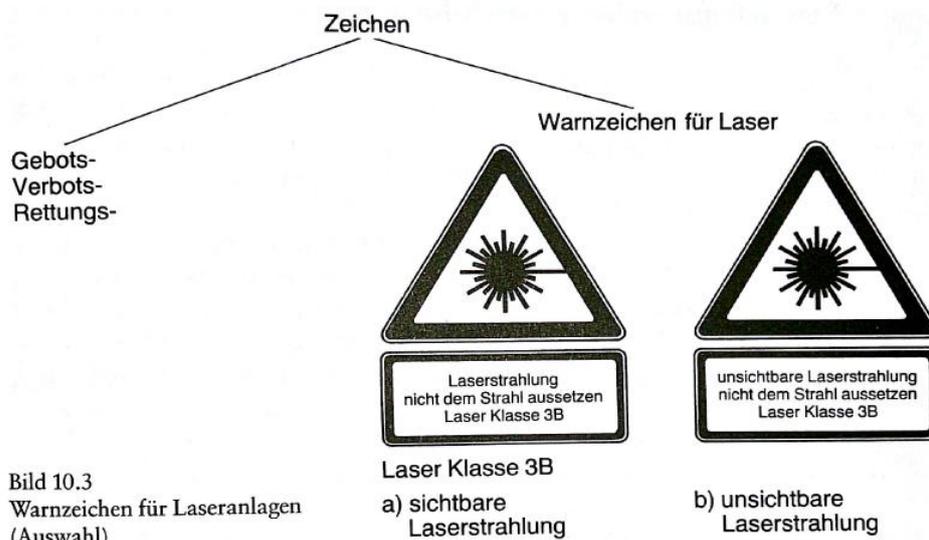


Bild 10.3  
Warnzeichen für Laseranlagen  
(Auswahl)

Abbildung 22 Warnzeichen für Laseranlagen

### 3.10 Handhabungsgerät

Bei letztem Schritt werden die Rohre vom dem Rollbahn zum Transporter oder anderem Ort befördert. Je nach der oben genannten Unterteilung und den Definitionen von jeden Geräten kann das Gerät, das wie Manipulatoren funktioniert, bei dieser Aufgabe angewendet werden. Um die Rohre zu transportieren in der Fabrik, sind Brückenkran und Manipulator dafür geeignet.

### **3.10.1 Brückenkran**

Normalerweise hat ein Stahlrohr, der ein Außendurchmesser von 200mm und eine Wanddicke von 20mm und eine Länge von 10m haben, das Gewicht von knapp 900kg. Für diesen Fall ist Brückenkran geeignet. Damit können die Stahlrohre zu irgendwo in der Fabrik transportiert werden. Die Bewegungsbahnen sind auf den Dachbalken und brauchen keinen Platz auf dem Grund. Um die Stabilität beim Transport zu steigern, kann der Lasthaken zu einem speziellen für Rohre geeignetem Lasthaken wechseln.

### **3.10.2 Manipulator**

Die andere Lösung ist Manipulator. Im Gegensatz zum Brückenkran ist der Manipulator eine Bahn auf dem Grund notwendig. Und der kann die Rohre zu irgendwo in der Fabrik liefern nicht. Weil die Bahn auf den Dachbalken nicht ist, nimmt die Anforderung für die Struktur von der Fabrik ab. Der Lasthaken kann auch wechseln, um die Tätigkeit vom Transport zu erhöhen.

## **4 Gestaltung einer Anlage**

- „Bewertung im morphologischen Kasten festgelegten optimierten Lösung mit Hilfe der Nutzwertanalyse (od. eines anderen geeigneten Verfahrens).
- Kriterien sind i.d. Regel die Kosten sowie die Funktions- und Betriebssicherheit
- Weitere, kundenspezifische Wünsche können ergänzt werden.
- Verhinderung der Durchsetzung erster innovativer Lösungsansätze, die den Kriterien nicht standhalten.
- Finden einer optimalen Lösung unter den oben Rahmenbedingen (endgültiges Lösungskonzept). „ [aus Notiz in Vorlesung]

Varianten			
Bearbeitungsprozess	Variante 1	Variante 2	Variante 3
01 Anlage	Rohr stationär  Laserspindel bewegt	Rohr bewegt  Laserspindel stationär	
02 Festkörperlaser	Rubin-Laser	Nd:YAG-Laser	Yb:YAG-Laser
03 Laserschneiden	Sublimierschneiden	Brennschneiden	Schmelzschneiden
04 Handhabung und Transport	Brückenkran	Manipulator	

**Tabelle 2 Lösungsvarianten für jede Herstellungskomponente**

## 4.1 Auswahl von Bewertungskriterien

Bei der Bearbeitungsverfahren kann es als Kombinieren von unterschiedlichen Maschinen bezeichnet werden. Normalerweise gibt es viele Bewertungskriterien, die geeignet für verschiedene Stelle und Fälle sind. In meiner Bachelorarbeit werden die Bewertungskriterien zum Denken gebracht. Dann werden die vorher genannten Kriterien miteinander verglichen. Wenn ein Kriterium als das Andere wichtiger ist, ist

es eine 2, wenn es nicht wichtiger ist, ist es eine 0 und wenn gleicher Gewichtung hat, ist es eine 1. Das Ergebnis des Vergleiches wird in Form Matrix gezeigt.

Sicherheit	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Personenschutz
Gebrauch	Betrieb, Funktion der Anlagen
Instandhaltung	Wartung, Inspektion, Instandsetzung
Anschaffungskosten	Aufwand für Kauf der Anlage
Betriebskosten	Personalkosten, Stromkosten

**Tabelle 3 Auswertungskriterien**

Bewertungskriterien	Sicherheit	Gebrauch - Funktion	Instandhaltung	Anschaffungskosten	Betriebskosten	Summe	Gewichtung
<b>Sicherheit</b>	1	2	2	2	2	9	100
<b>Gebrauch - Funktion</b>	0	1	2	2	2	7	78
<b>Instandhaltung</b>	0	0	1	0	0	1	11
<b>Anschaffungskosten</b>	0	0	2	1	0	3	33
<b>Betriebskosten</b>	0	0	2	2	1	5	56

**Tabelle 4 Bewertungsmatrix**

## 4.2 Grund für Vergleich der Bewertungskriterien

Erster Linie ist die Sicherheit, weil sie im Produktionsprozess wichtigsten ist. Aber unter diesem Thema ist es nur die Zusammensetzung der Anlage. Die Sicherheit ist nicht für die ganze Fließstrasse, sondern für einzelne Maschine. Darum wird das Bewertungskriterium „Sicherheit“ nicht als Bewertungspunkt in der Skala eingegeben. Nach der Sicherheit wird Funktion übergelegt. Wenn eine Maschine in Fließstrasse eingesetzt werden kann, muss sie die angeforderten Aufgaben schaffen können. Danach sind die Kosten in Gedanken. Die Kosten enthalten zwei Teile, das erste ist der Aufwand für Kauf der Anlagen, das zweite sind die Ausgaben für Betrieb. Auf lange Sicht werden Betriebskosten mehr als Anschaffungskosten. Deshalb Betriebskosten sind wichtiger als Anschaffungskosten. Während des Betriebs sind Wartung, Inspektion und Instandsetzung Pflichten. Deswegen ist die Instandhaltung das letzte. Aus der vorhergehenden Bewertungsmatrix erschließt sich folgende Reihenfolge.

Bewertungskriterien	Gewichtung
<b>Gebrauch – Funktion</b>	100
<b>Betriebskosten</b>	71
<b>Anschaffungskosten</b>	43
<b>Instandhaltung</b>	14

Tabelle 5 Gewichtung von jeden Bewertungskriterien

## 4.3 Bewertung von allgemeinen Lösungsvarianten

Die Tabelle sind die Punkte für Nutzwertanalyse und die entsprechenden Punkte in Richtlinie.

Wertskala			
Nutzwertanalyse		Richtlinie VDI 2225	
Pkt.	Bedeutung	Pkt.	Bedeutung
0	absolut unbrauchbare Lösung	0	unbefriedigend
1	sehr mangelhafte Lösung		
2	schwache Lösung	1	gerade noch tragbar
3	tragbare Lösung		
4	ausreichende Lösung	2	ausreichend
5	befriedigende Lösung		
6	gute Lösung mit geringen Mängeln	3	gut
7	gute Lösung		
8	sehr gute Lösung	4	sehr gut (ideal)
9	über die Zielvorstellung hinausgehende		
10	Ideallösung		

**Tabelle 6 Wertskala**

Folgend werden die allgemeinen Lösungsvarianten in der Werteskala nach VDI 2225 mit Punktevergabe von 0 bis 4 bewertet. Nach der Gewichtung von oben ausgewählten Bewertungskriterien gibt es auch entsprechende Gewichtung für jede Bewertungskriterien in der Werteskala, wie unten gezeigt:

**F – Funktion (7 – fach)    BK – Betriebskosten (5 - fach)AK – Anschaffungskosten (3 - fach)**

**IH – Instandhaltung (1 - fach)    W – Wertzahl ( $\Sigma(F + BK + AK + IH)$ )**

<b>Anlage</b>					
<b>Variante</b>	<b>F</b>	<b>BK</b>	<b>AK</b>	<b>IH</b>	<b>W</b>
<b>Laserspindel bewegt</b>	$7 * 4 = 28$	$5 * 4 = 20$	$3 * 2 = 6$	$1 * 2 = 2$	56
<b>Rohr bewegt</b>	$7 * 3 = 21$	$5 * 2 = 10$	$3 * 4 = 12$	$1 * 4 = 4$	47
<b>Festkörperlaser</b>					
<b>Variante</b>	<b>F</b>	<b>BK</b>	<b>AK</b>	<b>IH</b>	<b>W</b>
<b>Rubin-Laser</b>	$7 * 2 = 14$	$5 * 4 = 20$	$3 * 3 = 9$	$1 * 3 = 3$	46
<b>Nd:YAG-Laser</b>	$7 * 4 = 28$	$5 * 3 = 15$	$3 * 2 = 6$	$1 * 2 = 2$	51
<b>Yb:YAG-Laser</b>	$7 * 3 = 21$	$5 * 3 = 15$	$3 * 2 = 6$	$1 * 2 = 2$	44
<b>Laserschneiden</b>					
<b>Variante</b>	<b>F</b>	<b>BK</b>	<b>AK</b>	<b>IH</b>	<b>W</b>
<b>Sublimierschneiden</b>	$7 * 4 = 28$	$5 * 2 = 10$	$3 * 3 = 9$	$1 * 3 = 3$	50
<b>Brennschneiden</b>	$7 * 3 = 21$	$5 * 3 = 15$	$3 * 3 = 9$	$1 * 3 = 3$	43
<b>Schmelzschnneiden</b>	$7 * 4 = 28$	$5 * 3 = 15$	$3 * 3 = 9$	$1 * 3 = 3$	55
<b>Handhabung und Transport</b>					
<b>Variante</b>	<b>F</b>	<b>BK</b>	<b>AK</b>	<b>IH</b>	<b>W</b>
<b>Brückenkran</b>	$7 * 3 = 21$	$5 * 2 = 10$	$3 * 1 = 3$	$1 * 2 = 2$	36

<b>Manipulator</b>	$7 * 2 = 14$	$5 * 2 = 10$	$3 * 3 = 9$	$1 * 3 = 3$	36
--------------------	--------------	--------------	-------------	-------------	----

**Tabelle 7 Ausrechnung der Punkte von Bewertungskriterien**

Je nach dem Ergebnis des Vergleiches wird die Fließstraße für Komplettbearbeitung wie folgend ausgelegt:

## 4.4 Grund für Auswahl der Lösungsvariante

### Beim Anlage

Bei diesem Prozess sind die Anlagen, die Laser erzeugen können, für beide Varianten gleich. Die Unterschiede liegen dabei, dass welche Komponente, Laserspindel oder Rohr bewegen. Im Vergleich zu die 2 Varianten mit Industrie ist Laserspindelbewegen günstiger, wenn sie gleiche Anforderung erreichen können. Nach der oberen Bewertung ist Variant 011, Laserspindelbewegen am besten. Laserspindelbewegen ist flexibler und genauer. Schneiden Verfahren auf einem Rohr ist Feinbearbeitung, deshalb ist Genauigkeit am wichtigstem.

### Beim Festkörperlaser

Bei Festkörperlaser haben diese 3 Festkörperlaserquellen gleich Funktion. Nach der oberen Bewertung ist Variant 022, Nd:YAG-Laser am besten. Nd:YAG-Laser kann die Anforderung in dem Rohrbearbeitung Verfahren besser erreichen. Und das Kosten ist am günstigsten.

### Bei Laserschneiden

Im Vergleich zu den 3 Varianten bei Laserschneiden ist Schmelzschnitten besser. Es erreicht die Anforderungen in der Feinfertigung. Die Werkstoff von Rohre ist Metall. Und Schmelzschnitten braucht wenige Energie als Sublimierschnitten. Weil der Temperatur auf Oberfläche sehr schnell aufsteigt, können die schneidkante oder

Schneidfläche sehr fein sein und wenige Restmaterial entstehen. Das Verfahren ist auch für dünn Produkt las andere 2 Verfahren besser.

### **Bei Handhabung und Transport**

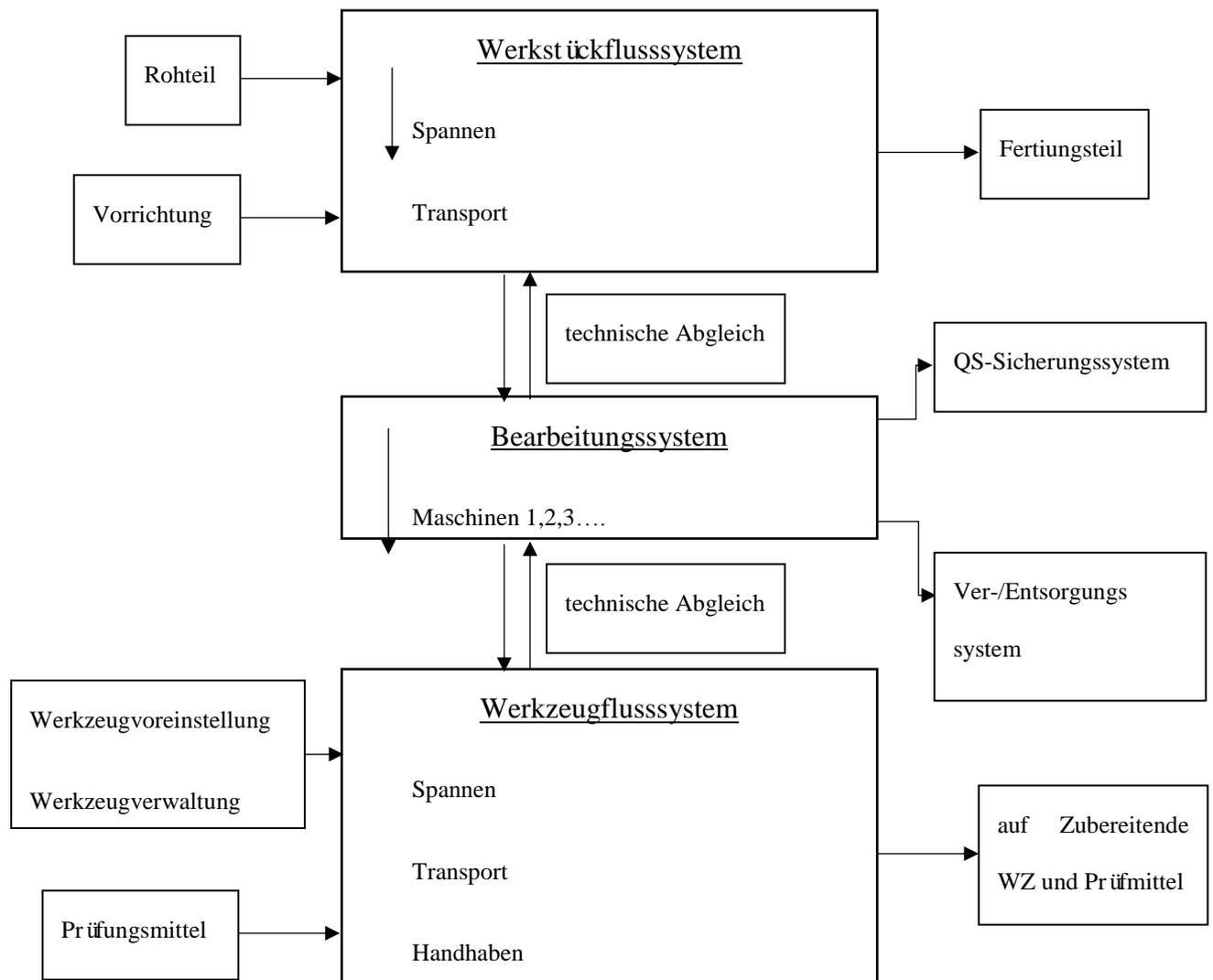
Im Vergleich zum Manipulator kostet Brückenkran mehr bei Anschaffung und Betrieb. Jedoch kann Brückenkran das Objekt zur jeden Position in der Fabrik transportieren und mehr als Manipulator belasten. In dieser Aufgabe wird Robotfahrzeug als beste Lösung ausgewählt.

## **4.5 Zusammenhänge zwischen den maschinenbaulichen und organisatorischen Schnittstellen <sup>[4]</sup>**

Im Gegensatz zu klassische Fertigungseinrichtungen zeigt die Planung und Inbetriebnahme eines Flexiblen Fertigungssystems eine sehr schwierige und komplexe Aufgabe, die durch einen das Gesamtanlagen System betrachtenden Planungsansatz zu bewältigen ist.

Die System Komponenten bestehen aus Bearbeitungssystem, Werkstück-Flusssystem, Werkzeug-Flusssystem sowie Steuerungs- und Überwachungssystem usw. Danach ist Materialflusssystem aus Werkstück-Flusssystem und Werkzeug-Flusssystem.

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



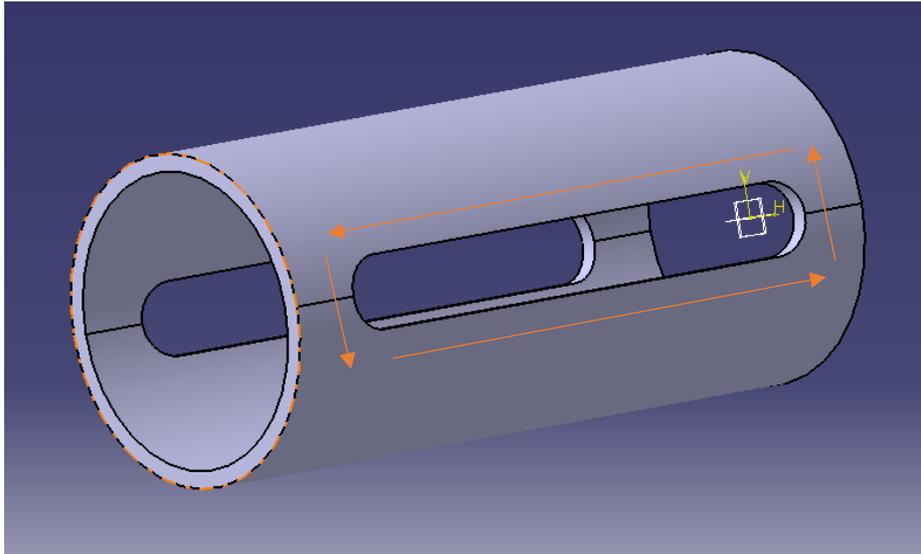
**Abbildung 23 Schema: Werkstückflusssystem**

## 5 Konzeptieren aus Beispielteilen

In Kapitel 5 werden 2 Beispiele im Praxis zeigen. Das erste Beispiel ist Lang loch auf einem Rohr schneiden. Und das zweite Beispiel ist ein oval förmiges Loch auf einem Rohr schneiden.

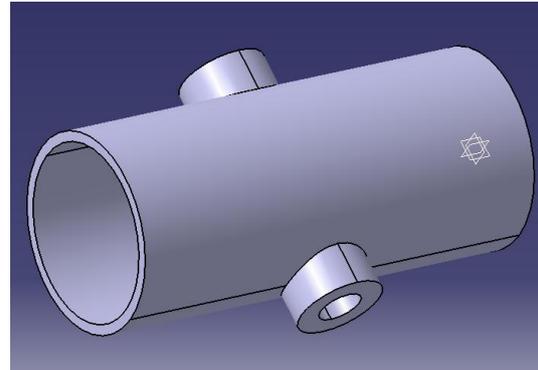
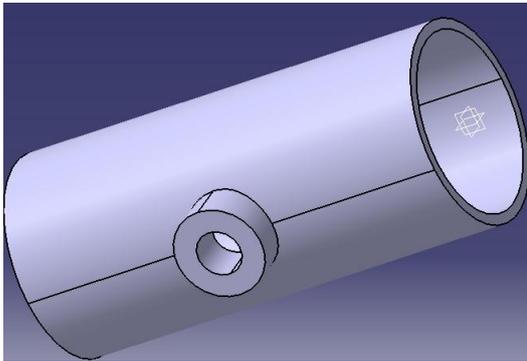
### 5.1 Lang Loch

Lang Loch ist sehr häufig in Industrie verwendet, z.B. Nabe-Welle Verbindung.



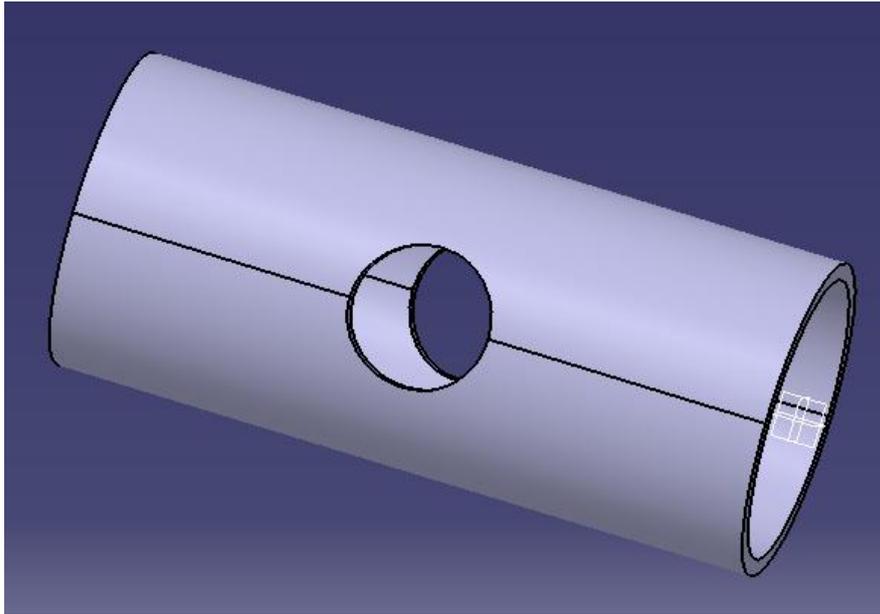
**Abbildung 24 Lang Loch**

Im Konzept ist das Rohr als Rohstoff bearbeitet. Das Rohr geht bei Laserschneiden Station ein. Durch Programmieren mit CNC-Maschine kann das Laserspindel das Form Lang Loch durchlaufen und schneiden. Danach bewegt der Spindel nach andere Seite und wieder schneidet.



## 5.2 Oval Förmiges Loch

Diese 2 Bilder zeigen, dass 2 rohrförmige Teile auf einem großen Rohr schweißen. Es wird in Chemiefeld viel verwendet.



**Abbildung 25 oval förmige Löcher auf einem Rohr**

Im Fertigungsverfahren werden 2 oval förmige Löcher auf einem Rohr geschnitten.

Tabelle 8 Prinzip Bsp. 1

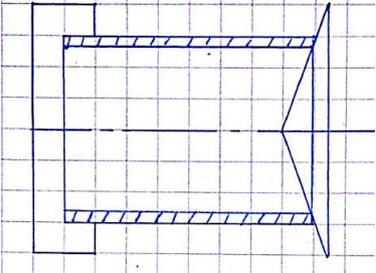
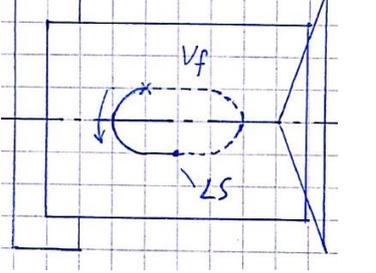
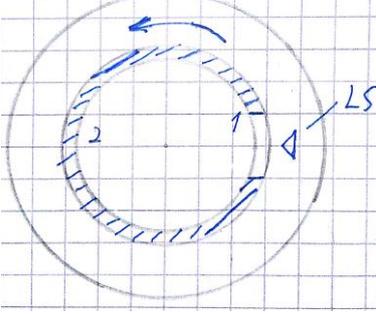
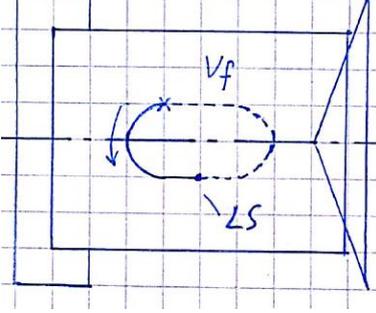
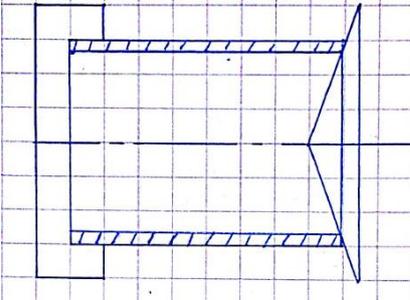
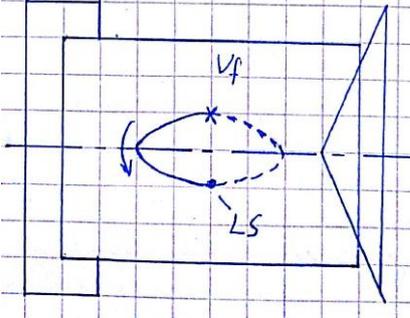
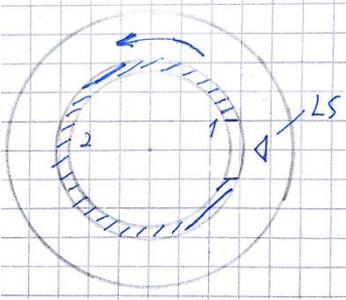
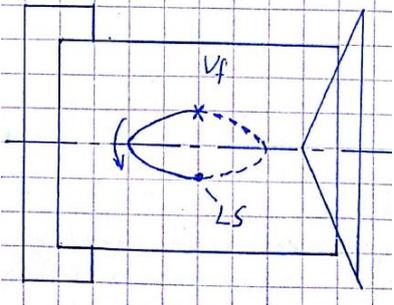
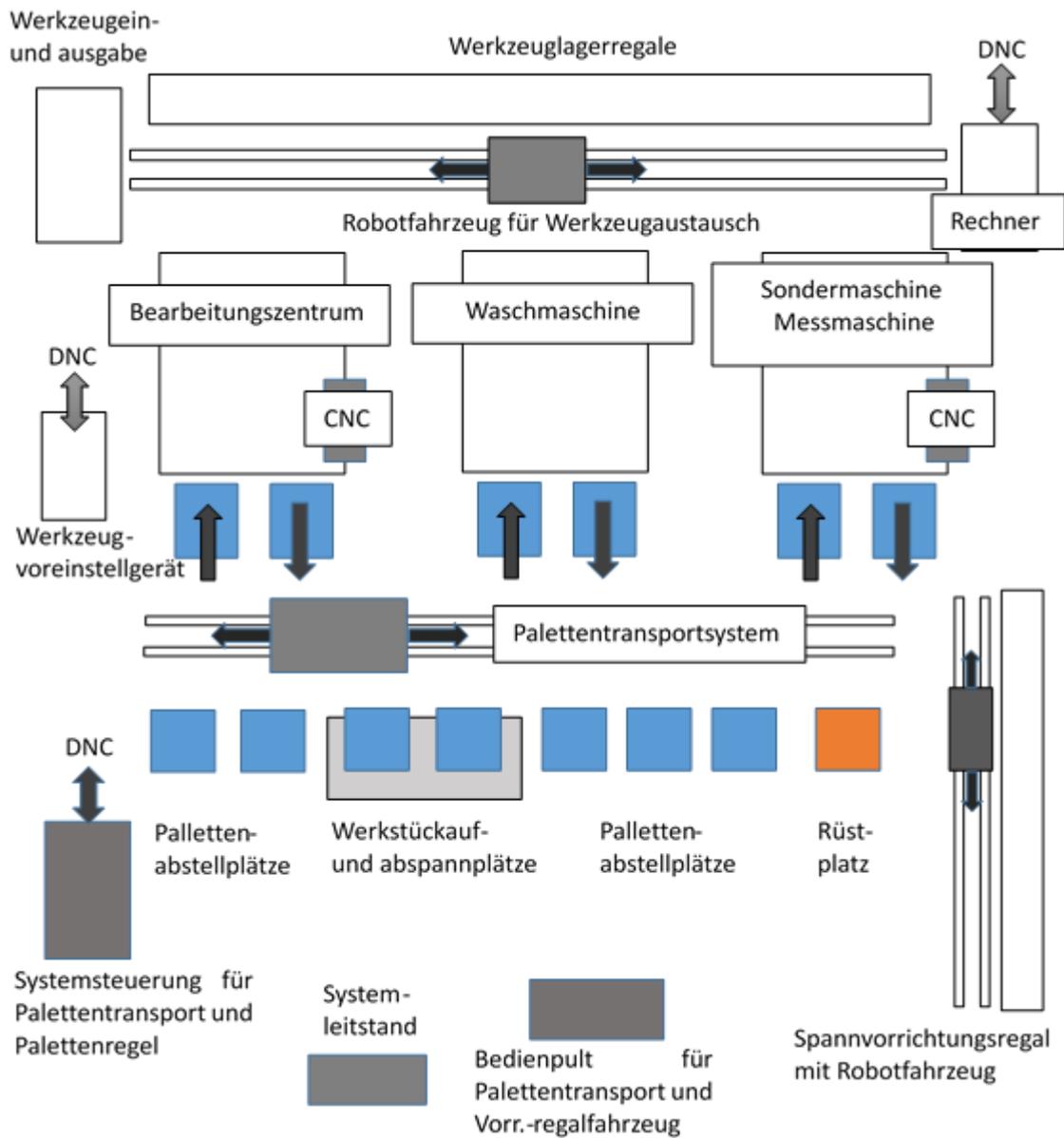
Prozessbaustein	Prinzip
Spannen des Rohteil 1	
Schneiden der Kontur Im Rohr 1	
Drehen des LS	
Schneiden der Kontur Im Rohr 2	

Tabelle 9 Prinzip Bsp. 2

Tabelle 10 Prinzip Bsp. 2

Prozessbaustein	Prinzip
Spannen des Rohteil 1	
Schneiden der Kontur Im Rohr 1	
Drehen des LS	
Schneiden der Kontur Im Rohr 2	



**Abbildung 26 Gesamtanlage**

Das ist die Skizze von Gesamtanlage. Durch Robotfahrzeug können alle Werkzeuge schnell und genau ausgetauscht werden. Das ist sehr wichtig in aktive Fertigungssystem. Mit Hilfe der Rechner kann das Austauschsystem in Ordnung sein. Bearbeitungssystem, Waschmaschine und Sondermaschine sind Kern, der wichtigste Teil des Systems. Die Rohre gehen in Bearbeitungszentrum ein und durch Laserstrahl bearbeitet, danach durch Waschmaschine gewaschen, anschließend durch

Sondermaschine geprüft. Mit Hilfe des Palettentransportsystems können die Werkstücke in 3 Maschinen transportiert werden. Spannvorrichtungsregel liegt in rechte Seite. Es gibt auch viele zusätzliche Einrichtungen für das System. Das gesamt System besteht aus einigen kleinen Systems. Jedes System ist durch einen Rechner programmiert und steuert. Es soll einem Steuerungssystem für gesamte Fertigungssystem geben.

## 6 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	PRINZIP FORMWALZVERFAHREN .....	9
ABBILDUNG 2	ROHRFORMUNGSVERFAHREN .....	10
ABBILDUNG 3	DER LASER ALS FERTIGUNGSTECHNISCHE EINRICHTUNG: SCHEMA UND BEGRIFF NACH ISO 11145 .....	14
ABBILDUNG 4	WECHSELWIRKUNGEN LASERSTRAHL "WERKSTÜCK BEI STEIGENDER INTENSITÄT UND DABEI AUFTRETENDE VERÄNDERUNGEN IN DER WWZ; EINHERGEHEND ÄNDERN SICH AUCH DIE MECHANISMEN DER ENERGIEEINKOPPLUNG.....	14
ABBILDUNG 5	STANDARDSYSTEME ZUR ANSTEUERUNG VON PUNKTEN AUF DEM WERKSTÜCK.....	19
ABBILDUNG 6	SCHEMA: FUNKTIONEN EINER LASERBEARBEITUNGSANLAGE .....	20
ABBILDUNG 7	LASERANLAGENKONZEPT ZUR 1D-BEARBEITUNG .....	21
ABBILDUNG 8	LASERANLAGENKONZEPT ZUR 2D-BEARBEITUNG .....	22
ABBILDUNG 9	LASERANLAGENKONZEPT ZUR 3D-BEARBEITUNG .....	23
ABBILDUNG 10	ND:YAG-LASERANLAGE .....	24
ABBILDUNG 11	FUNKTIONSEINHEITEN EINER LASERANLAGE .....	26
ABBILDUNG 12	PRINZIPSCHEMA EINER LASERANLAGENSTEUERUNG .....	28
ABBILDUNG 13	TERMSCHEMA DES ND: YAG LASERS .....	31
ABBILDUNG 14	ENERGIESCHEMA DES RUBINLASERS .....	31
ABBILDUNG 15	AUFBAU DES ERSTEN RUBINLASERS.....	32
ABBILDUNG 16	SCHEMATISCHER AUFBAU EINES LASERS .....	33
ABBILDUNG 17	ORDNUNG DER FERTIGUNGSVERFAHREN NACH DIN 8580 .....	35
ABBILDUNG 18	LASERSUBLIMIERSCHNEIDEN MIT KOAXIALER SCHNEIDGASZUFUHR .....	37
ABBILDUNG 19	AGGREGATZUSTÄNDE BEIM LASERSCHNEIDEN .....	38
ABBILDUNG 20	URSACHE UND WIRKUNG VON LASERSTRAHLUNG .....	42
ABBILDUNG 21	ÜBERSICHT MÖGLICHER GEFAHRENBEREICH BEI LASERANLAGEN .....	42
ABBILDUNG 22	WARNSCHILDER FÜR LASERANLAGEN .....	43
ABBILDUNG 23	SCHEMA: WERKSTÜCKFLUSSSYSTEM .....	52
ABBILDUNG 24	LANG LOCH .....	53
ABBILDUNG 25	OVAL FÖRMIGE LÖCHER AUF EINEM ROHR.....	54
ABBILDUNG 26	GESAMTANLAGE.....	57
TABELLE 1	BEARBEITUNGSAUFGABEN VON LASERLAGEN .....	17
TABELLE 2	LÖSUNGSVARIANTEN FÜR JEDE HERSTELLUNGSKOMPONENTE .....	45
TABELLE 3	AUSWERTUNGSKRITERIEN.....	46
TABELLE 4	BEWERTUNGSMATRIX.....	46
TABELLE 5	GEWICHTUNG VON JEDEN BEWERTUNGSKRITERIEN.....	47
TABELLE 6	WERTSKALA .....	48
TABELLE 7	AUSRECHNUNG DER PUNKTE VON BEWERTUNGSKRITERIEN.....	50
TABELLE 8	PRINZIP Bsp. 1 .....	55
TABELLE 9	PRINZIP Bsp. 2 .....	55
TABELLE 9	PRINZIP Bsp. 2 .....	56
		59

## **7 Literatur**

### **[1] Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau** -Andreas Bachhofer

ISBN 3-89675-881-0      FH:52.72 58<1>/1

### **[2] Laser in der Materialbearbeitung**

-StR. Karl-Manfred Erhardt,      OStR. Dr.-Ing. Adolf Heine

-StR. Hans Prommersberger

FH 1993 2482/1

### **[3] Laser in der Fertigung, Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren**

- Helmut Hügel                      - Thomas Graf

ISBN 978-3-8351-0005-3      FH:52.70 117<2>/1

### **[4] VDI Berichte 867 –Blechbearbeitung 90‘**

-VDI Verlag                      FH 1996 2868 1/1

### **[5] Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Lasern**

-VDI Verlag                      FH 1993 3456/1

### **[6] Laser technik für die Fertigung**      -Reinhart Poprawe

-Springer Verlag      FH:52.75 97<1>/1

**[7] Herstellung metallischer Bauteile durch Laserstrahlgenerieren**

- Eckhard Hoffman - Shaker Verlag

**[8] Einführung in die Produktion** - Bloech, Bogaschewsky, Götze, Roland

- Springer Verlag FH:85.35 145<5>/1

**[9] Arbeitsblätter zur Lehrveranstaltung Fertigungssystem**

- Prof. Dr. -Ing R. Kademann

**[10] Informationsmaterial zur Lehrveranstaltung Unkonventionelle  
Fertigungsverfahren Kapital Lasermaterialbearbeitung**

- Prof. Dr. -Ing R. Kademann

**[11] Arbeitsblätter zur Lehrveranstaltung Fertigungstechnische Vertiefung  
- Maschinen und Anlagen zur spanlosen Formgebung**

- Prof. Dr. -Ing R. Kademann

**[12] Arbeitsblätter zur Lehrveranstaltung Werkzeugmaschinen und  
Fertigungstechnik**

- Prof. Dr. -Ing R. Kademann

**[13] Herstellverfahren für Stahlrohre**

- Dr.-Ing. Karl-Heinz Brensing, Düsseldorf

- Dipl.-Ing. Baldur Sommer, Salzgitter Großrohre GmbH

## 9 Quelle

### [1] Herstellverfahren für Stahlrohre

- Dr.-Ing. Karl-Heinz Brensing, Düsseldorf

- Dipl.-Ing. Baldur Sommer, Salzgitter Großrohre GmbH

### [2] Laser in der Fertigung, Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren

- Helmut Hügel                      - Thomas Graf

ISBN 978-3-8351-0005-3      FH:52.70 117<2>/1

### [3] Laser in der Materialbearbeitung

-StR. Karl-Manfred Erhardt,      OStR. Dr.-Ing. Adolf Heine

-StR. Hans Prommersberger

### [4] Arbeitsblätter zur Lehrveranstaltung Fertigungssystem

- Prof. Dr. -Ing R. Kademann

### [5] Laser technik für die Fertigung      -Reinhart Poprawe

-Springer Verlag      FH:52.75 97<1>/1