



Fakultät Maschinenwesen

Institut für Fertigungstechnik

Professur für Laser und Oberflächentechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer

Erstellung eines Bearbeitungs- und Anlagenkonzepts für die selektive Lasermaterialbearbeitung (Härten, Auftragen, Abtragen) von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren

Von Romero Karam, Arturo
Geboren am 22.03.1992 in Monterrey, Mexiko
Matr.-Nr.: 4111527

zur
Erlangung des akademischen Grades
Bacheloringenieur
(B.Sc.)

vorgelegte Bachelorarbeit.

Tag der Einreichung: 28.08.2017

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Beyer

2. Gutachter: Dr.-Ing. Hanno Kötter

Angenommen / nicht angenommen

Dresden, den 28.08.2017

Technische Universität Dresden

Fakultät Maschinenwesen
Institut für Fertigungstechnik
Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik

Aufgabenstellung zur Bachelorarbeit **von Herrn Arturo Romero Karam**

(Studienrichtung: Maschinenbau PO2014 -Bachelor-;
Vertiefungsrichtung: Produktionstechnik)

Thema: Erstellung eines Bearbeitungs- und Anlagenkonzepts für die selektive Lasermaterialbearbeitung (Härten, Auftragen, Abtragen) von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren

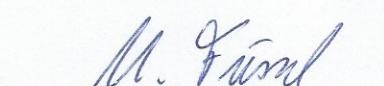
Schwerpunkte:

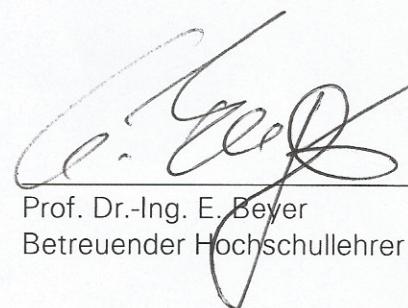
- Darstellung des Standes der Technik zu den entsprechenden Bearbeitungstechnologien und der notwendigen technischen-technologischen Ausrüstung
- Auswahl und Bewertung von Bearbeitungsfolgen einschließlich des Antriebssysteme für die Teile sowohl bezüglich der Haupt- und Nebenprozesse
- Erarbeitung einer Bearbeitungsstrategie unter den Gesichtspunkten Qualität, Produktivität und Kosten
- Überblick zu typischen Einflüssen der Laserbearbeitung auf die Bauteileigenschaften
- Erarbeitung der notwendigen Aspekte zu Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik insbesondere Lasersicherheit

Ausgehändigt am: 15.05.2017
Einzureichen am: 28.08.2017

1. Prüfer /Betreuer HSL: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Beyer, TUD, Fakultät MW, IF, LOT
2. Prüfer: Dr.-Ing. Hanno Kötter, TUD, Fakultät MW, IF, LOT

Betreuer: Dipl.-Ing. Lutz Lemmin, TUD, Fakultät MW, IF, LOT


Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel
Studienrichtungsleiter


Prof. Dr.-Ing. E. Beyer
Betreuer Hochschullehrer

Kurzreferat

Diese Bachelorarbeit setzt sich mit der Erstellung eines Bearbeitungs- und Anlagenkonzepts für rotationssymmetrische Bauteile im Durchlaufverfahren auseinander. Die Auswahl einer Bearbeitungsstrategie sowie die Hauptbearbeitungskomponenten für die Auslegung einer Laserstrahllanlage stehen im Mittelpunkt der Arbeit. Anhand von theoretischen Grundlagen der Lasermaterialbearbeitung sowie auftretenden Komplikationen bei der Bearbeitung werden mögliche Bearbeitungsstrategien dargestellt. Für die Wahl einer möglichst universalen Laserquelle werden Lasersysteme verglichen, wobei die technische Sauberkeit in Bezug auf die Qualitätssteigerung diskutiert wird. Dabei werden Bauteilhandhabungsmöglichkeiten von rotationssymmetrischen Bauteilen erläutert. Darüber hinaus sind Sicherheitsaspekte bezüglich der Lasersicherheit beschrieben. Für die Konzepterstellung werden abschließend die Hauptbauteilantriebe sowie die Strahlformungssysteme, die sich für härtende, auftragende und abtragende Verfahren eignen, unter einer vorher gewählten Bearbeitungsstrategie bewertet.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die von mir am heutigen Tag eingereichte Bachelorarbeit zum Thema:

Erstellung eines Bearbeitungs- und Anlagenkonzepts für die selektive Lasermaterialbearbeitung (Härten, Auftragen, Abtragen) von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren

vollkommen selbstständig und nur unter Verwendung der in der Arbeit angegebenen Literatur und Abstimmungspartner angefertigt habe.

.....
Unterschrift mit Vor- und Zunamen

Dresden, den 28.08.2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Formelzeichen	6
Abkürzungen.....	7
Danksagung	8
1 Einleitung und Zielstellung.....	9
2 Stand der Technik	11
2.1 Lasermaterialbearbeitung	11
2.2 Bearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen:.....	13
2.2.1 Modelle der Wärmeleitung von rotationssymmetrischen Bauteilen	13
2.2.2 Einfluss der Laserspotgeometrie.....	15
2.2.3 Der „Back-Tempering“ Effekt	16
2.2.4 Temperaturregelung durch Sensoren	17
2.3 Hauptbearbeitungsverfahren	18
2.3.1 Konventionelles Verfahren	18
2.3.2 Ring-Spot-Geometrie	19
2.3.3 Bearbeitung mit Optiken.....	22
2.3.4 Zwischenfazit Hauptbearbeitungsverfahren	24
2.4 Strahlformungssysteme	25
2.4.1 Absorption, Reflexion und Wärmeleitung anhand des Lasersystems.....	25
2.4.2 Laserquellen.....	27
2.4.3 Strahlführungssysteme	30
2.4.3.1 Spiegeloptik	30
2.4.3.2 Faseroptiken	31
2.4.3.3 Frei-Strahl Anordnung	32
2.4.4 Hilfsmedien	33
2.4.5 Zwischenfazit Strahlformungs- und Strahlführungssysteme	34
3 Technische Sauberkeit	36
3.1 Klassifizierung und Einfluss von Verunreinigungen.....	36
3.2 Einfluss von Verschmutzungen auf den Laserbearbeitungsprozess	38
3.3 Reinigungsmittel	38
3.4 Zwischenfazit zur technischen Sauberkeit.....	40
4 Hauptantriebe	42
4.1 Zustellverfahren	42
4.2 Translatorische Bewegung	44
4.3 Rotatorische Bewegung.....	45
4.3.1 Hauptspindel	45

4.3.2 Spitzenlose Bearbeitung	46
4.3.3 Regelung der spitzenlosen Bearbeitung	48
4.4 Zwischenfazit Hauptantriebe.....	50
5 Lasersicherheit.....	51
5.1 Notwendige Aspekte zur Lasersicherheit.....	51
5.2 Klassifizierung von Lasereinrichtungen	52
5.3 Der Laserschutzbeauftragte.....	53
5.4 Technische Schutzmaßnahmen	53
5.4.1 Passivschutzsysteme	54
5.4.2 Aktivschutzsysteme.....	55
5.4.2.1 „Laser-Jailer“ von Lasermet Ltd.....	55
5.4.2.2 „Laser-Spy-Sensor“ von REIS Lasertec	56
5.4.3 Hybridschutzsysteme	57
5.5 Zwischenfazit Lasersicherheit.....	57
6 Bearbeitungs- und Anlagenkonzept.....	59
6.1 Einfluss des Bauteilantriebs.....	59
6.2 Einfluss des Lasersystems	65
6.3 Darstellung des Bearbeitungs- und Anlagenkonzepts	67
7 Fazit und Ausblick.....	69
Literatur- und Quellenverzeichnis	72
Normen und Richtlinien	78
Anhang	79
Anhang I.....	79
Anhang II.....	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptkomponenten und Aufbau einer Laserstrahlwanlage nach /BEY1998/	10
Abbildung 2: Ergänzte Einordnung der verschiedenen Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung nach DIN 8580 nach /FÖH2011/	11
Abbildung 3: Geometrische Gestalt des Gesamtbauteils nach /BEY1998/	13
Abbildung 4: Darstellung möglicher Laserspotgeometrien mit Angabe der Abtastrichtung U und der geometrischen Größen nach /SAF2006/.....	16
Abbildung 5: Überlappung zweier Bearbeitungsspuren; Spur 1 (vorherige) und Spur 2 (aktuelle) in der Abtastrichtung U mit den charakteristischen Härteeinflusszonen (HEZ), Härtezone (HZ), temperierte Zone (TZ) und Grundmaterialzone (GMZ) nach /GIO2011/.....	17
Abbildung 6: Prozess Kinematik beim (a) konventionellen Laserhärteverfahren sowie beim (b) Ring-Spot Härteverfahren; auf einer Hauptspindel (Drehbank) mit variablen rotatorischen und translatorischen Geschwindigkeiten nach /ORA2014/	19
Abbildung 7: Härteverlauf entlang des AISI 1040 Proben bei (a) konventionellen Verfahren mit einer mehrspurigen „Multi-Track“ Bearbeitung und (b) Ring-Spot Verfahren nach /ORA2014/	20
Abbildung 8: Einfluss der untersuchten Prozessparameter von AISI 1040 Proben in Ring-Spot-Geometrie Verfahren zur Bestimmung von Einflussgrößen bei konstanter Laserstrahlleistung nach /ORA2014/	21
Abbildung 9: Querschnitt einer einspurigen lasergehärteten Probe nach /GIO2010/.....	21
Abbildung 10: „Ring-of-Fire“ und „Pass-through“ Anordnungen mit torischen Spiegeln für die Bearbeitung von a) Außen- und b) Innendurchmessern eines zylindrischen Massiv- und Hohlkörpers nach /KOU1983/.....	22
Abbildung 11: Spezielle Anordnung eines schwankenden und eines Axicon Spiegels für das Laserhärten eines zylindrischen Bauteils nach /REA2001/.....	23
Abbildung 12: Reflexionsvermögen verschiedener Metalle als Funktion der Wellenlänge nach /KEN2004/	26
Abbildung 13: Effekte und Anwendungen von Laser nach deren Strahldichte als Funktion der Einwirkzeit nach /KEN2004/	26

Abbildung 14: Laser Anwendungen nach deren Leistungsspektrum /DAV2012/	28
Abbildung 15: Grenzflächen einer verschmutzten Metalloberfläche nach /ZWI2014/ /HAS1996/	37
Abbildung 16: Einfluss von Kühlenschmierstoffen auf C45 und 42CrMo4 lasergehärtete Proben nach /ENG2014/	38
Abbildung 17: Vorbehandlung mit Laserstrahlung einer metallischen Oberfläche nach /CLE2017/.....	40
Abbildung 18: Grobgliederung von Linearantrieben und deren Führungssysteme für translatorische Bewegungen nach /HES2006/	45
Abbildung 19: Konstruktion eines Dreibacken- Kraftspannfutters mit Backenschnellwechsel nach /NEU2012/.....	46
Abbildung 20: Prinzipieller Aufbau der spitzenlosen Bearbeitung ohne Längsvorschub in der Bearbeitung für rotationssymmetrische Bauteile mit Angabe der Regelgrößen nach /DIE2016/	48
Abbildung 21: Aktualisierte EU (2014/35/EC) und deutsche Vorschriften zum Laserschutz nach Emission und Expositionsgrenzwerten von optischer Strahlung nach /HOR2014/ /DIN60825-1/	52
Abbildung 22: Klassifizierung von Laserschutzwänden nach DIN 60825-4 nach /HEB2009/	55
Abbildung 23: Integration eines Laser-Spy-Sensors in den Not-Aus Schaltkreis einer Laserstrahlanlage mit doppelwandigen Schutzkabine nach /REI2009a/	56
Abbildung 24: Bedeutung des Laser- und Bauteilantriebssystems für die Laserspotgeometrie	59
Abbildung 25: Einfluss des Lasersystems auf die Laserspotgeometrie und Strahlverteilung verschiedener Laserquellen nach /LIM2007/ /LI2000/ /KEN2004/ /REA2001/ /EIC2006/ /COS2017/.....	66
Abbildung 26: Anlagenkonzept für die Lasermaterialbearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug der erforderlichen Strahldichten und Einwirkzeiten für verschiedene Prozesse in der Lasermaterialbearbeitung nach /KEN2004/.....	27
Tabelle 2: Zusammenstellung der relevanten Größen von kommerziell verfügbaren Laserformungssystemen für die Lasermaterialbearbeitung; Nd: YAG-, CO ₂ -, HDL und Faserlaser im Vergleich nach /LIM2007/ /LI2000/ /KEN2004/ /REA2001/ /EIC2006/ /IND2017/ /IPG20017/ /TRU2017/ /COS2017/	29
Tabelle 3: Zusammenstellung der Varianten der spitzenlosen Bearbeitung nach /HEI2014/ /DIE2016/ /ENG2014/ /REI1988/ /HER0000/.....	47
Tabelle 4: Bestimmung des optimalen Höhenversatzes für Bauteile bei vorgelegten Werkzeugträger- und Tangentialwinkel nach /DIE2016/....	48
Tabelle 5: Laserklassen in der Lasermaterialbearbeitung nach DIN 60825-1 nach /BGV2017/ /BMA2017/.....	52
Tabelle 6: Untersuchte Antriebsvarianten und Kurzerklärung des Bewegungsprinzips für rotationssymmetrische Bauteile.....	60
Tabelle 7: Bewertungskriterien der Hauptantriebe für rotationssymmetrische Bauteile mit farbige Kodierung der Kriterien.	61
Tabelle 8: Bewertungsmatrix der Hauptantriebsvarianten nach den erzeugbaren Bahnen mit einer farbigen Bewertung der einzelnen Kriterien.....	62
Tabelle 9: Bewertungsmatrix der spitzenlosen Einstech- und Durchlaufbearbeitungsantriebe nach den erzeugbaren Bahnen mit einer farbigen Bewertung der einzelnen Kriterien.....	63
Tabelle 10: Vor- und Nachteile der nach den Bewertungskriterien geeigneten Varianten der spitzenlosen Bearbeitung nach /WEC2005/ /HEI2014/ /CON2006/	64

Formelzeichen

a	Länge	[mm]
b	Breite	[mm]
c	Basislänge	[mm]
d	Durchmesser	[mm]
d_B	Bauteildurchmesser	[mm]
d_S	Laserspotdurchmesser	[mm]
d_{W1}	Durchmesser der Regelkörper (Walze 1)	[mm]
d_{W2}	Durchmesser der Walze 2	[mm]
e	Tiefe	[mm]
H	Enthalpie	[J/kg]
h	Höhe	[mm]
h_{op}	Optimaler Höhenversatz	[mm]
P	Leistung	[W]
P_t	Péclet-Zahl	[\cdot]
q_{las}	Laser-Wärmefluss	[W / m ²]
T	Temperatur	[°C]
T_0	Umgebungstemperatur	[°C]
T_A	Austenisationstemperatur	[°C]
T_D	Verdampfungstemperatur	[°C]
T_M	Martenisationstemperatur	[°C]
T_s	Schmelztemperatur	[°C]
U	Abtastrichtung	[\cdot]
V_x	Translatorische Geschwindigkeit X-Achse	[mm/ min]
x	Position an der X-Achse	[mm]
y	Position an der Y-Achse	[mm]
z	Position an der Z-Achse	[mm]
$\alpha(x)$	lokale Wärmeübergangskoeffizient	[W/ m ² K]
β	Absorptionsgrad Laser zu Material	[\cdot]
γ	Tangentialwinkel	[Grad]
ζ	Integrationsvariable	[\cdot]
η	Drehzahl	[min ⁻¹]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/ mK]
ρ	Dichte	[kg/ m ³]
σ	Varianz des Gaußstrahles	[\cdot]
φ	Werkstückträgerwinkel	[Grad]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[rad/ s]

Abkürzungen

AO	Arbeitsoberfläche
ASS	Aktivschutzsystem
CO	Kohlenstoffoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
FKL	Festkörperlaser
GMZ	Grundmaterialzone
He	Helium
HEZ	Härteeinflusszone
HLDL	Hochleistungs-Diodenlaser
HZ	Härtezone
ICNIRP	Internationale Kommission für nicht-ionisierenden Strahlenschutz
KSS	Kühlschmierstoff
LAM	Laser Assisted Machining
LLK	Lichtleitkabel
LMB	Lasermaterialbearbeitung
LSG	Laserspotgeometrie
N	Stickstoff
Nd: YAG	Neodym: Yttrium-Aluminium-Garnet
OStrV	Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung
PSS	Passivschutzsystem
RF	Restfläche
SFS	Strahlführungssystem
TZ	Temperierte Zone
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
WT	Wärmetauscher
WZ	Werkzeug
ZN	Zinkselenid
ZV	Zylindrisches Vektorstrahlprofil

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich für die Unterstützung bei meiner Abschlussarbeit und meinem Studium bei folgenden Personen herzlich bedanken:

Ich bedanke mich für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit bei den zuständigen Prüfern.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Lemmin, welcher meine Abschlussarbeit durch seine Anregungen, seine Geduld und seine Vorschläge kontinuierlich verbessert hat.

Ein weiterer Dank an alle meine Freunde und meine Freundin Isabelle, die mir durch ständige Vorschläge und bei Korrekturen geholfen haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern, Arturo und Lily und meinen Geschwistern Lily, Miguel, Gabriel und Lucia bedanken, durch deren Motivation und Unterstützung ein Studium in Deutschland möglich wurde.

Für meine spanischsprechende Familie:

Agradezco a mis padres Arturo y Lily y a mis hermanos Lily, Miguel, Gabriel y Lucia, quienes por medio de su apoyo continuo y motivación me dieron la posibilidad y fuerza de estudiar en Alemania.

1 Einleitung und Zielstellung

Einleitung

Anhand der Grundsteine von Emission und Strahlung, die bereits am Anfang des 20. Jahrhunderts von Albert Einstein präsentiert wurden, ist der Laser, gekennzeichnet als die „Licht-Verstärkung durch Stimulierte Emission von Strahlung“ konzipiert worden. Allerdings blieb die Entwicklung des Lasers bis zum Ende des zweiten Weltkrieges ein weitestgehend unberührtes Forschungs- und Entwicklungsfeld. In den darauffolgenden Jahrzehnten entwickelten sich verschiedene Lasertechnologien, die schnell in industriellen Prozessen für die Fertigung von Schweißnähten im Automobilbau Einsatz gefunden haben. Durch das parallele Wachstum verschiedener Industrien wurde der Laser ebenso für die Datenübertragung in Form von CD und DVD und Kommunikation mit Spitzengeschwindigkeiten mittels Optikfasern verwendet. Die Entwicklung von hochleistungsfähigen Laserquellen über 70 Jahre, seit dem ersten Lasersystem, und die Forderungen der Fertigungstechnik nach Präzision und Produktivität von mehrstufigen Bearbeitungsanlagen, fassen das Entstehen und das heutige Möglichkeitsspektrum der Lasermaterialbearbeitung zusammen.

Die Produktion in Maßen und in Großserien von Bauteilen im Bereich Maschinebau fordert die Entwicklung von speziellen Bearbeitungsanlagen, die mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen die allgemeine Produktivität steigern und die Kosten sinken können. Der Laser stellt ein hochwertiges Werkzeug der Fertigungstechnik dar, da seine Flexibilität die Bearbeitung von Metallen, Kunst- und Verbundwerkstoffe sowie organischer Werkstoffe, wie Holz und Papier, ermöglicht. Im Bereich der Bauteilbearbeitung gibt es vielfältige lasergestützte Verfahren, um spezifische Werkstückänderungen zu erzeugen. Durch die Fokussierung von Lichtstrahlen werden hohe Leistungsdichten in einem präzisen Laserspot erzeugt, aus dessen Steuerung und Anpassung resultiert eine Reihe von Bearbeitungsverfahren, wie zum Beispiel das Härteln, Abtragen und Auftragen.

Die lasergestützte Bearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren ist in der Fertigungstechnik von Bedeutung. Laserverfahren, wie z.B. das Laserhärteln, stellen gegenüber anderen Härteverfahren, wie dem Induktionshärteln, eine flexiblere und energiesparende Variante dar. Durch die präzise Bearbeitung mit Lasern lassen sich Verschwendungen vermeiden und die Prozessqualität weiter steigern. Die Optimierung und Verkettung von nebenstehenden Prozessen ermöglicht ebenso eine Verkürzung von Bearbeitungszeiten, welche den Anforderungen der künftigen Produktion gehören.

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist daher die Konzeption einer möglichst produktiven mehrstufigen Bearbeitungsanlage für die Lasermaterialbearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren. Dazu sind zunächst theoretische Aspekte der Lasermaterialbearbeitung zu betrachten. Dabei orientiert sich der Aufbau dieser Arbeit an der Komponentenauswahl einer Laserstrahlanlage nach /BEY1998/ (vgl. Abbildung 1). Zu Beginn werden ausgewählte und für die Lasermaterialbearbeitung wichtige Verfahren beschrieben. Dabei werden ausschließlich rotationssymmetrische Bauteile und der Einfluss des Lasers auf eben diese betrachtet. Der heutige Stand der Technik ist Grundlage des Anlagenbaus, weswegen er ausführlich dargestellt wird. Dazu gehören in erster Linie die Hauptbearbeitungsverfahren, die Strahlformungssysteme sowie die aktuellsten Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen, welche die technische Sauberkeit und den Laserschutz beschreiben. Die Auswirkung und Bedeutung der relevanten Laserquellen für eine mehrstufige Bearbeitungsanlage sowie die Auswahl einer geeigneten Antriebskombination sind darzustellen und zu bewerten. Anhand der theoretischen gewonnenen Kenntnisse kann daraufhin ein Anlagenkonzept erstellt werden.

/BEY1998/ /DOW2009/ /REA2001/ /MAT2011/ /EIC2006/ /BLI2013/ /TOW1999/

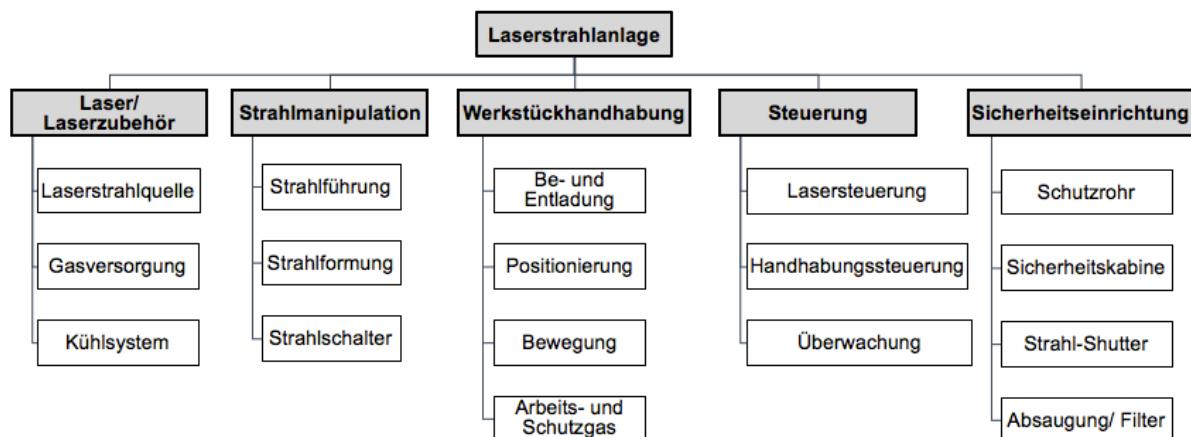


Abbildung 1: Hauptkomponenten und Aufbau einer Laserstrahlanlage nach /BEY1998/

2 Stand der Technik

2.1 Lasermaterialbearbeitung

In der Lasermaterialbearbeitung (LMB) werden Technologien, die mittels Laserstrahlung gewünschte prozessspezifische Werkstoffänderungen erzeugen können, genutzt. Dabei sind die vielfältigen Prozesse je nach Anwendungsbereich zu unterscheiden. Unter den verschiedenen Laserbearbeitungsmöglichkeiten werden in dieser Arbeit ausschließlich das Laserhärten, Laserabtragen und Laserauftragen betrachtet. Die selektive Lasermaterialbearbeitung bezeichnet die örtliche Steuerung des Verfahrens auf der zu bearbeitenden Oberfläche.

/ORA2014/ /BEY1998/

Eine genauere Definition zu den oben genannten Prozessen lässt sich in die Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 einteilen und ist in Abbildung 2 zu sehen.



Abbildung 2: Ergänzte Einordnung der verschiedenen Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung nach DIN 8580 nach /FÖH2011/

Nachfolgend werden in Verbindung zur Aufgabenstellung einzelne Fertigungsverfahren, das Laserhärten, -abtragen und -auftragen näher erläutert.

Laserhärten ist eine Untergruppe des Stoffeigenschaftsänderns. Laut /BEY1998/ sind dem Verfahren das „[...] Umwandlungshärten, das Anlassen und Rekristallisation bei Temperaturen $T < T_S$ [...].“/BEY1998/ zuzuordnen. Dabei wird das Bauteil mit der hohen Energiedichte des Laserstrahles nur örtlich am Rand und rasch bis zur kritischen Umwandlungstemperatur in Austenit T_A erwärmt. Demzufolge bleibt das Materialinnere, die Grundmaterialzone (GMZ), kühl. Aufgrund der Temperaturunterschiede, verteilt sich die Wärme in die GMZ. Dieser Vorgang wird als Abschrecken bezeichnet und ist in der Wärmebehandlung von großer Bedeutung, da es das Rückwandeln des Gefüges in weiches Martensit, welches bei

langsamer Abkühlung auftritt, verhindert. Die Temperaturunterschiede im Bauteil ermöglichen einen selbst abschreckenden Abkühlvorgang, der bis zum Erreichen der kritischen Temperatur für Martensitbildung T_M abläuft. Daraus entstehen sehr harte martensitische Schichten auf der Bauteiloberfläche. Lasergehärtete Schichten resultieren aus der Erhitzung der Bauteiloberfläche und der anschließenden raschen Abkühlung der örtlich erwärmten Bereiche. Die Selbstabschreckung kann ebenfalls durch Gas oder andere Fluide unterstützt werden. Der feste Zustand des Werkstoffes und dessen Bearbeitung unterhalb der Schmelztemperatur T_S bilden die Grundlage für das Laserhärten, welches eine Strukturänderung des Gefüges erzeugt. Das Überschreiten der Schmelztemperatur T_S führt zu erheblichen Schäden und eventuell zum Ausschuss des Bauteils.

/BEY1998/ /GIO2010/ /SEI2013/ /ORA2014/

Laserabtragen ist eine Untergruppe des Trennens, genauer gesehen des thermischen Trennens und umfasst das laserunterstützte Schneiden und Abtragen von Materialien. Ziel des Prozesses ist es die Schmelz- oder Verdampfungstemperatur T_S bzw. T_D des Werkstoffes lokal zu überschreiten. Die absorbierte Energie des Laserstrahles führt zu einer Erwärmung des Werkstoffes. Je nach Leistungsdichte, Geometrie der Oberfläche und Einwirkdauer verändern sich die Prozesszeiten. Abhängig von den Prozessparametern erwärmt sich die Oberfläche bis zu mehreren tausend Kelvin. Je nach gewünschtem Abtragungsprozess, i.d.R. Schneiden, Reinigen, usw., finden kürzere Laserpulse für das Verdampfungsabtragen oder längere Laserpulse für das Schmelzabtragen statt. Aufgrund der höheren erforderlichen Temperaturen für die Verdampfung ist der Großteil des Gesamtabtragungsvorganges ein Schmelzabtrag. Der Gesamtabtragungsprozess ist daher eine Kombination aus beiden Vorgängen.

/BEY1998/ /BRE2009/

Laserauftragen wird nach Definition in zwei Hauptgruppen der Norm DIN 8580 eingeteilt. Der Prozess ist als Lasergenerieren gekennzeichnet und wird in die Untergruppen Urformen und Beschichten unterteilt. „Das Generieren mit Laserstrahlung ist vom Verfahrensprinzip her ein viellagiges Beschichten.“ /BEY1998/ wodurch dreidimensionale Bauteile erzeugt werden können. Da Bauteile durch mehrspuriges Generieren erzeugt werden, erfolgt in den unteren Schichten eine Aufschmelzung. Die aneinander liegenden Schichten bilden eine schmelzmetallurgische Verbindung. Dieser Vorgang wird daher als ein urformendes Verfahren charakterisiert. Zusatzwerkstoffe werden als Pulver oder Draht in die Bearbeitungszone gebracht. Dort erfolgt eine lokale Aufschmelzung des Substrats,

der Basis und des Zusatzwerkstoffes, d.h. Temperaturen des Substrats bzw. Zusatzwerkstoffes liegen oberhalb der Schmelztemperatur ($T > T_s$). Schließlich folgen ein Abkühlvorgang und die Erstarrung des Schmelzes. /BLI2013/ /BEY1998/

2.2 Bearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen:

Rotationssymmetrische Bauteile sind im Vergleich zu flachen Werkstücken mit einem komplexeren Arbeitsvorgang in der LMB verbunden. Eine genauere Darstellung der Geometrie ist in Abbildung 3 zu sehen.

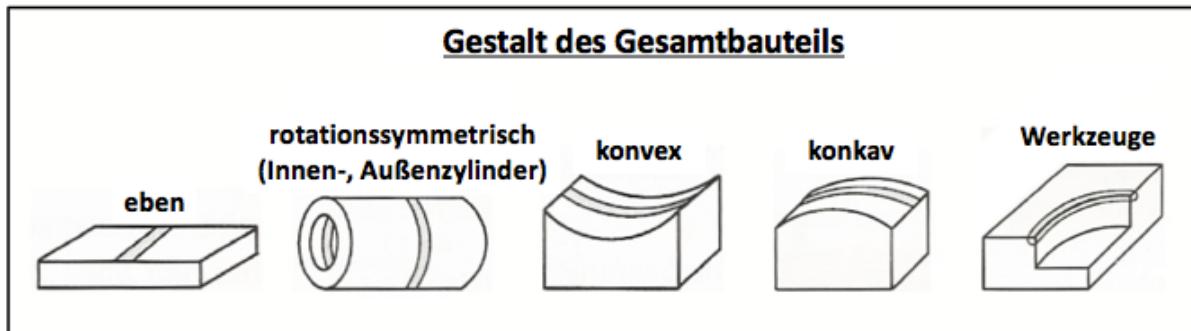


Abbildung 3: Geometrische Gestalt des Gesamtbauteils nach /BEY1998/

Nach deren Gestalt sind rotationssymmetrische Bauteile innen- und außenzyndrische Körper. Die Absorption des Strahles ist, im Vergleich zur ebenen Platte, ebenfalls von der Kurvatur des Bauteils abhängig. Der Laserstrahl kann bei Stäben oder vollen Zylindern ausschließlich am Außendurchmesser angewendet werden. Hohlzylinder oder Rohre können von innen und außen mit dem Laserstrahl gleichzeitig oder einzeln erwärmt werden. Aufgrund der Geometrie des Körpers tritt eine veränderte Wärmeverteilung auf. Dabei verhindern die unerfüllten Randbedingungen des unendlichen ausgedehnten Wärmeflussmodells das Erreichen der kritischen Abkühlgeschwindigkeit.

/TAN2010/ /BEY1998/

Zur genauen Bestimmung der Prozessparameter sind verschiedene Vorüberlegungen notwendig. Diese werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

2.2.1 Modelle der Wärmeleitung von rotationssymmetrischen Bauteilen

Es existieren verschiedene Wärmeflussmodelle, die aus der theoretischen Betrachtung eines unendlichen ausgedehnten Bauteils resultieren. Jedoch sind Bauteile in der Realität endlich und der hypothetische Wärmefluss dadurch verhindert. Bezüglich des Materials ist der Wärmeübergangskoeffizient α von großer Bedeutung. Dieser sagt aus, wie schnell Wärme aufgenommen oder abgegeben

wird. Der lokale Wärmeübergangskoeffizient $\alpha(x)$, welcher für Simulationen wichtig ist, setzt sich aus der Wärmeleitfähigkeit λ , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c des Werkstoffes zusammen und wird durch die Gleichung nach /KEN2004/ beschrieben:

$$(1) \quad \alpha = \lambda / \rho c$$

Weiterhin beeinflussen laserabhängige Größen, wie die Strahldichte, die Spotgeometrie, Einwirkzeit und Wellenlänge die tatsächlich aufgenommene Wärme. /BEY1998/ /KEN2004/

Aufgrund der Vielfalt an Wärmemodellen, sind lediglich die in den untersuchten Quellen relevanten Wärmeflussmodelle für rotationssymmetrische Bauteile dargestellt. Die Modelle sind in den entsprechenden Quellen näher erläutert und validiert worden.

De Lima et al. /LIM2007/ modellieren den Wärmefluss einer Automobilwelle mit der von Hunziker abgeleiteten Variante der Rosenthal-Gleichung. Diese betrachtet eine gaußsche punktförmige Wärmequelle bei konstanter Strahlgeschwindigkeit auf einem halb-unendlichen Massivkörper in kartesischen Koordinaten. Für den Versuch wurde das Bauteil auf einer Drehbank gedreht und die Lasereinrichtung translatorisch angetrieben.

Die Hunziker Variante der Rosenthal-Gleichung nach /Lim2007/ lautet:

$$(2) \quad T(x, y, z) = T_0 + \frac{\beta P}{\sqrt{2\pi^3 \lambda}} * \frac{1}{\sigma} \int_0^\infty \frac{\exp(-H)}{1+\zeta^2} d\zeta$$

wobei;

$$(3) \quad H = \frac{(x/\sigma + \zeta^2 P_t)^2 + (y/\sigma)^2}{2(1+\zeta^2)} + \frac{(z/\sigma)^2}{2\zeta^2}$$

$$(4) \quad \zeta = (\infty \cdot t)^{1/2}$$

Die aus Gleichung 2 resultierenden theoretischen Ergebnisse wurden experimentell bestätigt, wobei das veränderliche Absorptionsvermögen durch kalorimetrische Untersuchungen mehrmals bestimmt wurde. Das Absorptionsvermögen betrug bei zunehmender Strahldichte 38 bis 59%. /LIM2007/

Die Rotation des Werkstückes durch „Laser Assisted Machining“ (LAM), gleichbedeutend mit der laserunterstützten Fertigung, wurde erstmals von Rozzi et al. /ROZ2000/ bei der Entwicklung eines Wärmeflussmodells betrachtet. Patwa et al. /PAT2007/ sowie Skvarenina & Shin /SKV2006/ benutzen eine vereinfachte Form des von Rozzi et al. entwickelten 3D-Wärmeflussmodells für rotierende Bauteile. Die Originalgleichung betrachtet undurchsichtige zylindrische Bauteile aus Keramik bei einem materialabtragenden Prozess, wobei die vereinfachte Form für metallische Werkstoffe ohne Materialabtrag angepasst wurde. /ROZ2000/ /PAT2007/ /SKV2006/

Die vereinfachte Rozzi-Gleichung in Zylinderkoordinaten (r, ϕ, z) nach /PAT2007/ lautet:

$$(5) \quad \underbrace{\rho \omega \frac{\partial h}{\partial \phi} + \rho V_x \frac{\partial h}{\partial z}}_{\text{Advektion}} + \underbrace{\rho \frac{\partial h}{\partial t}}_{\text{Einlagerung}} = \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{q''_{las}}_{\text{Erzeugung}}$$

Die Durchführung des Versuchs von Skvarenina et al. /SKV2006/ anhand Gleichung 5 lieferte eine homogen gehärtete Schicht bei Proben mit 60 mm Durchmesser und einer Tiefe bis 2,5 mm. Die Leistung des Diodenlasers betrug 1220 W und der Vorschub 2,9 mm/s. Die Simulationswerte der vereinfachten Rozzi-Gleichung entsprachen weitestgehend den experimentellen Werten.

/LIU2010/ /PAT2007/ /ROZ2000/ /SKV2006/ /TIA2006/

2.2.2 Einfluss der Laserspotgeometrie

Phasentransformationen des Grundmaterials werden in der Lasermaterialbearbeitung durch sehr hohe Temperaturgradienten beeinflusst. Diese können zu einer unvollständigen Umwandlung und daher zu inhomogenen Strukturen in der Härteeinflusszone (HEZ) führen. Eine geeignete Laserspotgeometrie (LSG), auch Brennfleck genannt, sorgt für eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Werkstück. Der Einfluss der LSG ist ebenso abhängig von der Bewegungsrichtung des Laserstrahles auf der Materialoberfläche, welche als Abtastrichtung bezeichnet wird. Laut Safdar /SAF2006/ produzieren kreisförmige LSG eine halbkugelförmige HEZ, während rechteckige Spots eine eher flache und gerade HEZ erzeugen. Das Phänomen ist von der absorbierten Energie pro Oberflächeneinheit in der senkrechten Richtung der Laserbewegung abhängig. Abbildung 4 stellt die LSG bildlich dar, wessen Einfluss nach einem Finite Element Modell untersucht wurde. Die Leistungsdichte, auch Strahldichte genannt, wurde konstant bei $2,5 \text{ kW/cm}^2$ gehalten, wobei einen Hochleistungsdiodenlaser (HLDL)

mit 1,5 kW benutzt wurde. Aufgrund einer Fiber-Kopplung für die Strahlführung betrug die Effizienz auf der Oberfläche des Werkstücks bei dem Versuch etwa 72 %. /SAF2006/

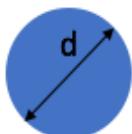
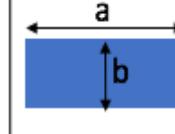
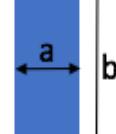
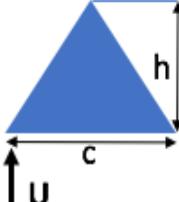
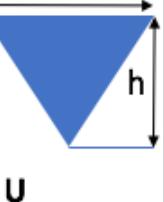
Form	Kreis	Rechteck (kurz)	Rechteck (lang)	Dreieck (vorwärts)	Dreieck (rückwärts)
Geometrie					
Maße [mm]	$d = 1.78$	$a = 5$ $b = 2$	$a = 2$ $b = 5$	$c = 4.8$ $h = 4.16$	$c = 4.8$ $h = 4.16$

Abbildung 4: Darstellung möglicher Laserspotgeometrien mit Angabe der Abtastrichtung U und der geometrischen Größen nach /SAF2006/

Der Versuch zeigte, dass sich die Temperaturgradienten sowie die Abkühl- und Wärmgeschwindigkeiten von der LSG steuern lassen. Darüber hinaus wurde eine höhere Härtung bei niedrigen Wärmeschwindigkeiten beobachtet. Unter den gleichen Bedingungen bei niedrigeren Wärmeschwindigkeiten haben die Rechteck-lang und Dreieck-vorwärts Geometrien eine erhöhte martensitische Bildung gezeigt. Da Laserhärten ein zeitabhängiger Prozess ist, könnte dieser bei zu hohen Prozessgeschwindigkeiten ausgeschlossen sein, weil die gewünschte Gefügetransformation eventuell nicht mehr stattfinden würde. Der Einfluss der LSG bleibt derzeit ein gering erforschtes Gebiet. /SAF2006/

2.2.3 Der „Back-Tempering“ Effekt

Der „Back-Tempering“ Effekt ist ein übliches Phänomen in der Bearbeitung von Werkstücken mit einer mehrspurigen Bearbeitungsstrategie. Die mehrspurige Bearbeitung wird in der englischen Literatur auch als Multi-Track Strategie beschrieben. Abbildung 5 zeigt die Überlappung zweier Bearbeitungsspuren und die dadurch entstandenen Materialzonen. Der thermische Einfluss der aktuellen Spur HEZ₂ auf die vorherige Spur HEZ₁ bricht deren Abkühlvorgang ab. Infolge dieser Störung entsteht eine temperierte Zone (TZ) zwischen den Spuren, was als „Back-Tempering“ Effekt bezeichnet wird. Das entstandene temperierte Martensitgefüge weist niedrige Härtewerte und eine inhomogene Struktur auf, die zur Bildung und Ausbreitung von Rissen an diesen Stellen führen könnten. Die

Korrosionsbeständigkeit des Bauteils, die direkt von der Härte und der Mikrostruktur der Oberflächenschicht abhängt, wird dabei ebenfalls verschlechtert.

/CAR2010/ /PAN2002/ /GIO2011/

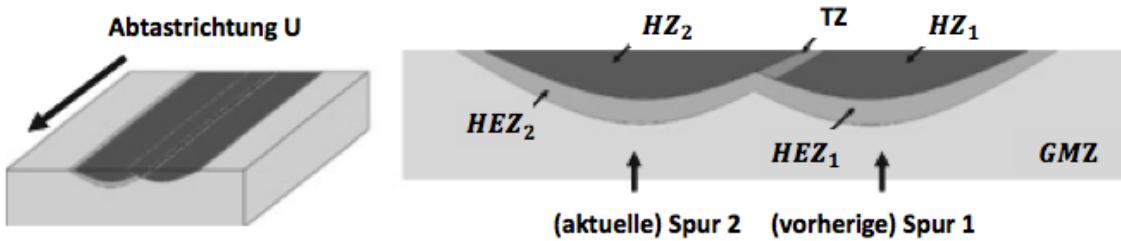


Abbildung 5: Überlappung zweier Bearbeitungsspuren; Spur 1 (vorherige) und Spur 2 (aktuelle) in der Abtragrichtung U mit den charakteristischen Härteeinflusszonen (HEZ), Härtezone (HZ), temperierte Zone (TZ) und Grundmaterialzone (GMZ) nach /GIO2011/

Der „Back-Tempering“ Effekt kann auch durch Parameterregelung kontrolliert werden. Dabei spielen die Abtastgeschwindigkeit, die Strahlleistung P und eine präzise Überschneidung der Spuren eine wichtige Rolle, die sich nur mithilfe von Sensoren und einer In-Prozessregelung steuern lässt. /MAR2017/

2.2.4 Temperaturregelung durch Sensoren

Aufgrund der sehr hohen Temperaturgradienten in der Lasermaterialbearbeitung und der benötigten Genauigkeit von Haltezeiten und Temperaturen ist eine In-Prozess-Temperaturregelung oder Überwachung von großer Bedeutung. Temperaturgradienten dT/dt von mehreren 1.000 K/s sind üblich und müssen schnell und präzise aufgenommen und geregelt werden. Dabei sind Prozesse und deren kritische Grenzwerte einzuhalten, die auch durch Oberflächenverschmutzungen und Unebenheiten (vgl. Kapitel 3) beeinflusst werden können. /LIU2010/

Pyrometer oder Strahlungsthermometer, die aus einem Sensor, Fokussierlinsen und Filtern bestehen, werden für die berührungslose Messung von emittierter Wärmestrahlung eingesetzt. Je nach zu messender Temperatur, Wellenlänge und Sensibilität des Sensors können diese unterschieden und eingegrenzt werden. Liu /LIU2010/ hat einen Germanium-Sensor-Pyrometer, dessen Messbereich Wellenlängen von 800 bis 1800 nm aufnehmen kann, in seinem Versuch verwendet. Die In-Prozess Temperaturüberwachung und -regelung mithilfe des Pyrometers ermöglichen eine schnelle Parameteränderung beim Überschreiten von kritischen

Messtemperaturen. Darüber hinaus lassen sich Prozessparameter in quasi Echtzeit steuern, um eine Reproduzierbarkeit des Prozesses zu erzielen.

/LIU2010/ /SEN2009/

Pyrometer bilden einen wichtigen Teil der Steuerung der Laserstrahlwanlage, welche die Kontrolle des Laserprozesses unterstützen. Dabei ist ein geeignetes mathematisches Modell und der Einfluss der Spotgeometrie für Simulationen von Bedeutung, da diese eine nähere Betrachtung des Prozesses ermöglichen (vgl. Abbildung 1).

2.3 Hauptbearbeitungsverfahren

Die Wahl einer Hauptbearbeitungsstrategie stellt die Grundlage einer Laserstrahlwanlage dar. Unter der Bearbeitungsstrategie ist das Vorgehen für die Bearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen zu verstehen, wobei die Vermeidung häufig auftretender Fehler erzielt wird. Die Komponentenauswahl ist von der Bearbeitungsstrategie abhängig, da diese die zu erfüllenden Voraussetzungen, wie die Bauteilhandhabung und anderes, stellt.

2.3.1 Konventionelles Verfahren

Für die Bearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen, wie z.B. Kolben, Kolbenringen, Schäften und Lagergehäusen, wird in der Industrie oft mit einer konventionellen Drehbank und einer Lasereinrichtung gearbeitet. Abbildung 6 gibt eine visuelle Darstellung der konventionellen Prozesskinematik im Vergleich zur Ring-Spot-Geometrie. Das Bauteil wird mittels eines Spannfutters axial gesichert und mit niedrigeren Drehzahlen η gedreht. Die Lasereinrichtung bewegt sich parallel zur Bauteilachse und bearbeitet das Material. Aufgrund der niedrigen Drehzahlen η und der translatorischen Geschwindigkeit der Lasereinrichtung v_x entsteht eine mehrspurige Laseoberflächenbehandlung. Die spiralförmige Spur sichert, dass kein Punkt auf der Oberfläche mehr als einmal bearbeitet wird. Dennoch beeinflussen sich die nebeneinanderliegenden Spuren gegenseitig und brechen den bedingten Abkühlvorgang ab (vgl. Kapitel 2.2.3). Abbildung 7 stellt den Härteablauf bei der konventionellen sowie der Ring-Spot Geometrie entlang des Bauteils bei einer Spurenüberschneidung dar. /ORA2014/

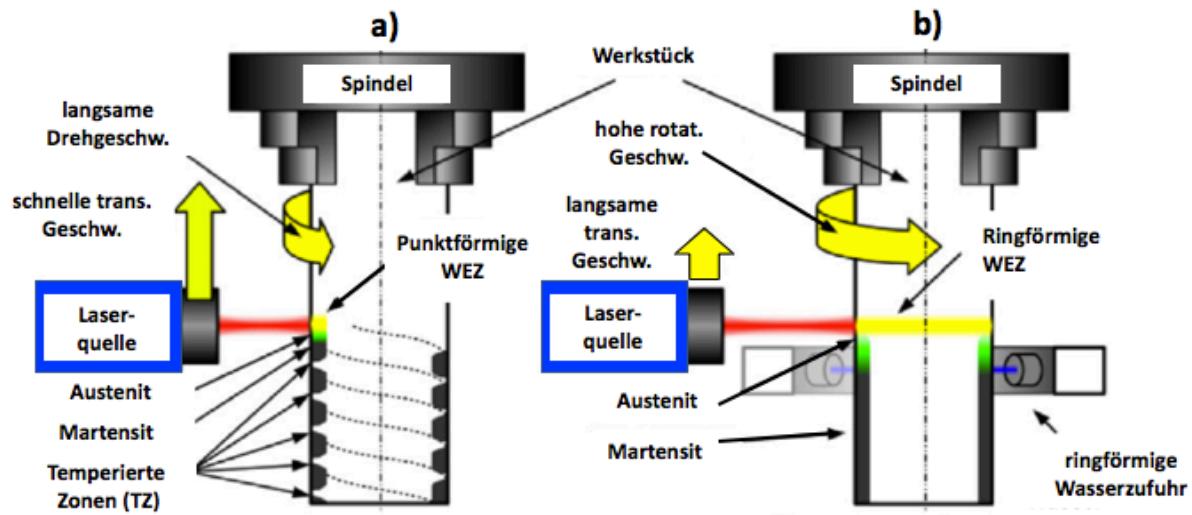


Abbildung 6: Prozess Kinematik beim (a) konventionellen Laserhärteverfahren sowie beim (b) Ring-Spot Härteverfahren; auf einer Hauptspindel (Drehbank) mit variablen rotatorischen und translatorischen Geschwindigkeiten nach /ORA2014/

2.3.2 Ring-Spot-Geometrie

Die Ring-Spot-Geometrie ist eine dynamisch erzeugte Laserspot-Geometrie. Bei diesem Verfahren wird die Drehzahl n des zylindrischen Bauteils, im Vergleich zu konventionellen Verfahren, wesentlich erhöht, um eine spiralförmige mehrspurige Bearbeitung zu vermeiden. Der Prozess wird in zwei Hauptphasen unterteilt: 1) das Anzünden und 2) die Verbreitung.

/GIO2010/ /ORA2014/

Beim Anzünden bleibt die translatorische Geschwindigkeit der Lasereinrichtung an der Anfangsposition zunächst bei Null $V_x(x = 0) = 0$. Aufgrund der schnellen Drehung und einem konstanten Energieeintrag des Laserstrahles, entsteht ein erhißter Ring auf der zylindrischen Oberfläche. Erst nach dem Anzünden wird die Lasereinrichtung translatorisch angetrieben. Während der Verbreitung wandert der erzeugte ringförmige Spot auf dem Bauteil entlang und bearbeitet die Oberfläche in einer einzelnen umfassenden „Spur“. Abbildung 6 gibt eine visuelle Darstellung der Prozesskinematik. Dabei ist zu beachten, dass bei Härteverfahren eine Abschreckung des Bauteils erfolgt. Das heißt, dass ein ausreichender Temperaturunterschied im Bauteilrand und im Grundmaterial die Temperaturdiffusion ermöglicht, welche eventuell, durch ein Abschreckmedium wie Wasser, zu unterstützen ist. Die „einspurige“ Bearbeitung entlang des Bauteils liefert konstante Härtewerte auf dem ganzen bearbeiteten Werkstück. Der thermische Einfluss von angrenzenden Spuren, der zum „Back Tempering“ führt, ist dadurch

beseitigt. Abbildung 7 zeigt die entstehende Oberflächenhärte entlang des Bauteils durch das konventionelle Verfahren und das Ring-Spot Verfahren.

/ORA2014/ /REA2004/ /GIO2010/

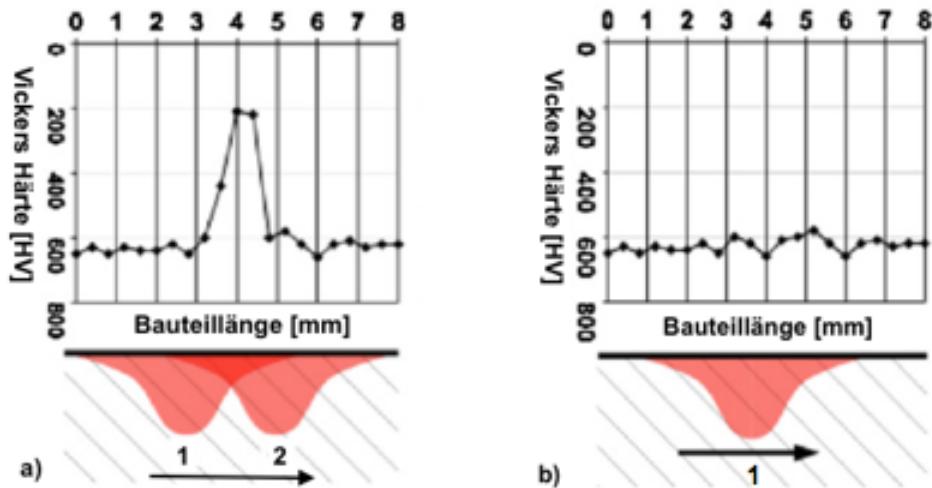


Abbildung 7: Härteverlauf entlang des AISI 1040 Proben bei (a) konventionellen Verfahren mit einer mehrspurigen „Multi-Track“ Bearbeitung und (b) Ring-Spot Verfahren nach /ORA2014/

Orazi et al. /ORA2014/ haben in ihrem Versuch mit einem 1kW Nd: YAG Festkörperlaser gearbeitet. Die AISI 1040 Proben mit Durchmessern von 20 und 30 mm wurden bei konstanter Laserstrahlleistung und geänderten Prozessparametern experimentell bearbeitet. Der Einfluss der Größe des Laserspotdurchmessers in Abhängigkeit zu rotatorischen und translatorischen Geschwindigkeiten wurde untersucht. Aufgrund der niedrigen simulierten Anzündungszeit und des Härteprofils wurden diese entsprechend angepasst, um eine zulässige Härtetiefe von etwa 2 mm zu erreichen. Abbildung 8 stellt die untersuchten Prozessparameter und die daraus veränderliche Anzündungszeit dar.

Beim Vergrößern der Bauteildurchmesser um 50% wurde eine Erhöhung der Anzündungszeit bei gleichbleibender Leistungsdichte von etwa 500% festgestellt. Die translatorische Geschwindigkeit ist bei einer gleichbleibenden Strahlleistung vom Laserspotdurchmesser abhängig. Dabei ist eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit nicht durch eine Änderung des Spotdurchmessers, sondern durch eine höhere Leistung zu erzielen. Solange die Drehzahl über einen minimalen Wert gehalten wurde, gab es keine Indizien dafür, dass der Prozess von der rotatorischen Geschwindigkeit abhängig ist. Eine genaue Untersuchung dieses Wertes ist erforderlich. /ORA2014/

Bauteil-durchmesser [mm]	Laserspot-durchmesser [mm]	Rotatorische Geschwindigkeit [U/min]	Translatorische Geschwindigkeit [mm/min]	Anzündungszeit [s]
20	D1 = 2.7	1140 (1.2 m/s)	30	5–40
			40	
			50	
			60	
			30	30–50
	D2 = 4.3	1140 (1.2 m/s)	40	
			45	
			40	30
			45	
30	D3 = 5.2	1140 (1.8 m/s)	50	
			10–20	180
			760	140
	D2 = 4.3	1140 (1.2 m/s)	100–180	
			760	160

Abbildung 8: Einfluss der untersuchten Prozessparameter von AISI 1040 Proben in Ring-Spot-Geometrie Verfahren zur Bestimmung von Einflussgrößen bei konstanter Laserstrahlleistung nach /ORA2014/

In einer anderen Studie haben Giorleo et al. /GIO2010/ AISI 1040 Proben getestet. Die Proben wurden bei allen Prozessversuchen bis zur Umwandlungstemperatur von 1.200 °C gebracht und gehalten. Mithilfe eines Pyrometers und eines PID-Reglers, welche Bestandteile des Steuerungsregelkreises sind, konnten Prozesstemperaturen überwacht und der Laserstrahl, beim Erreichen der Umwandlungstemperatur, ausgeschaltet werden. Durch die automatische Regelung wurde die Reproduzierbarkeit des Prozesses ermöglicht und systematische Fehler vermieden. Dabei wurden je zwei Laserleistungen (1.250 W; 1.000 W) und Drehzahlen (2.100 U/min; 1.150 U/min) untersucht. Daraus entstanden vier Leistungs-Drehzahl-Verhältnisse oder Energiezufuhren E, womit die Proben mit Durchmessern von 5, 10 bis 25 mm bearbeitet wurden. Der Versuch hat im diesem Fall ebenso gezeigt, dass Proben unter 15 mm eine zulässige gehärtete Tiefe von etwa 2 mm erreicht haben. Nichtsdestotrotz weist die gehärtete Schicht ab den 20 mm Proben eine unzulässige Tiefe auf. Der Querschnitt einer laserbearbeiteten Probe ist in Abbildung 9 zu sehen. /GIO2010/

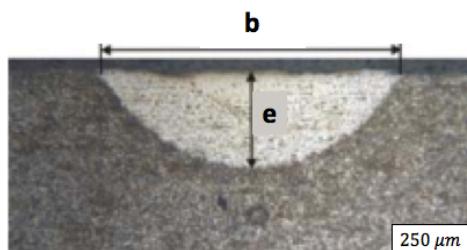


Abbildung 9: Querschnitt einer einspurigen lasergehärteten Probe nach /GIO2010/

Der Versuch und die durchgeführte Simulation haben gezeigt, dass die Tiefe e und die Breite b der bleibenden Härtezone (HZ) mehr vom Durchmesser des Bauteils als von der Energiezufuhr beeinflusst werden. Die Anzündungszeit des Ringspots wird direkt von der Größe des Durchmessers beeinflusst und so vergrößert, dass eine Selbstabschreckung, aufgrund der langsameren Erwärmung des Grundmaterials, nicht vollständig stattfindet. /GIO2010/ /ORA2014/

2.3.3 Bearbeitung mit Optiken

Torische Spiegel oder Spiegel mit gebogener Fläche werden für die Bearbeitung von Stäben und Zylindern eingesetzt. Diese Optikelemente bieten die Möglichkeit, Stäbe und Zylinderaußendurchmesser sowie Innendurchmesser zu bearbeiten. Torische Spiegel sind in der englischen Literatur auch als Axicon und Waxicon gekennzeichnet. Waxicon Spiegel können den Laserstrahl so reflektieren, dass der Strahl um 180° Richtung Quelle zurückgeleitet wird. Die kegelförmigen Optiken können eine Lücke im Hauptstrahl öffnen oder schließen, indem sie ihn radial teilen und auf die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks umleiten. Abbildung 10 zeigt mögliche Anordnungen für torische Spiegel im Detail. /REA2001/ /BLI2013/

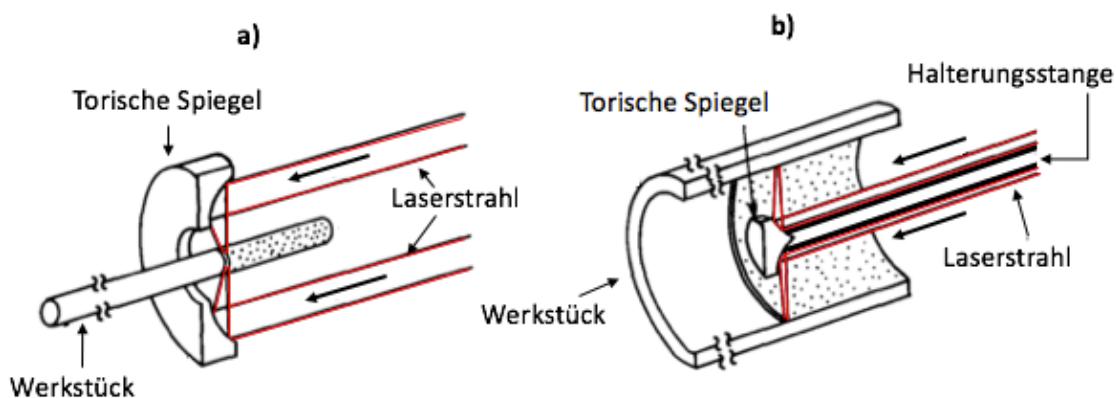


Abbildung 10: „Ring-of-Fire“ und „Pass-through“ Anordnungen mit torischen Spiegeln für die Bearbeitung von a) Außen- und b) Innendurchmessern eines zylindrischen Massiv- und Hohlkörpers nach /KOU1983/

Die „Ring of Fire“ Anordnung, welche den Strahl öffnet und radial in einer ringförmigen Spur auf der Oberfläche des Zylinders teilt, eignet sich für die Bearbeitung von Außendurchmessern, während sich die „Pass-through Waxicons“ für innere Durchmesser einsetzen lassen. Die Strahldichte auf der Oberfläche des Bauteils wird aufgrund der radialen Teilung des Laserstrahles geringer. Durch das Entstehen eines relativ großen Ring-Spots ergibt sich eine begrenzte Durchmessergröße von etwa 25 mm für jede 8 kW an verfügbarer Leistung.

/REA2001/ /BLI2013/ /CAR2010/ /KOU1983/

Systeme der schwankenden Optik basieren, wie bei der Ring-Spot-Geometrie, auf der dynamischen Erzeugung des ringförmigen Laserspots. Im Gegenteil dazu ist die Hauptbewegung des Bauteils bei schwankender Optik nicht rotatorisch, sondern translatorisch entlang der Bauteilachse. Das Bauteil sowie der Axiconsiegel können translatorisch angetrieben werden. Abbildung 11 beschreibt eine mögliche schwankende Optikanordnung zur Bearbeitung von zylindrischen Stäben.

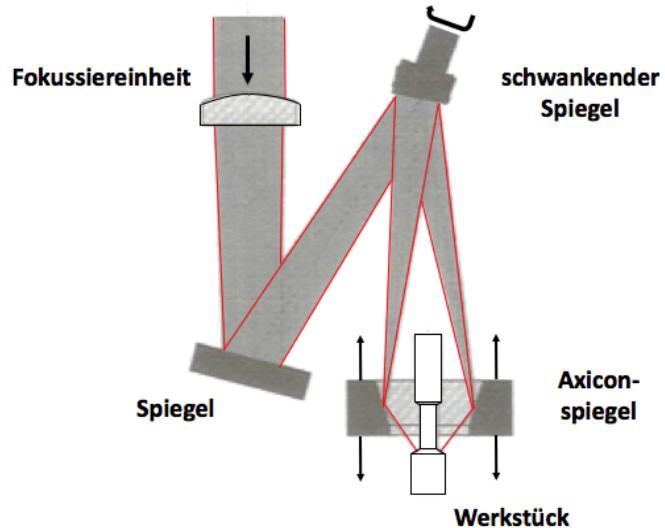


Abbildung 11: Spezielle Anordnung eines schwankenden und eines Axicon Spiegels für das Laserhärten eines zylindrischen Bauteils nach /REA2001/

Durch das Anbringen eines Spiegels auf einer rotierenden Achse, ein sogenannter schwankender Spiegel oder „Wobble Mirror“, wird der Laserstrahl kreisförmig reflektiert. Ein zusätzlicher Spiegel reflektiert den, im Kreis rotierenden, Laserstrahl ein weiteres Mal auf die Bauteilloberfläche, um den ringförmigen Brennfleck zu schaffen. Aufgrund der schwankenden Optik kann ein ringförmiger Spot auf einem nicht rotierenden Bauteil erzeugt werden. Dadurch wird die Handhabung des Bauteils deutlich vereinfacht. Die Anordnung des schwankenden Spiegels auf einer Achse hat eine komplizierte Spiegelkühlung zur Folge. Der Laserstrahl wird von den Optikkomponenten lediglich umgeleitet und nicht geteilt. Dadurch kann mit geringem Leistungsverlust auf der Oberfläche gerechnet werden. Im Vergleich zu torischen Spiegeln würden diese den Hauptstrahl und die Laserleistung radial teilen und zu größeren Leistungsverlusten führen.

/BLI2013/ /REA2001/

Eine Scanner-basierte Strategie entsteht durch die schnelle Bewegung der Lasereinrichtung, die zu einem virtuell größeren Laserspot führt. Im Prinzip wird die

Lasereinrichtung mithilfe von Robotern und serieller Kinematik sehr schnell im Raum bewegt, um einen virtuellen Laserspot zu erzeugen. Im Gegenteil zum Ring-Spot Verfahren geht die Hauptbewegung vom Laserkopf und nicht vom Bauteil aus. Aufgrund der schnellen Prozessgeschwindigkeit und der Größe der virtuellen Fläche, werden die Einwirkzeit und die Strahldichte kleiner. Dadurch bleibt die Temperatur des Bauteils nur kurz oberhalb der Austenitisationstemperatur T_A . Beim Laserhärteten führen diese kurzen Einwirkzeiten zu gehärteten Schichten < 1 mm. /MAR2017/

2.3.4 Zwischenfazit Hauptbearbeitungsverfahren

- I. Temperierte Zonen auf der Bauteiloberfläche führen zu Oberflächenschäden und Bauteilversagen. Der „Back-Tempering“ Effekt sollte vermieden werden.
- II. Das Selbstabschrecken des Bauteils ist zu sichern und im Notfall mit Kühlmitteln, wie z.B. Wasser, zu unterstützen.
- III. Das Benutzen eines Spannfutters zur Bauteilsicherung führt zu einer „Toten Zone“ die ohne Umspannung nicht bearbeitet werden kann.
- IV. Die Scanner-basierte Strategie und das Ring-Spot Verfahren machen sich die dynamische Vergrößerung des Laserspots zunutze.
- V. Schwankende Optik erfordert, aufgrund der hohen Leistungen in der LMB von über 1 kW, eine sehr komplexe Kühlung des Optikelements bei schwankender Bewegung.
- VI. Die Radialverteilung der Hauptstrahldichte bei Axiconsiegel bedingt sehr hohe Leistungen, um eine nützliche Strahldichte für die LMB des entstehenden Ring-Spots zu erschaffen.
- VII. Beim Ring-Spot Verfahren weist eine Mindestdrehzahl im Bereich von 1000 U/min keinen großen Unterschied gegenüber höheren Drehzahlen für die Strahldichteverteilung auf der Bauteiloberfläche auf.
- VIII. Das Drehen der Lasereinrichtung um das Bauteil herum ist für hohe Drehzahlen komplex. Eine rotierende Scanner-Strategie ist ausgeschlossen.

Die Laserbearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen unter den Gesichtspunkten Produktivität, Qualität und Kosten erfordert eine automatisierte Produktionsstrategie zur Reproduzierbarkeit der Bearbeitung sowie die Verkürzung von Rüstzeiten. Die Qualität der Bearbeitung ist so zu steigern, dass temperierte Zonen vermieden werden. Dies erfordert eine einspurige ununterbrochene Bearbeitung, die den „Back-Tempering“ Effekt beseitigt. Durch die komplette Bearbeitung des Rohteils werden Materialkosten und Einzelkostenstellen, wie die Nacharbeit der Bauteile, möglichst gering gehalten. Unbearbeitete „Tote Zonen“

unter einem Spannfutter sind aufgrund der Materialverschwendungen und der erforderlichen Nachbearbeitung des Bauteils ausgeschlossen. Eine Steigerung der Effizienz kann dann erfolgen, wenn geeignete Hauptbearbeitungsverfahren einen geringen Leistungsbedarf aufweisen. Die torische Spiegelanordnung ist aufgrund des sehr hohen Leistungsbedarfs von der Betrachtung ausgeschlossen.

/BLI2013/ /REA2001/ /MAR2017/ /GIO2010/ /ORA2014/ /KOU1983/

2.4 Strahlformungssysteme

Das Strahlformungssystem ist neben der Werkstückhandhabung eines der wichtigsten Komponenten der Laserstrahlanlage (vgl. Abbildung 1). Die Laserquelle übt Einfluss auf die Strahlmanipulation und auf die technologische Ausrüstung der entsprechenden Laserquelle aus. Je nach Laserquelle unterscheiden sich die erforderlichen Komponenten des Strahlformungssystems. Diese Unterschiede erzeugen eine Vielfalt von Kombinationen, die sich für verschiedene Verfahren, Werkstoffe und Anwendungen eignen. /REA2001/ /BLI2013/

2.4.1 Absorption, Reflexion und Wärmeleitung anhand des Lasersystems

Die Laser-Materie-Kopplung ist ein entscheidendes Merkmal jedes Laserbearbeitungsprozesses, welches die allgemeine Effizienz und die lieferbare Leistungsdichte beeinflusst. Die Kopplung ist von der Art der Strahlung sowie vom Material des Bauteils abhängig. Die Absorption bzw. Reflexion einer Oberfläche wird zudem von der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt, wobei sich Bauteile mit einer spiegelnden Oberfläche anders verhalten als Bauteile mit einer matten Oberfläche. Eine ähnliche Wirkung haben Verschmutzungen auf die zu bearbeitenden Oberflächen, da diese den Prozess ebenfalls negativ beeinflussen können. (vgl. Kapitel 3) Die Wellenlänge des auftretenden Strahles sowie deren Einfallsinkel auf die Bauteiloberfläche beeinflussen die Menge der absorbierten bzw. reflektierten Strahlung. Zum Beispiel kann die Absorption eines CO₂-Laserstrahles um 2.2% bis 4% durch die Bestrahlung mit einem Einfallsinkel zwischen 70 bis 80% gesteigert werden. Kürzere Wellenlängen dringen tiefer in das Werkstück rein als längere Wellenlängen. Abbildung 12 gibt das Reflexionsvermögen verschiedener Werkstoffe als Funktion der Wellenlänge an. Aufgebrachte Beschichtungen wie Graphit und Molybdänsulfid können diese Werte ebenfalls verbessern, da sie eine bessere Absorption als das Grundmaterial aufweisen können. Die Wärmeleitfähigkeit α (vgl. Kap 2.2.1) spielt auf Seiten des Werkstoffes eine wichtige Rolle und tritt bei allen nichtstationären Wärmeleistungsprozessen auf. Verschiedene Prozesse der LMB und deren benötigten Strahldichten werden als Funktion der Einwirkzeit in Abbildung 13 bildlich dargestellt. /KEN2004/

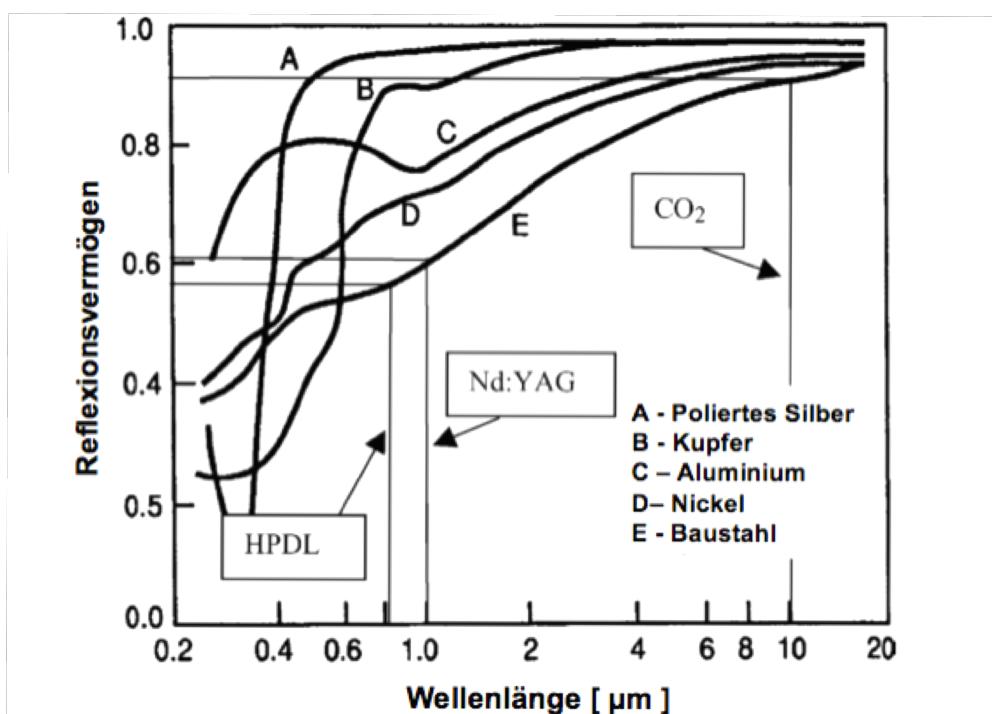


Abbildung 12: Reflexionsvermögen verschiedener Metalle als Funktion der Wellenlänge nach /KEN2004/

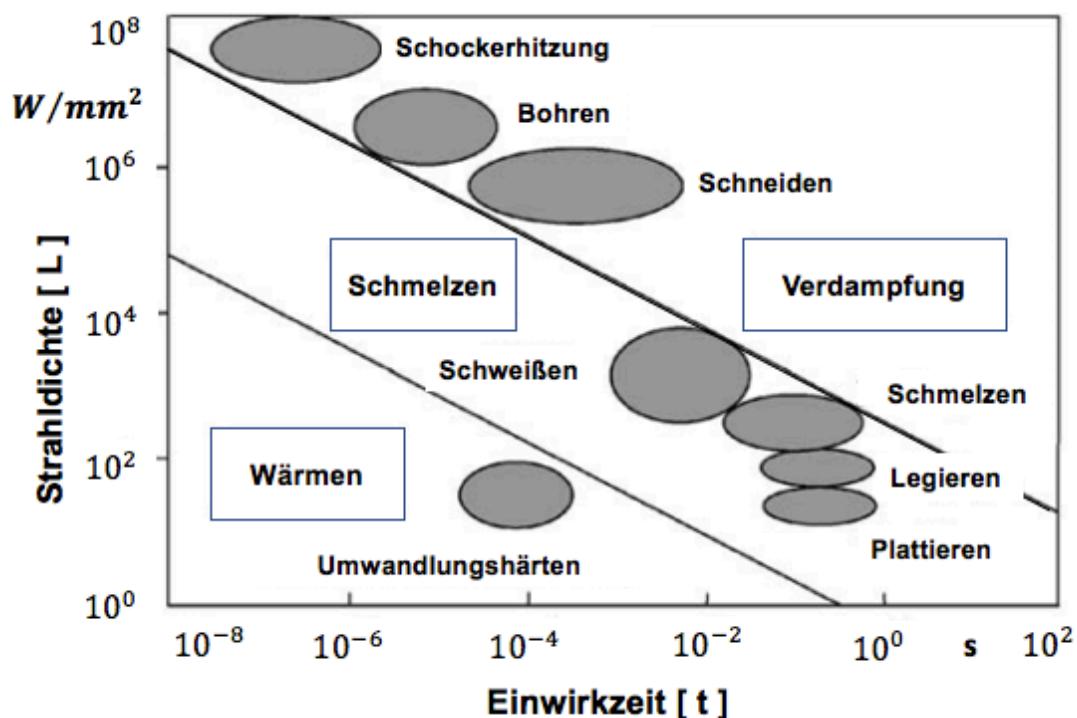


Abbildung 13: Effekte und Anwendungen von Laser nach deren Strahldichte als Funktion der Einwirkzeit nach /KEN2004/

Die Laser-Materie-Kopplung spielt für die Entwicklung einer Laserstrahlwanlage eine wichtige Rolle, da sie für einen bestimmten Werkstoff ausgelegt sein kann. In diesem Fall werden Bauteile aus Stahl betrachtet. Das Reflexionsvermögen von Baustählen verhält sich proportional zur Wellenlängengröße. Das heißt, dass bei kürzeren Wellenlängen, diese eine niedrige Reflexion bzw. hohe Absorption aufweisen. Tabelle 1 fasst die relevanten Informationen aus den einzelnen Prozessen aus Abbildung 13 zusammen und ordnet diese deren Hauptbearbeitungsprozess zu. /KEN2004/

Tabelle 1: Auszug der erforderlichen Strahldichten und Einwirkzeiten für verschiedene Prozesse in der Lasermaterialbearbeitung nach /KEN2004/

Hauptprozess	Variante	Erforderliche Strahldichte L [W/cm ²]	Einwirkzeit t [s]
Laserhärten	Umwandlungshärten	$10^1 - 10^2$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Laserabtragen	Schneiden, Bohren	$10^5 - 10^7$	$10^{-6} - 10^{-2}$
Laserauftragen	Schweißen, Schmelzen	$10^2 - 10^3$	$10^{-1} - 1$

2.4.2 Laserquellen

Es existiert eine Vielfalt an Laserquellen und Kombinationen eben dieser in der LMB. Die Eingrenzung der Laserquellen erfolgt jedoch nach spezifischem Verbrauch und Leistungsbedarf, wobei nach dem aktiven Medium für die Lasererzeugung, der Strahlführung, und der erforderlichen Leistung unterschieden wird. Der Laser entsteht dadurch, dass Elektronen von den äußeren in die inneren Elektronenschalen des Atoms wandern. Die Elektronen bewegen sich dabei von hoch- in niederenergetische Schalen, wobei sie die Restenergie emittieren und den Laser erzeugen. Die Strahlerzeugung findet im Resonator statt.

/DAV2012/ /BLI2013/

Die Klassifizierung von Lasern nach deren Leistungsbedarf erfolgt allgemein nach /DAV2012/ in zwei Gruppen:

- Niedrigleistungslaser
- Hochleistungslaser

Abbildung 14 stellt mögliche Anwendungen von Niedrig- und Hochleistungslasern bildlich dar.

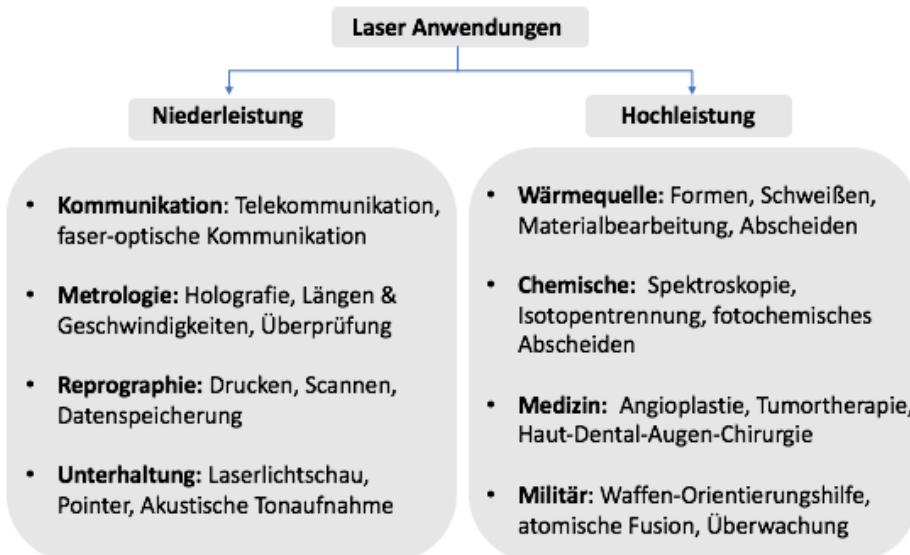


Abbildung 14: Laser Anwendungen nach deren Leistungsspektrum /DAV2012/

Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs werden Hochleistungslaser in der Lasermaterialbearbeitung eingesetzt. Hier ist eine weitere Einteilung nach Betriebsart, kontinuierlicher oder gepulster, vorzunehmen. Je nach Laserquelle können diese in den zwei Betriebsarten benutzt werden. In der Regel erreichen gepulste Laserformungssysteme die höchsten Leistungsspitzen, während kontinuierliche, auch als Dauerstrich-Betrieb bezeichnet, eine quasi-ununterbrochene Strahlleistung und somit eine konstante Leistungsdichte liefern. Demzufolge wird ein quasi-stabiler Temperaturgradient erschaffen. Eine weitere Eingrenzung erfolgt nach den relevanten Einflussgrößen des Laserstrahles. Eine geringe Divergenz, Monochromatizität, Stabilität, Größe, Helligkeit und Kohärenz des Strahles sind für die LMB von Bedeutung.

Aufgrund der schnellen Entwicklung und dem Einsatz von Kohlenstoffdioxid und Neodym: Yttrium-Aluminium-Garnet (Nd: YAG) Lasern haben sich diese in den letzten Jahrzehnten in der Industrie etabliert. Darüber hinaus sind andere Technologien, wie der Hochleistungsdiodenlaser (HLDL) und Faserlaser entwickelt worden und stellen heutzutage weitere Möglichkeiten in der LMB dar. Ein Vergleich der wichtigsten Größen der bereits erhältlichen Lasersysteme ist in Tabelle 2 zu sehen, wobei sich alle Strahlformungssysteme für unterschiedliche Prozesse der LMB eignen, da diese stark in Qualität des Strahles, Flexibilität und Kosten variieren.
/REA2001/ /DOW2009/ /EIC2006/ /LIM2007/ /DAV2012/

Tabelle 2: Zusammenstellung der relevanten Größen von kommerziell verfügbaren Laserformungssystemen für die Lasermaterialbearbeitung; Nd: YAG-, CO2-, HDL und Faserlaser im Vergleich nach /LIM2007/ /LI2000/ /KEN2004/ /REA2001/ /EIC2006/ /IND2017/ /IPG20017/ /TRU2017/ /COS2017/

Kommerzielle Lasersysteme für die Lasermaterialbearbeitung				
Lasersystem	Nd: YAG	CO2	HDL	Faserlaser
Typ	Festkörperlaser	Gaslaser	Halbleiterlaser	Festkörperlaser (Spezielle Form)
Aktives Medium	Nd: Yttrium aluminium garnet	CO2	Halbleitermaterial	Nd: Glasfaser auch mit seltenen Erd-Ionen dotiert: Pr, Er, Tm3+
Betriebsart	Kontinuierlich Gepulste	Kontinuierlich Gepulste	Kontinuierlich Gepulste	Kontinuierlich Gepulste
Wellenlänge	1,06 [μm]	10,6 [μm]	800-940 [nm]	1,045 [μm]
Anzahl der erzeugten Laserstrahlen	1	1	beliebig	beliebig
Effizienz (Elektrisch-Optisch)	1 - 5 % (arc lamp gepumpt) 13 - 15% (diode gepumpt)	10 -15 %	20 - 35 % (Typisch) bis 66 %	bis > 30 % (dioden gepunkt)
Leistung	bis 5 kW	bis 6 kW	ein Diodenblock etwa 30-50 W (typisch) bis 6 kW (Gestapelt)	Single-mode bis 20 kW Multi-mode bis 500 kW
Strahlqualität	5 - 10 mrad	1 - 5 mrad	85 mrad x 200 mrad	M² < 1,1 beim Singlemode-Faserlaseraufbau M² < 1,2 bei Doppelmantelfasern
Strahlverteilung	(meistens) Gauß Strahl	(meistens) Gauß Strahl	Top-Hat: eine Richtung Gauß Strahl eine Richtung Rechteckig	Zylindrisches Vektor (ZV)
Strahlführung	Optikfasern	Spiegeloptik	Optikfasern	Optikfasern
Strahlformung	Integratoren / Kaleidoscope (kompliziert und teuer)	Integratoren / Kaleidoscope (kompliziert und teuer)	Einfache Linsenoptik	Einfache Linsenoptik
Laserspot Fokussierung			Fokussierung beliebiger Strahlen	Fokussierung beliebiger Strahlen
Anschaffungskosten	Sehr hoch	Hoch	Niedrig - Mittel	Niedrig - Mittel
Lebensdauer	60,000-100,000 [hr] Begrenzt durch: Ersatzteile, Qualifiziertes Wartungspersonal	10,000 [hr]	10,000 [hr]	20,000 -25,000 [hr]
Wartungsintervall	etwa 200 [hr] (arc-lamp) > 200 [hr] (dioden)	etwa 500-1000 [hr]	quasi Wartungsfrei	Wartungsfrei
Wartungsaufwand	Wartungen durch qualifizierte Arbeitskraft	Wartungen durch Mitarbeiter Glas-Röhre: Brechen selten	Reguläre Wartungen	Wartungsfrei
Laserkopfgröße	Groß	Groß	etwa 3x kleiner als Nd:YAG /CO2	Klein /Kompakt

Die Entwicklung von HDL vom mW in den multi-kW Bereich bietet interessante Vorteile für die Lasermaterialbearbeitung gegenüber den weit verbreiteten Varianten, wie zum Beispiel eine verbesserte elektrisch-optische Effizienz. Die Superposition von beliebigen Strahlen in der Stapel-Anordnung der Diode kompensiert Schwankungen des Laserstrahles, wobei eine sehr gute Strahlstabilität geschaffen wird. HDL eignen sich sehr gut für das Laserhärten. Aufgrund von technologischen Durchbrüchen im Bereich der Pumpkomponenten und der Strahlpolarisation, die die schlechte Rohstrahlqualität kompensieren, werden Schneidprozesse ermöglicht.

/COS2017/ /KEN2004/

Der Faserlaser, welcher eine spezielle Art des FKL darstellt, verbreitert dessen Einsatzbereich und schafft einen Ausblick in die Zukunft der LMB. Seine kompakte

Bauform und der modulare Aufbau bieten einen sehr flexiblen, leistungsfähigeren Laser mit sehr guten Anpassungscharakteristiken für neue und alte Werkzeugmaschinen. Die seltene Strahlverteilung des Faserlasers, in einem zylindrischen Vektorstrahlprofil (ZV), lässt den Strahl sehr klein und präzis fokussieren. Zylindrische Vektorstrahlprofile besitzen im Vergleich zu gaußschen Strahlprofilen eine homogene Leistungsverteilung, wobei die Leistungsdichte in Gaußstrahlen radial abnimmt. Aufgrund seiner sehr hohen Fokussierbarkeit, findet der Faserlaser bereits Einsatz in der Präzisions- und Feinschneidtechnik. Diese erreichen in der Single-Mode Anordnung Arbeitsleistungen bis zu 20 kW. In der Multi-Mode Anordnung erreichen sie bis zu 500 kW, die jedoch aufgrund ihrer Größe eher irrelevant für die LMB sind.

/IPG2017/ /TRU2017/ /REA2004/

Es existieren andere Arten von FKL und Strahlformungssystemen, wie der Excimer und Kohlenstoffoxid (CO) Laser. Es werden in dieser Arbeit die für die LMB relevanten Laserquellen betrachtet. Die genannten Laserquellen sind in einem verschwindend geringen Anteil im Einsatz, weshalb kein großes Interesse für die künftige LMB besteht.

/IPG2017/ /TRU2017/ /REA2004/

2.4.3 Strahlführungssysteme

Strahlführungssysteme (SFS) sind für das Transportieren des Laserstrahles in den Arbeitsbereich zuständig und daher ein wichtiger Teil der Strahlmanipulation (vgl. Abbildung 1). Licht und somit auch Laserstrahlen können nur geradlinig strahlen, weswegen eine Änderung der Richtung unterstützt werden muss. Nach der Eingrenzung der Laserquellen werden nachfolgend lediglich die auftretenden SFS, Spiegeloptik, Optikfaser und eine mögliche Anordnung ohne Strahlführung, die Freistrahl Anordnung, erläutert. /BLI2013/ /COS2017/

2.4.3.1 Spiegeloptik

Optikelemente in der Form von Spiegeln und Prismen finden bei der Führung von CO₂- und anderen Gaslasersystemen statt. Die Spiegeloptik führt den Strahl mithilfe dieser Optikelemente durch den Arbeitsbereich auf die Bearbeitungsfläche. Es existiert eine Vielzahl von Optikkomponenten und Prismen, wie z.B. Strahlteiler und Linsen zur Strahlfokussierung sowie einfache und torische Spiegel. Diese bestehen beispielsweise aus Silikon und Germanium und verfügen über nichtleitende Reflexionsschichten, die je nach Qualität und Anwendung stark im Preis variieren. Die Komponenten sind so aufgebaut, dass sie ein hohes Reflexionsvermögen bzw.

ein geringes Absorptionsvermögen aufweisen. Dennoch entstehen meist Verluste in Form von Wärme auf den reflektierenden/umlenkenden Komponenten. Weiterhin verursachen die hohen Leistungen in der LMB hohe Temperaturen der Spiegeloptik, weswegen sie aktiv gekühlt werden müssen. Je nach Anlagenkonstruktion können verschiedene Optikkomponenten im Auskoppelfenster, das Laseraustrittsfenster, eingesetzt werden.

Auskoppelemente, meist aus Zinkselenid (ZnSn) bestehend, sind aufgrund von hohen Temperaturen sowie Luftverschmutzungen und Prozessdämpfen vor Degradierung zu schützen (vgl. Kapitel 2.4.4). Einfache und Doppel-Fenster Anordnungen, die mit Gasen, in der Regel Helium, durchströmt werden, dienen zum Schutz der Optiken für niedrig bis mittelhohe Leistungen. Aerodynamische Fenster sind Strahlaustrittsöffnungen ohne Schutzfenster und bieten einen Vorteil bei sehr hohen Leistungen, da eine Kühlung nicht mehr erforderlich ist. Mithilfe eines Schutzgases oder trockener Druckluft wird ein Schutzmantel erschaffen, um das Eindringen von Partikeln und Prozessdämpfen in die Optik zu verhindern. Der Gebrauch von Druckluft und/oder Gas differenziert das Lasersystem erneut und erhöht damit ebenfalls dessen Anschaffungskosten.

/REA2001/ /PAR1973/ /HÜG1992/ /KOU1983/

2.4.3.2 Faseroptiken

Der im Resonator produzierte Strahl von Festkörper- und Diodenlasern wird mit Faseroptiken in den Arbeitsbereich transportiert. Hochleistungs-Faseroptiken bestehen aus einem Siliziumdioxidkern (SiO_2), auch Quarzglas genannt, und Isolierschichten aus Polymeren. Diese können Wellenlängen zwischen 400-1200 nm besonders gut leiten, wobei die übertragbare Leistung in verschiedenen Durchmessern unterschieden wird. Strahldichten über 1 MW/cm^2 sind in Einfaser-Führungssystemen zu vermeiden, da es zum Überhitzen kommen könnte. Mehrfaseranordnungen bieten in diesem Fall eine sichere Variante für Prozesse, die höhere Strahldichten benötigen, wobei die Strahlung jeder Faser fokussiert wird. Die Faseroptiken, auch als Glasfaser und Lichtleitkabel (LLK) gekennzeichnet, bieten im Vergleich zur Spiegeloptik ein einfacheres Strahlführungssystem, das sich unkompliziert in der Fabrik und zum Einsatz in Robotik verwenden lässt. Faseroptiken unterscheiden sich außerdem in der Phasenzahl des Lichtes, wobei Mono- und Multimoden Fasern auftreten.

/REA2001//MUL2017/ /EIC2006/

Monomode oder Single-Mode Fasern funktionieren in der Regel so, dass deren kleine Kerndurchmesser nur einmodiges Licht ausbreiten lässt. Diese strenge

optische Bedingung sorgt dafür, dass die Lichtstrahlen eine geringe Stoßanzahl oder Reflexion im Faserinneren aufweisen. Damit wird eine Schwächung des Laserstrahles vermieden und die Polarisation des Lichtes beibehalten. Hochwertige Nd: YAG und deren Spezialfall, der Faserlaser, werden mit monomoden Fasern gekoppelt, um den Strahl vom Resonator in den Arbeitsbereich zu leiten.

Multimode Fasern können, wegen des größeren Kerndurchmessers, mehrphasiges Licht transportieren. Auf Kosten der Polarisation des Rohstrahles, transportieren multimode Fasern mehr Licht in einer kürzeren Zeit. Kommerzielle HDL und Nd: YAG Laser werden mit multimoden Fasern gekoppelt, um deren Leistungen mit über 80% Effizienz in den Arbeitsbereich zu bringen.

Die Kopplung der Faseroptiken erfolgt ebenso nach Berücksichtigung der Laserquelle. FKL wie der Nd: YAG und der Faserlaser, die eine geringe Strahldivergenz und eine hohe Helligkeit aufweisen, können unkompliziert mit Fokussierlinsen mit den Multimodenfasern gekoppelt werden und bei industriellen Abtragprozessen Strahldichten bis 1 MW/cm^2 liefern. Demgegenüber stellt die hohe Divergenz des Strahles von Diodenlasern eine Schwierigkeit für deren Kopplung mit der Glasfaser dar. Die Entwicklung und Verfügbarkeit von Glasfasern mit einer größeren numerischen Apertur würden dies ermöglichen. Die hohe Komplexität lässt die Kosten für die gesamte HDL-Anlage von einem niedrigen auf ein mittel-teures Niveau ansteigen.

/REA2001/ /MUL2017/ /EIC2006/

2.4.3.3 Frei-Strahl Anordnung

Die Frei-Strahl Anordnung stellt eine weitere Möglichkeit zur Vereinfachung des Strahlführungssystems dar. Sie eignet sich für kompakte Lasersysteme wie den HDL, die direkt im Arbeitsbereich, ohne oder mit einer stark gekürzten Optikfaser, eingesetzt werden können. Costa Rodrigues et al. /COS2017/ haben mit einem HDL in Frei-Strahl Anordnung die Strahlparameter gemessen und mit einer konventionellen Strahlführung verglichen. Die Werte weichen nur wenig voneinander ab, wobei die geringe Masse des Lasermoduls von etwa 20 kg am Schneidkopf der Schneidanlage gute Beschleunigungswerte erreicht hat. HDL haben in dieser Anordnung den Vorteil, dass die Rohstrahlgeometrie direkt verarbeitet werden kann. Eine Kopplung mit Optikfasern ist daher nicht erforderlich, wobei das Zwischenschalten einer Polarisiereinheit zur Verbesserung der eher schlechten Strahlqualität dient, um den Einsatz in Schneidprozessen zu ermöglichen. Dadurch, dass auf den Einsatz von Optikfasern verzichtet wird, steigt die Effizienz um etwa 15

bis 20%, da Verluste im Führungssystem nicht auftreten. Die Rohstrahlgeometrie von Dioden sowie Faserlasern lassen sich mittels einfacher Optiken fokussieren, wodurch die prozessspezifischen Strahldichten reguliert werden können.

/COS2017/ /IPG2017/

2.4.4 Hilfsmedien

Hilfssysteme, welche dem Laserzubehör der spezifischen Laserquelle zuzuordnen sowie für die Bereitstellung des Arbeits- und Schutzgases (vgl. Abbildung 1) verantwortlich sind, unterstützen die Laserstrahlquelle und den Bearbeitungsprozess für einen optimalen Betrieb. /REA2004/

Die Gasversorgung und eine aktive Kühlung der Spiegeloptik und des aktiven Mediums im Resonator spielen eine große Rolle für die Effizienz und die Strahlqualität des Lasers. CO₂-Laser benötigen im Vergleich zu Festkörper- oder Diodenlasern ein Gasversorgungssystem an zwei Stellen. Die erste Stelle befindet sich am Resonator und unterstützt die Strahlformung, die eine Mischung aus Kohlenstoffdioxid CO₂, Stickstoff N und Helium He fordert. Abhängig von der Art des Resonators des CO₂-Lasers ist der Reinheitsgrad der Gase von Wichtigkeit. Die zweite Stelle, welche bei allen behandelten Laserquellen auftritt, befindet sich am Laserkopf und dient als Arbeitsgas und Schutzgas der Auskoppelfensteroptiken. Gase an der Bearbeitungsstelle unterscheiden sich jedoch je nach Bearbeitung und Auskoppelfenster. Diese können N₂, Ar und Helium sowie eine Mische mit Druckluft sein. Verschiedene Gase haben unterschiedliche Wärmeleitungswerte, welche einen spezifischen Prozess positiv oder negativ beeinflussen können. Darüber hinaus kann das Gas aufgrund der hohen Temperaturen vom Substrat aufgenommen werden. De Lima et al. /LIM2007/ verwenden, für das Laserhärten einer Automobilwelle, einen Stickstoff N₂ Schutzmantel an der Bearbeitungsstelle. Stickstoff ist eine günstige Variante im Vergleich zu Helium, wobei diese eine bessere Wärmeleitfähigkeit aufweist. Helium könnte die Abschreckung des Bauteils (vgl. Kapitel 2.1 Laserhärten) unterstützen.

/LIM2007/ /REA2004/ /BLI2013/

Die bei der Strahlformung entstandene Wärme, erhitzt den Resonator und die Strahlformungskomponenten und bewirkt eine Verschlechterung der Strahlqualität, weswegen eine Kühlung dieser erforderlich ist. Die Laseranlagenkomponenten werden mit Wasser- und Luftkühlungssystemen, auch Chiller genannt, gekühlt, wobei zwei Arten von Wärmetauschern (WT) unterschieden werden:

- Indirekte Wärmetauscher
- Direkte Wärmetauscher

Indirekt gekühlte Systeme besitzen eine interne Wasserkreislauf- und Reinigungsanlage, die von einem externen Kühlmedium im WT gekühlt wird. Direkte WT pumpen im Gegensatz dazu das Wasser, welches auch extern gekühlt wird, in die Anlage und durch den Resonator, die Optiken (wenn erforderlich) und die Steuerung der Anlage.

Eine Vielzahl von Kühlungsanlagen ist heutzutage erhältlich. Diese können nach Kühlmedium (Wasser, Luft, Kühlmittel) oder Kühlkapazität, gegeben in den sogenannten „britisch thermal units“ BTU/h oder kW, unterschieden werden. Große und robuste Systeme werden durch kompakte Lösungen ersetzt, wobei Platz gespart und die Effizienz gesteigert wird.

/THE2015/ /REA2004/

2.4.5 Zwischenfazit Strahlformungs- und Strahlführungssysteme

- I. Bei kürzeren Wellenlängen tritt eine Verringerung der Reflexion bzw. eine Verbesserung der absorbierten Strahlenergie auf.
- II. Die spezifischen Strahldichten und Einwirkzeiten, die je nach Verfahren erforderlich sind, benötigen ein flexibles Strahlformungssystem mit Fokussiergenauigkeit.
- III. Festkörper-, Dioden- und Gaslasersysteme besitzen die erforderliche Strahlleistung, Wellenlänge und Strahlqualität für die LMB.
- IV. Dioden- und Faserlaser bieten eine höhere elektrisch-optische Effizienz sowie eine längere Lebensdauer bei wartungsfreiem Betrieb in einem kompakten Aufbau.
- V. Eine nahe optimale Rohstrahlgeometrie vereinfacht die Fokussierbarkeit des Strahles und verringert die Komponentenanzahl der Fokussiereinheit.
- VI. Spiegeloptiken erfordern eine aktive Kühlung und komplexe Bewegungen. Dioden- und FKL-Laserstrahlen können mit Faseroptiken gekoppelt werden, wobei Multi-Faser Anordnungen sehr hohe Leistungen liefern können. Die Effizienz von Spiegel- und Faseroptik liegt bei etwa 80 %.
- VII. Eine Steigerung von etwa 15 % bietet die Frei-Strahl Anordnung des Laserresonators am Laserkopf mit direkter Fokussierung ohne Strahlführung.
- VIII. Kühlungsanlagen sind in kompakter Bauform erhältlich. Ein Druckluft- und Gasversorgungssystem ist bei Dioden-, Nd: YAG und Faserlasern für die Strahlformung nicht erforderlich.

Die Wahl der Strahlformungs- und Strahlführungssysteme ist zudem mit den Gesichtspunkten Produktivität, Qualität und Kosten eng verbunden und beeinflusst weitere Kostenstellen in der künftigen Nutzung der Anlage. Die Berücksichtigung der räumlichen, energetischen, konstruktiven und künftigen Wartungskosten spielt bei der Konzeptualisierung eine wichtige Rolle. Eine moderne Anlage erfordert eine höhere elektrisch-optische Effizienz der Strahlerzeugung als die aktuell verbreiteten Strahlformungssysteme, bei Einhaltung oder Verbesserung der Strahlqualität. Durch die Steigerung der elektrisch-optischen Effizienz sinken die Wärmeverluste und der daraus resultierende Kühlungsbedarf. Faser- und Spiegeloptiken beeinflussen die Arbeitsleistung auf der Oberfläche des Bauteils, wobei die Frei-Strahl Anordnung eines HDL mit einer Steigerung der Arbeitseffizienz gegenüber fasergeführte Laserstrahlen verbunden ist. Die Komplexität der Spiegeloptik verursacht eine Erhöhung der Konstruktionskosten und der Komponentenanzahl. Die Kompaktheit von HDL und Faserlasersystemen führt zu der Verringerung des Arbeitsplatzes und zur Einsparung räumlicher Kosten. Bezuglich der Fokussierbarkeit führen die günstigen Rohstrahlgeometrien des HDL und Faserlasers zur Einsparungen im Bereich der Optikkomponenten. Ein quasi-wartungsfreier Betrieb beider Laserquellen beseitigt zusätzliche Wartungskosten. Durch eine Steigerung der Lebensdauer um etwa 200% gegenüber des HDL und FKL (Nd: YAG) sind Investitionskosten des Faserlasers sehr gut amortisierbar.

/LIM2007/ /LI2000/ /KEN2004/ /REA2001/ /EIC2006/ /IND2017/ /IPG20017/
/TRU2017/ /COS2017/

3 Technische Sauberkeit

Wie in früheren Kapiteln erwähnt, ist die Strahldichte in der LMB von großer Bedeutung. Die tatsächlich aufgenommene Wärme wird vom Absorptions- und Reflexionsvermögen des Werkstoffes beeinflusst, welche weiterhin von externen Fremdkörpern und Verunreinigungsfilmen auf der zu bearbeitenden Oberfläche abhängt. Ein integriertes Reinigungssystem ist in einer Laserstrahlwanlage (vgl. Abbildung 1) nicht vorgesehen. Dennoch könnte sich die Reinigungsstrategie als wichtiger Teil der Laserstrahlwanlage herausbilden, da sie Einfluss auf die Laser-Materie-Kopplung und dadurch die Effizienz der Laserstrahlwanlage hat.

/TRU2013/ /SKV2006/

3.1 Klassifizierung und Einfluss von Verunreinigungen

Die Klassifizierung von Verschmutzungen und deren Einfluss auf die Funktionalität des Bauteils, Systems oder der Baugruppen wird als technische Sauberkeit bezeichnet. Ein System ist dann technisch sauber, wenn eventuelle Restpartikel, auch Restschmutz genannt, keinen weiteren Einfluss auf den Hauptprozess haben. Abbildung 15 stellt die theoretischen Grenzschichten einer verschmutzten Metallocberfläche dar und unterscheidet zwischen Reinigungs- und Vorbehandlungsvorgängen. Ein zulässiger Sauberkeitsgrad kann deswegen nur prozessspezifisch zugeordnet werden. Die technische Sauberkeit behandelt in der Regel alle Bereiche der Produktion, Logistik, Verpackung und Handhabung eines Bauteils, wobei hier nur die direkten Einflüsse von Verschmutzungen auf die LMB beachtet werden. Daher wird eine Klassifizierung der Verschmutzungen und deren Effekte auf den Hauptprozess z.B. Laserhärten sowie Methoden und Reinigungsmittel dargestellt.

Aufgrund der Entwicklung von Technologien und den Anforderungen in der Automobilindustrie wurde die technische Sauberkeit ein Thema zentraler Wichtigkeit. Der Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) gibt beim Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie Band 19.1 und 19.2 Richtlinien zur technischen Sauberkeit an. Die Verbreitung dieser Richtlinien an die Lieferanten der Automobilindustrie hat sich, im Gegensatz zu anderen internationalen und nationalen Normen, stärker durchgesetzt, weswegen sie ebenso in dieser Arbeit als Richtlinien verwendet werden. Die entsprechende internationale Norm zur technischen Sauberkeit ist die ISO 16232. Daneben spielen die Anforderungen für Nachhaltigkeit und „Green Produktion“ eine große Rolle, wobei sich die chemische Reinigung in Richtung Schadstofffreiheit und Umweltfreundlichkeit entwickelt.

/REA2001/ /JAC2016/ /TRU2013/ /ZWI2014/ /VDA19/ /VDA19.2/



Abbildung 15: Grenzflächen einer verschmutzten Metallocberfläche nach /ZWI2014/ /HAS1996/

Eine Klassifizierung von Verunreinigungen auf Werkstoffoberflächen erfolgt nach der VDA 19 Band 1 und 2. Hier werden Partikel und filmische Unreinheiten in zwei Arten von Verschmutzungen unterteilt:

1. Partikuläre

- feste Körper aus Metall, Kunststoff, Mineralien, Gummi und Salzen in der Form von Spänen, Staubpartikeln, Korund und Fasern
- einzelne Partikel im festen Zustand, wobei pastöse Anteile nicht als Partikel gelten

Metallische und nicht-metallische Partikel sind zu unterscheiden, wobei metallische Partikel eine glänzende, reflektierende Oberfläche aufweisen.

2. Nicht-Partikuläre

- auch als filmische Verschmutzungen gekennzeichnet
- dünne organische Schichten wie Öle und Fette in Form von Filmen, Belägen und Schichten
- Rückstände anderer Vorprozesse (z.B. Korrosionsschutzmittel-, Waschmittel-, Kühlmittelbestandteile)

/TRU2013/ /VDA19/ /VDA19.2/ /ZWI2014/ /SCH2016/

3.2 Einfluss von Verschmutzungen auf den Laserbearbeitungsprozess

Die technische Sauberkeit ist ein entscheidendes Qualitätsmerkmal in der LMB, welches die Lebensdauer und die Funktionstüchtigkeit der bearbeiteten Bauteile beeinflusst. Verunreinigungen können, je nach Größe und spezifischer Charakteristik, das Absorptions- und Reflexionsvermögen von Metallen kritisch beeinflussen. /RJL2017/ /REA2004/

Engler /ENG2014/ untersucht den Einfluss von Kühlsmierstoff (KSS)-Resten auf das Laserhärten von C45 und 42CrMo4 Proben. Die kontaminierten Proben weisen kleinere Härtewerte auf, wobei die Durchmessergröße und der Werkstoff des Bauteils diese beeinflussen. Die Versuchswerte sind Abbildung 16 zu entnehmen. KSS-Reste sind nicht-partikulären Verschmutzungen zugeordnet. /ENG2014/

		Parameter	Härte [HRC]	
			P [W]	kontaminiert
C45	Ø 10 mm	400	< 20*	51,1 ± 2,3
	Ø 25 mm	600	57,1 ± 6,7	60,3 ± 0,8
42CrMo4	Ø 10 mm	400	41,5 ± 1,3	47,8 ± 1,3
	Ø 25 mm	600	58,5 ± 0,8	59,9 ± 0,8

Abbildung 16: Einfluss von Kühlsmierstoffen auf C45 und 42CrMo4 lasergehärtete Proben nach /ENG2014/

In der additiven Fertigung oder für Laserauftragsverfahren spielt die technische Sauberkeit ebenso eine wichtige Rolle. Bereits in der Pulverbereitstellung treten gewisse Reinheitsanforderungen auf, die den Laserschmelzvorgang beeinflussen. Saubere Oberflächen und eine gleichmäßige Rauheit verbessern das Haftungsvermögen der Oberfläche und somit die Haftfestigkeit des aufzutragenden Materials. Das Haftungsvermögen ist bei Klebe- und Beschichtungsverfahren von großer Bedeutung. Die Beseitigung von losen Pulverpartikeln auf dem additiv gefertigten Bauteil sowie von Spänen und KSS-Resten, die durch die Nacharbeit entstehen können, sind eine Voraussetzung für spätere Prozessschritte, da diese ebenfalls negativ beeinflusst werden können. /SCH2016//CLE2017/ /CLE0000/

3.3 Reinigungsmittel

Die VDA /VDA19.2/ gibt Richtlinien für die Verkettung von Reinigungsprozessen in der Fertigungsline. Unter Berücksichtigung einer montageintegrierten Reinigung ist

diese nur dann sinnvoll, wenn die Entfernung von kritischen Partikeln am Ort des Prozesses mit einer ausreichenden Reinigungswirkung erfolgt. Aufgrund heutiger und künftiger Anforderungen der industriellen Teilereinigung werden im Folgenden nur schadstofffreie, trockene Reinigungsmöglichkeiten betrachtet, wobei eine detaillierte Einordnung der Reinigungsverfahren der DIN 8592 (vgl. Anhang II) zu entnehmen ist. /VDA19.2/

Bürsten, Fechten und Reinigungsschleifen stellen einfache Vorreinigungsmöglichkeiten der mechanischen Reinigungsverfahren dar. Trotzdem können mechanische Reinigungsverfahren die Oberfläche des Bauteils beschädigen, indem sie diese zerkratzen. Je nach Material sind Anpassungen vorzunehmen.

CO₂-Schneestrahlen bieten in Kombination mit Druckluft eine trockene Reinigungsvariante nach DIN 8592 Druckluft-Reinigungsstrahlen (vgl. Anhang II). Druckluft und CO₂-Schneekristalle werden auf die Oberfläche geblasen, wobei der Trockenschnee auf der Oberfläche sublimiert und diese reinigt. Der Reinigungsprozess mit CO₂-Schnee bietet eine badfreie, nicht-abbeizende, trockene Reinigung und ist geeignet für Kunststoffe und Metalle. Der trockene Abfall der CO₂-Schneereinigung lässt sich einfach absaugen, wodurch es einen Vorteil gegenüber Nassabfällen, bei wässrigen Reinigungsverfahren darstellt. Die konventionelle CO₂-Trockenschnee-Pellet- und CO₂-Trockenschnee-Komposit-Reinigung sind Varianten dieses Verfahrens. Dabei bietet das CO₂-Kompositverfahren eine höhere Präzision, die durch die Partikelgröße, Geschwindigkeit und Sprühdichte reguliert ist. Die CO₂-Trockenschnee-Komposit-Reinigung beschleunigt die örtlich kristallisierten CO₂-Partikel mittels eines Treibgases, bestehend aus ionisierter oder nicht ionisierter Trockenluft oder Stickstoff, durch eine Düse. Mit geringen Anschaffungskosten und einer hohen Integrationsmöglichkeit in Produktionslinien und Werkzeugmaschinen bietet die Trockenschneereinigung eine kostengünstige Variante, die sich mit anderen Verfahren, wie dem Laserabdampfen kombinieren lässt.

/VDA19.2/ /JAC2016/ /MEN2013/ /FRA2017a/ /FRA2017b/ /BAL2014/

Die Vorbehandlung mit Laserstrahlung, auch Laserabdampfen genannt, eignet sich für das Reinigen, Entfetten und Abtragen von Verunreinigungs-, Absorptions-, und Reaktionsschichten und wird oft zur Präparation von Klebeflächen verwendet. Abbildung 17 stellt die prinzipielle Darstellung des Vorbehandlungsprozesses mit Laserstrahlung dar. Das Verfahren kann nach DIN 8582 (vgl. Anhang II) dem thermischen Reinigen zugeordnet werden.

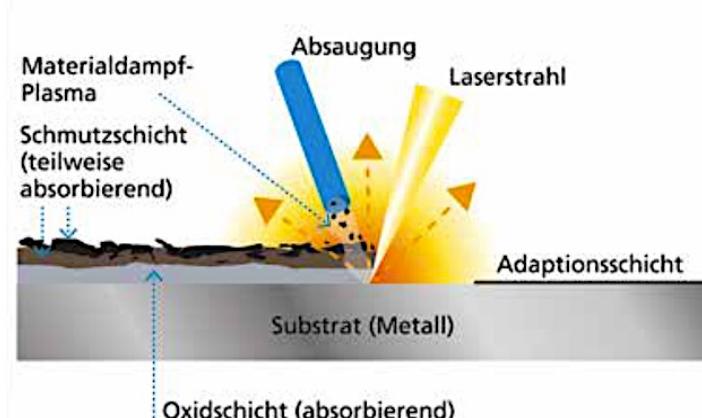


Abbildung 17: Vorbehandlung mit Laserstrahlung einer metallischen Oberfläche nach /CLE2017/

Sehr kurze aber leistungsintensive Laserimpulse erhitzen und verdampfen das Schichtmaterial in einem trockenen Vorgang. Aufgrund der kurzen Laserimpulse wird das Grundmaterial geschont, d.h. dass eine thermische Schädigung des Grundmaterials nicht stattfindet. Laserreinigungsstrahlen eignen sich ebenso für weiche Metalle wie z.B. Aluminium, da deren Oberfläche ohne mechanische Einwirkung nicht beschädigt wird. Die Vorbehandlung erfolgt unter einer Laserquelle im gepulsten Betrieb. Je nach Prozessparametern können die gereinigten Oberflächen auch strukturiert werden. Das Strukturieren oder Funktionalisieren der Grenzschicht (vgl. Abbildung 11) modifiziert die Oberflächenstruktur für verbesserte Haft- und Reflexion-/ Absorptionswerte, die die spätere Hauptbearbeitung und die allgemeine Effizienz des Prozesses unterstützen können. Laserabdampfen ist im Vergleich zu Trockenschnee günstiger im Betrieb, da CO₂-Kosten entfallen.

/BAL2014/ /CLE2017/ /CLE0000/ /FRA2017a/ /FRA2017b/

3.4 Zwischenfazit zur technischen Sauberkeit

- I. Verunreinigungen auf der Oberfläche beeinflussen das Absorptions-/ Reflexionsvermögen des Werkstoffes und dadurch die Hauptbearbeitung durch ungewollte Nebenwirkungen.
- II. Partikuläre und filmische Verschmutzungen beeinflussen die Rauheit und Haftfähigkeit der Oberfläche für auftragende und klebende Verfahren.
- III. Eine tiefe Reinigung und Vorbehandlung sorgen für eine technisch saubere Oberfläche und die Freilegung des Substrats.
- IV. Für das Laserabdampfen wird eine Laserquelle im Pulsbetrieb benötigt.

Unter der Annahme, dass keine Laserquelle zur Verfügung steht, ist das Laserabdampfen im Vergleich zu CO2-Trockenschnee und einer mechanischen Reinigung durch Bürsten mit den höchsten Anschaffungskosten verbunden. Jedoch ist bei der in dieser Arbeit ausgelegten Anlage bereits eine Laserquelle vorhanden, wobei diese im gepulsten Betrieb für die Reinigungsvorgänge betrieben werden kann. Das Laserabdampfen reinigt bis zur Grenzschicht der Oberfläche und erreicht somit die höchste Reinigungsqualität, die für einen kontrollierten und reproduzierbaren Hauptlaserbearbeitungsprozess sorgt. Die örtliche Reinigung erfordert eine zusätzliche Absaugung der Restpartikel. Die Kombination mit einer CO2-Trockenschneekanone könnte den Reinigungsvorgang unterstützen und Partikel und Restschmutz aus dem Arbeitsbereich transportieren

/VDA19/ /VDA19.2/ /FRA2017a/ /FRA2017b/ /BAL2014/ /CLE2017/ /CLE0000/ /JAC2016/ /MEN2013/

4 Hauptantriebe

Antriebe unterstützen die Laserbearbeitung und sind für die Handhabung des Bauteils zuständig (vgl. Abbildung 1). Sie bestimmen die relative Bewegung zwischen Laser und Bauteil und sorgen für den Transport des Werkstückes entlang des Arbeitsbereiches. Die verschiedenen Antriebe und deren Hilfseinrichtungen sorgen für die korrekte Positionierung, Be- und Entladung sowie die erforderlichen Bewegungen, rotatorisch und translatorisch, eines Bauteils. Es wird zwischen ein-, zwei-, und dreidimensionaler Bearbeitung unterschieden. Dabei ist eine eindimensionale Bearbeitung die einfachste Form der relativen Bewegung, wobei Werkstücke entlang deren translatorischen Achse bewegt werden. Rotationssymmetrische Körper besitzen in der Regel eine translatorische sowie eine rotatorische Achse und können in beide Richtungen angetrieben werden. Es treten drei Fälle für die Relativbewegung vom Werkstück und Laser in der LMB auf, wobei sie wie folgt gepaart werden:

1. Feste Optik – Bewegliches Bauteil
2. Bewegliche Optik – Bewegliches Bauteil
3. Bewegliche Optik – Festes Bauteil

Aufgrund der hohen erforderlichen Drehzahlen für die virtuelle Vergrößerung des Laserspots im Ring-Spot Verfahren ist die Betrachtung der Rotation der Optik um das Bauteil herum nicht sinnvoll. Die Handhabung des Bauteils wird vom eigenen Gewicht nicht beeinflusst, unter der Annahme, dass das Bauteil eine geringe Masse besitzt. Daraus resultiert eine Betrachtung von rotationssymmetrischen Bauteilen mit einem maximalen Durchmesser von 40 mm.

/BLI2013/ /CON2006/ /WEC2005/

4.1 Zustellverfahren

Die Zustellung des Bauteils umfasst die Ein- und Entladevorgänge dessen in den Arbeitsbereich. Die Zustellung wird des Weiteren in Durchlauf- und Einstechbearbeitung unterschieden. Bauteile in der kontinuierlichen Durchlaufbearbeitung werden während der Bearbeitung in axialer Richtung durch den Arbeitsbereich bewegt, wobei sie einen konstanten Abstand zu den vor- und nachfolgenden Bauteilen halten. Eine diskontinuierliche Bearbeitung entsteht dadurch, dass die Bauteile nur für Ein- und Entladevorgänge durch den Arbeitsbereich bewegt werden, wobei sie während der Bearbeitung axial gesichert sind. Das Ein- und Entladen des Bauteils in den Arbeitsbereich erfolgt automatisch nacheinander. Bei der Einstechbearbeitung findet während der Bearbeitung keine Bewegung des Bauteils in axialer Richtung statt. Bei Ein- und Entladevorgängen jedoch wird das Bauteil in senkrechter oder axialer (Seiten und Hinterlader) Richtung

zur Oberfläche bewegt. Es ist zu betonen, dass zwischen der bisher definierten Durchlaufbearbeitung und dem im Thema dieser Arbeit genannten Durchlaufverfahren zu unterscheiden ist. Nach der Aufgabenstellung versteht man das Durchlaufverfahren als die kontinuierliche oder diskontinuierliche Bearbeitung von Bauteilen, wobei das Einstechverfahren noch nicht ausgeschlossen werden darf. /CON2006/ /HEI2014/

Zu den Zustellungsverfahren gehören Lademagazine. Diese dienen als Hilfseinrichtung einer Anlage. Stangenführungssysteme ermöglichen das Bearbeiten von zylindrischen Körpern mit hoher Genauigkeit und schnellen Taktzeiten. Es wird zwischen drei Arten von Lademagazinen unterschieden:

Hinterlader schieben die in axialer Richtung angeordneten Stangen in den Arbeitsbereich. Das heißt, dass fertige Bauteile nach vorne und aus dem Arbeitsbereich geschoben werden. Nachteil dieser Anordnung ist das Verlängern der Anlagengröße. Die Bauteillänge spielt bei dieser Anordnung eine große Rolle und beeinflusst die Größe des Arbeitsbereiches sowie das Stangenführungssystem und dadurch die Kosten der Anlage.

Seitenlader lassen sich einfach nach der Länge des Körpers einstellen. Die Stangen bewegen sich senkrecht zur axialen Richtung in den Arbeitsbereich. Nach Bearbeitung werden Fertigteile herausgeschoben, während ein neues Bauteil in den Arbeitsbereich hineinfällt.

Vertikallader treten bei CNC-Pick-Up Maschinen auf. Die Anordnung in vertikaler Richtung eignet sich für die Pick-Up Spindel oder die Senkrechtdrehmaschine, die das Bauteil mit einem Greifer-/Futtersystem aus dem Lademagazin hebt. Diese Art von Magazinen vereinfachen die Werkzeughandhabung in Revolverbauformen.

Je nach gewünschter Bewegungsrichtung können Vorschubeinrichtungen als Vorschubzangen oder Nachschubstangen ausgelegt sein. Nachschubstangen oder Ziehstangen müssen mit einer Klemmhülse ausgestattet werden, um das Fertigteil aus dem Arbeitsbereich herausschieben/-ziehen zu können. Klemmhülsen verschlechtern die Handhabung des Bauteils und verlängern das Führungssystem. /CON2006/ /BLI2013/ /WEC2005/

4.2 Translatorische Bewegung

Translatorische Antriebssysteme ermöglichen der geradlinigen Bewegung von Bauteilen und Anlagenkomponenten für die Positionierung, Ein- und Entladevorgänge und Steuerung von Prozessparametern, wie z. B. die Fokussierung des Laserstrahles (vgl. Abbildung 1). Translatorische Antriebe unterscheiden sich je nach Genauigkeit und Geschwindigkeit der erforderlichen Bewegung und eignen sich für verschiedene Stellen einer Bearbeitungsanlage. /HES2006/

Die Kombination verschiedener Antriebe in einem System ergibt Bewegungen in der Ebene und im Raum. Bei beweglichen Optiken und Bauteilpositionierthesien erfolgt die Bewegung im zweidimensionalen x-y Arbeitsbereich mithilfe von zwei elektrischen Linearantrieben, welche eine sehr hohe Dynamik und Wiederholgenauigkeit aufweisen. Eine zweite Variante stellt ein einachsiges System der Lasereinrichtung dar. Mithilfe von Führungsstangen und Führungswagen ist die Lasereinrichtung entlang nur einer Achse beweglich. Diese eingeschränkte Bewegung ergibt eine hohe Positioniergenauigkeit. Rotationssymmetrische Bauteile können ebenso in der x-y-Ebene, mithilfe von Linearantrieben und hydraulischen Stangen, entlang des Arbeitsbereiches geschoben und positioniert werden. Eine übliche translatorische Bewegung von Bauteilen stellt die Bearbeitung von Werkstücken auf Laufbändern dar, die in axialer Richtung bewegt werden.

/BLI2013/ /HES2006/ WOL2004/

Die Auslegung von Antrieben erfolgt unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Anforderungen an Geschwindigkeit, Wiederholgenauigkeit und Vorschubkraft. Je nach Einsatzstelle müssen diese Anforderungen für die korrekte Positionierung von Bauteilen und Werkzeugmaschinen sowie die einzelnen Komponenten eingehalten werden. Lineareinheiten können pneumatisch, hydraulisch, elektrisch, piezoelektrisch und pneumohydraulisch angetrieben werden. Zum Beispiel ist der Betrieb von rein elektrischen Antrieben günstiger als pneumatische und hydraulische Antriebe, da Kosten für Hilfssysteme wie Pumpen und Druckluft entfallen. Abbildung 18 stellt eine Grobgliederung der verschiedenen verfügbaren Linearantriebe und deren erforderliche Führungssysteme dar. Merkmale der Antriebe sind ebenfalls in der Abbildung beschrieben.

/BLI2013/ /HES2006/ WOL2004/

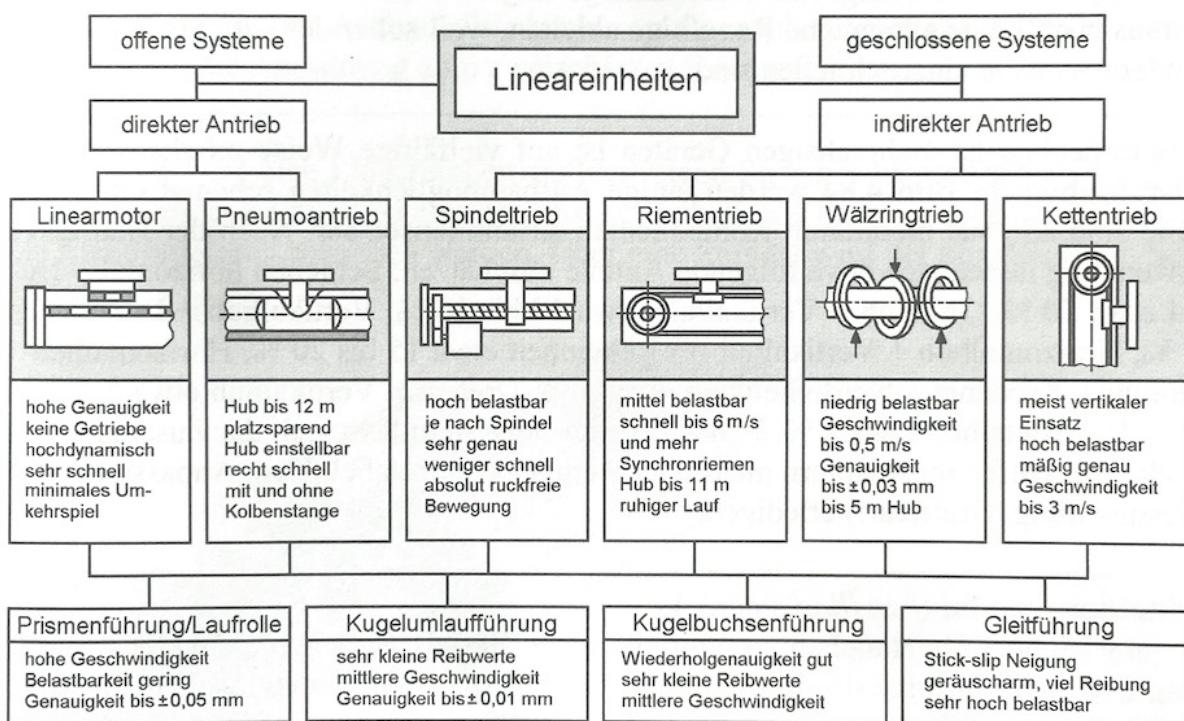


Abbildung 18: Grobgliederung von Linearantrieben und deren Führungssysteme für translatorische Bewegungen nach /HES2006/

4.3 Rotatorische Bewegung

Der rotatorische Antrieb ergänzt die Bauteilhandhabung der Laserstrahlanlage (vgl. Abbildung 1) und ist für rotationssymmetrische Bauteile besonders von Bedeutung. Diese sind für eine relative Bewegung des Bauteils zuständig, welche die Bearbeitung der gesamten Oberfläche ermöglicht.

4.3.1 Hauptspindel

Hauptspindelantriebe sind häufig bei Leit- und Zugspindeldrehmaschinen oder einfachen Drehbanken in der Werkstatt zu finden. Die Drehbewegung wird mittels einer direkt oder indirekt angetriebenen Spindel übertragen. Direkt angetriebene Spindeln hängen direkt vom Antriebsmotor ab, d.h. dass die Leistungs-Drehmoment-Kennlinie des Motors direkt auf die Hauptspindel übertragen wird. Bei indirekt angetriebenen Spindeln erfolgt dies über ein mehrstufiges Getriebe, wobei die Spindelkennlinie transformiert werden kann. Manuell-schaltbare Getriebe werden in modernen CNC-Bearbeitungszentren automatisch geschaltet, um Schwingungen, die durch Zahnräder im Getriebe auftreten, zu vermeiden. In konventionellen sowie vertikalen Drehmaschinen werden Bauteile mittels eines Spannfutters gesichert, welches die rotatorische Bewegung auf das Werkstück überträgt. Ein üblicher Dreibacken-Spannfutter ist in Abbildung 19 zu sehen. Dabei kommt es zu einem ungünstigen Griff auf der Bauteilloberfläche, da sich ein Teil dieser in der

Futterbohrung befindet. Dadurch wird die Bearbeitung eines Bauteils in einem einzelnen Vorgang verhindert. Die erforderliche Umspannung des Bauteils hat eine mindestens zweistufige Bearbeitung zur Folge. /TSC2003/ /NEU2012/

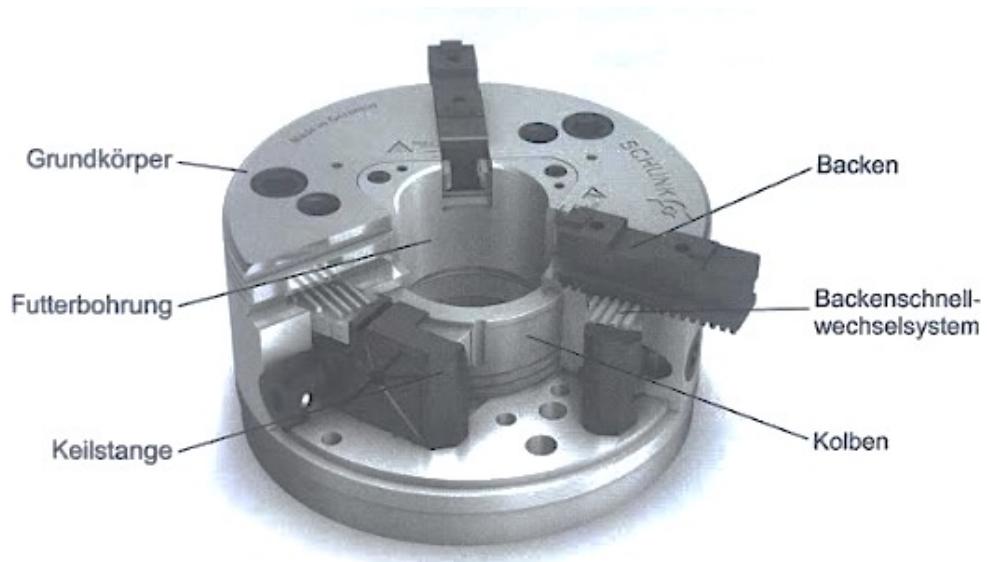


Abbildung 19: Konstruktion eines Dreibacken-Kraftspannfutters mit Backenschnellwechsel nach /NEU2012/

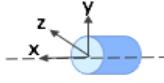
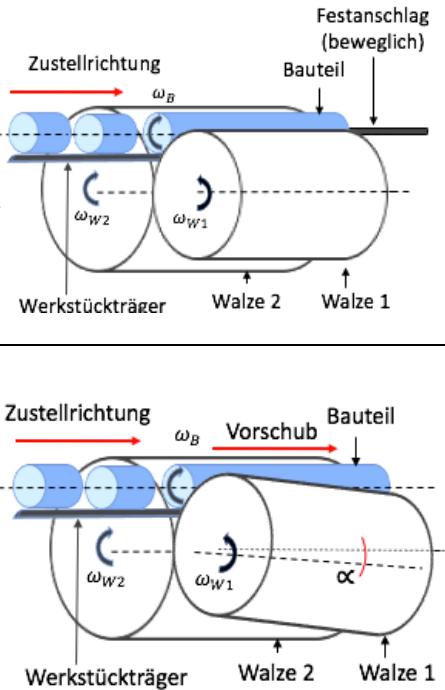
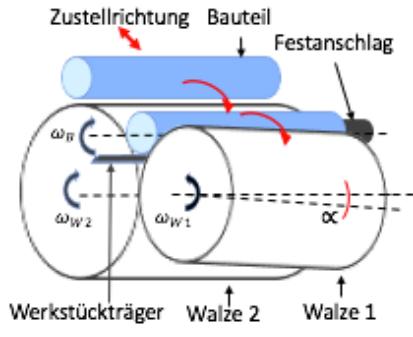
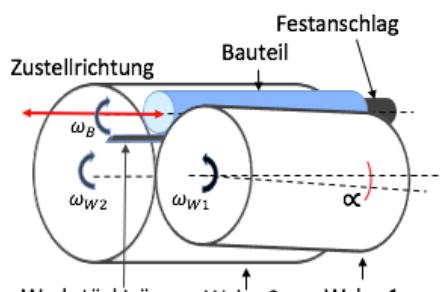
4.3.2 Spitzenlose Bearbeitung

Die spitzenlose Bearbeitung wurde häufig als ein Schleifverfahren (spitzenloses Schleifen) eingesetzt. Der Schleifvorgang erfolgt auf zwei Tragwalzen, Regel- oder Schleifwalzen. Die Drehung der Walzen wird auf das Werkstück übertragen, wobei die Winkelgeschwindigkeit ω und damit die Umfangsgeschwindigkeit v des Bauteils über die Walzen gesteuert wird. Bauteile können durch die Anpassung des Walzenmaterials und der Geschwindigkeit der Bearbeitung je nach gewünschter Oberfläche geschliffen werden. Das Schleifen von Nockenwellen im spitzenlosen Einstechverfahren oder von zylindrischen Körpern im spitzenlosen Durchlaufverfahren stellen übliche spitzenlose Bearbeitungsverfahren dar. Die drei wichtigsten Komponenten einer spitzenlosen Schleifmaschine sind der Schleifkörper, der Regelkörper und die Werkstückauflage.

Da ein Schleifvorgang für diese Arbeit nicht von Interesse ist, wird lediglich der Antrieb von zylindrischen Bauteilen durch die Walzen betrachtet.

/REI1988/ /HER0000/ /DIE2016/ /HEI2014/

Tabelle 3: Zusammenstellung der Varianten der spitzenlosen Bearbeitung nach /HEI2014/ /DIE2016/ /ENG2014/ /REI1988/ /HER0000/

Allgemeines Koordinatensystem	
Spitzenlose Durchlaufbearbeitung OHNE Längsvorschub in der Bearbeitung Zustellverfahren: Diskontinuierlicher Durchlauf <ul style="list-style-type: none"> • Bauteile in z- und y-Richtung fixiert • Diskontinuierliche Bewegung in axialer Richtung x (Festanschlag in der Bearbeitung) • Ein- und Entladen des Bauteils mit äußereren Hilfsmitteln (Schub-, Ziehstange) 	
Spitzenlose Durchlaufbearbeitung MIT Längsvorschub in der Bearbeitung Zustellverfahren: Kontinuierlicher Durchlauf <ul style="list-style-type: none"> • Bauteile in z- und y-Richtung fixiert • Bewegung in axialer Richtung x • Vorschub des Bauteils durch Neigung der Regelkörper (Walze 1) • Neigung der Regelkörperachse um 2.5° bis 3° für Vorschub 	
Spitzenlose Einstechbearbeitung (Seitenlader) Zustellverfahren: Einstech <ul style="list-style-type: none"> • Bauteil in x-Richtung durch Festanschlag fixiert • Bewegung in z- und y-Richtung für Ein- und Entladevorgänge • Neigung der Regelkörperachse um 0.5° sichert den Festanschlag 	
Spitzenlose Einstechbearbeitung (Hinterlader) Zustellverfahren: Einstech <ul style="list-style-type: none"> • Bauteil in x-Richtung durch Festanschlag fixiert • Bewegung in x Richtung für Ein- und Entladevorgänge • Neigung der Regelkörperachse um 0.5° sichert den Festanschlag 	

4.3.3 Regelung der spitzenlosen Bearbeitung

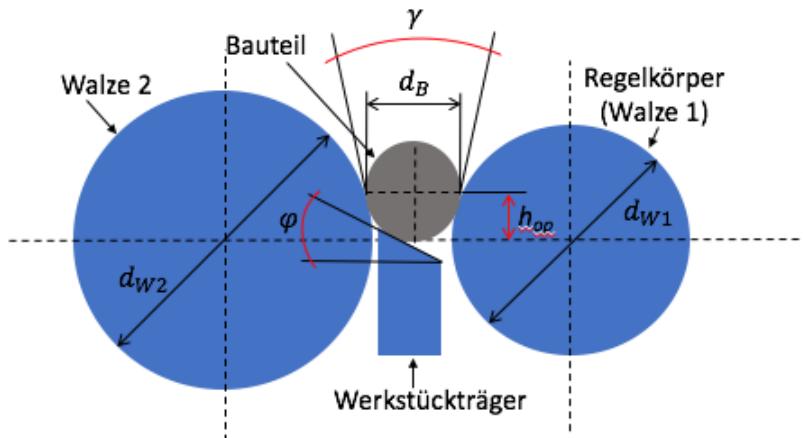


Abbildung 20: Prinzipieller Aufbau der spitzenlosen Bearbeitung ohne Längsvorschub in der Bearbeitung für rotationssymmetrische Bauteile mit Angabe der Regelgrößen nach /DIE2016/

Die Rotation der Walzen wird über deren Kontaktflächen und durch die vorhandenen Reibungskräfte auf das Bauteil übertragen, welche von Bedeutung für die Steuerung des Bauteilhandhabungssystems (vgl. Abbildung 1) ist. Abbildung 20 stellt den prinzipiellen Aufbau und die Seitenansicht der spitzenlosen Bearbeitung ohne Längsvorschub in der Bearbeitung dar. Mit einer Faustformel nach Dietrich /DIE2016/, gegeben in Tabelle 4, kann man den optimalen Höhenversatz h_{op} bestimmen. Dieser ist je nach Durchmesser einzustellen, wobei der Auflagewinkel β , der im Mittel für kleine Durchmesser 30° beträgt, angenommen wird.

Tabelle 4: Bestimmung des optimalen Höhenversatzes für Bauteile bei vorgelegten Werkzeugträger- und Tangentialwinkel nach /DIE2016/

Für $d_B < 20 \text{ mm}$	$h_{op} = d_B/2$	Bei vorgelegten $\beta=30^\circ$ und $\gamma=12^\circ$
Für $d_B > 20 \text{ mm}$	$h_{op} = \sqrt{1.6 \cdot d_B}$	Bei vorgelegten $\beta=30^\circ$ und $\gamma=12^\circ$

Die Drehzahl und der Durchmesser der Regelkörper (Walze 1) lassen sich für eine festgelegte rotatorische Geschwindigkeit des Bauteils bestimmen. Es wird angenommen, dass der hohe Reibungskoeffizient zwischen Bauteil und Regelkörper für eine gleichgroße rotatorische Geschwindigkeit des Bauteils und des Regelkörpers sorgt. /DIE2016/ /HEI2014/

Die Drehung eines zylindrischen Körpers ist definiert durch:

$$(5) \quad v_k = \omega_k * r = d_k * \pi * \eta_k \quad \text{mit} \quad k=B, W1, W2$$

- Umfangsgeschwindigkeit (v_k)
- Winkelgeschwindigkeit (ω_k)
- Drehzahl η_k [min^{-1}]
- Bauteil (B)
- Regelkörper (W1)
- Walze 2 (W2)

Es folgt, dass die Umfangsgeschwindigkeit der Regelkörper (Walze 1) und des Bauteils gleich groß ist. Die Geschwindigkeit der Walze 2 ist zu ermitteln.

$$(6) \quad v_B = v_{W1} = v_{W2}$$

$$(7) \quad \eta_B = v_B / d_B * \pi = v_{W1} / d_B * \pi$$

In Abhängigkeit zur Dimensionierung der Walzen ergibt sich ein Durchmesserverhältnis des Regelkörpers zu Walze 2. In der Schleiftechnik ist der Durchmesser des Regelkörpers im Mittel 70% der Durchmessergröße des Schleifkörpers. Dadurch wird die Winkelgeschwindigkeit des Schleifköpers verzögert

Im traditionellen spitzenlosen Schleifverfahren ist die Umfangsgeschwindigkeit des Schleifkörpers (Walze 2) v_{W2} aufgrund eines gewünschten Abtragprozesses größer als die Umfangsgeschwindigkeit des Bauteils v_B . Das bedeutet, dass die Schnittgeschwindigkeit gleich der Umfangsgeschwindigkeit von Walze 2 ist, $v_c = v_{W2}$. Das Verhältnis der Schnittgeschwindigkeit der Walze 2 zur Umfangsgeschwindigkeit des Bauteils ist durch q gegeben, wobei:

$$(8) \quad q = \frac{v_c}{v_B} = \frac{v_{W2}}{v_B}$$

/DIE2016/ /HEI2014/

Da ein Abtragvorgang des Bauteils für diese Arbeit nicht relevant oder gewünscht ist müssen die Umfangsgeschwindigkeiten des Regelkörpers, der Walze 2 und des Bauteils gleich groß sein. Die Momentübertragung, die von den Reibungskoeffizienten abhängt, ist eventuell mit einer Strukturierung der Walzenoberflächen zu sichern, um Rutschgefahr zu vermeiden. Die Regelung der

Bauteildrehzahl erfolgt dann über die synchronisierte Einstellung der Umfangsgeschwindigkeiten der Regelwalze und Walze 2. Darüber hinaus muss der optimale Höhenversatz bei variablen Bauteildurchmessern einstellbar sein.

4.4 Zwischenfazit Hauptantriebe

- I. Spannfutter zur Sicherung des Bauteils haben einen ungünstigen Griff auf der Bauteiloberfläche.
- II. Eine Umspannung bei hohen Drehzahlen ist durch eine zweite drehzahlsynchrone Spindel möglich.
- III. Bei der mehrspurigen Bearbeitung tritt eine temperierte Zone („Back-Tempering“) auf.
- IV. Bei spitzenloser Bearbeitung muss das Walzenmaterial angepasst werden und einen hohen Reibungskoeffizienten und hohe Wärmebeständigkeit aufweisen.
- V. Es ist unbekannt, ob der Kontakt zwischen Bauteil und Walze bei angezündetem Ring-Spot eine Beschädigung der Oberfläche mit sich bringt.
- VI. Es ist unbekannt, inwiefern der Kontakt zwischen Bauteil und Walze zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Temperatur führt.
- VII. Bei abtragenden Vorgängen könnte sich das abgetragene Material ungünstig auf den Walzen lagern.
- VIII. Bei spitzenloser Bearbeitung sollte ein Schneidvorgang nicht direkt auf den Walzen stattfinden, um Schlacke auf den Walzen zu vermeiden.
- IX. Bei auftragenden Vorgängen ist der Kontakt zwischen Auftragsspur und Walze zu vermeiden.
- X. Bei spitzenlosem Laserauftragen entsteht ein kegelförmiges Bauteil mit veränderlichem Vorschub. Die Richtung des Auftrages vergrößert oder verkleinert den Vorschub.

Die spitzenlose Bearbeitung in ihren zwei Zustellvarianten ist eine Möglichkeit eines Antriebes ohne Einspannung des Bauteils. Dadurch wird die komplette Bearbeitung des Bauteils ermöglicht und eine Materialeinsparung erzielt. Eine Nacharbeit ist dadurch nicht notwendig. Das Einstechverfahren mit Festanschlag sichert das Bauteil axial, wodurch der Vorschub unabhängig vom Hauptantrieb zu regeln ist. Die Regelung der Vorschub- und Winkelgeschwindigkeit erfolgt separat, wobei eine höhere Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erzielt werden kann. Die Einstellung des optimalen Höhenversatzes für unterschiedliche Bauteildurchmesser erfordert, dass die Regelwalze leicht verschiebbar ist.

/HEI2014/ /DIE2016/ /ENG2014/ /REI1988/ /HER0000/ /TSC2003/ /NEU2012/

5 Lasersicherheit

Laser technologien haben in den letzten Jahrzehnten in vielen Industriebereichen stark an Bedeutung gewonnen. Aufgrund der Verbreitung der Lasermaterialbearbeitung in Industrieprozessen kommt es zu einer Entwicklung von Sicherheitselementen und Normen, die die Schutzeinrichtungen der Laseranlage (vgl. Abbildung 1) ergänzen. Je nach Laserklasse besteht die Gefahr körperliche Schäden am Menschen zu verursachen. Eine Kombination aus Sicherheitselementen, Normen, regulären Wartungen sowie organisatorischen Maßnahmen sollen für den korrekten Betrieb von Laseranlagen sorgen. Darüber hinaus sind die aktuellsten Anforderungen für eine Laserstrahl anlage von Bedeutung, da die Auslegung dieser nur unter den erforderlichen Schutzmaßnahmen erfolgen soll. Die notwendigen Aspekte zum Arbeitsschutz und zur Lasersicherheit, gegeben durch Normen und Richtlinien, ergänzen die Bedeutung von den benötigten Sicherheitskomponenten. /OR2014//MIC2016/

5.1 Notwendige Aspekte zur Lasersicherheit

Laserschutz beinhaltet die Produktsicherheit sowie die Arbeitsschutzanforderungen einer Lasereinrichtung. Für den sicheren Betrieb müssen beide Hauptelemente erfüllt sein, wobei sie sich stark unterscheiden und separat geregelt sind. Zum einen wird die Produktsicherheit nach Emissionsgrenzwerten gemessen und ist vom Hersteller zu sichern. Zum anderen sind die Laserschutzanforderungen zur Exposition von Strahlungen vom Unternehmen mit den erforderlichen Werkzeugen separat zu schaffen. Hier spielt der Laserschutzbeauftragte (LSB) eine wesentliche Rolle, welche im Kapitel 5.3 näher betrachtet wird. Eine Einordnung der europäischen und deutschen Vorschriften zum Laserschutz ist in Abbildung 21 zu sehen. Diese schafft einen Überblick der für die Produktsicherheit und für den Arbeitsschutz wichtigen Vorschriften. Europäische und nationale Vorschriften zum Laserschutz werden nach Expositions grenzwerten der international anerkannten Internationalen Kommission für nicht-ionisierenden Strahlenschutz (ICNIRP) abgeleitet. Die Produktsicherheit und die Emissionsgrenzwerte folgen der ICNIRP Laserschutznorm IEC 60825-1.

/HOR2014/ /MIC2016/

Eine harmonisierte Norm zur EU-Richtlinie wurde im Februar 2014 veröffentlicht. Die Norm von 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 aktualisiert die harmonisierte Norm 2006/95/EG von Dezember 2006. Aktuell bleiben beide harmonisierte Normen zurückgezogen. /DIN60825-1/

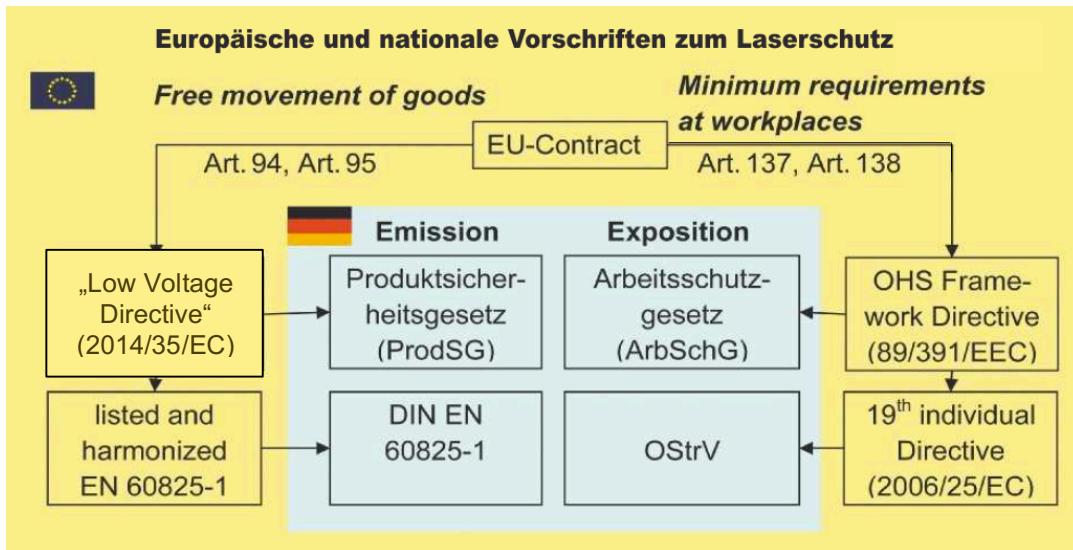


Abbildung 21: Aktualisierte EU (2014/35/EC) und deutsche Vorschriften zum Laserschutz nach Emission und Expositionsgrenzwerten von optischer Strahlung nach /HOR2014/ /DIN60825-1/

5.2 Klassifizierung von Lasereinrichtungen

Optische Strahlung wird nach Gefährdungspotenzial nach DIN 60825-1 klassifiziert. Eine Gefährdungsstufung in den sogenannten Laserklassen erfolgt unter Berücksichtigung der Strahlleistung, Energie und Wellenlänge. Es sind sieben Laserklassen (1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B und 4) zu unterscheiden, wobei empfohlene Schutzmaßnahmen je nach Klasse gegeben sind. Aufgrund der in der LMB benötigten hohen Leistungen werden nur die obersten Laserklassen näher erläutert. Tabelle 5 gibt die Leistung und die Wellenlänge der Laserklassen 3R, 3B und 4 sowie deren Gefährdungspotential an.

Tabelle 5: Laserklassen in der Lasermaterialbearbeitung nach DIN 60825-1 nach /BGV2017/ /BMA2017/

Klasse	Leistung	Wellenlänge	Gefährzungsbereich
3R	1-5 mW	302,5 - 10^6 µm	„Lasereinrichtungen der Klasse 3R sind für das Auge potenziell gefährlich.“
3B	5-500 mW	302,5 - 10^6 µm	„Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge, häufig auch für die Haut.“
4	>500 mW	302,5 - 10^6 µm	„Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Die Laserstrahlung kann Brand- und Explosionsgefahr verursachen.“

Vorliegende Prototypen und noch nicht klassifizierte Lasereinrichtungen sind unter Berücksichtigung der Laserklassen zu behandeln und die erforderlichen Schutzmaßnahmen sind einzuhalten. In Übereinstimmung mit den Unfallverhütungsvorschriften BGV B2/GUV-V B2 bzw. VBG 93 „Laserstrahlung“ sind marktreife Lasereinrichtungen zu klassifizieren.

/BGV2017/ /BMA2017/ /DIN60825-1/

5.3 Der Laserschutzbeauftragte

Der Laserschutzbeauftragte (LSB) oder Laser Safety Officer spielt seit Jahren eine bedeutsame Rolle in der Lasersicherheit und dem Schutz vor künstlicher optischer Strahlung. Bei potentiell gefährlichen Lasereinrichtungen war ein LSB einzusetzen, um Wartungsarbeiten, Betrieb und Arbeitsschutz einer Laseranlage zu übernehmen. In Deutschland war der LSB jemand, der an einer Schulung zum Laserschutz und zu Sicherheitsmaßnahmen teilgenommen hat oder von einer Organisation oder Firma zum LSB ernannt wurde und ähnliche Aufgaben durchführen musste. Nach der Veröffentlichung der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) in 2010 wurden die Aufgaben der LSB nach der Unfallverhütungsvorschrift aktualisiert und ergänzt. Die Bezeichnung des LSB bekommt die Person ausschließlich, wenn sie die erforderlichen Qualifikationen und Fachkenntnisse nachweist und an aktuellen Fortbildungen teilnimmt. Der LSB wird seitdem für die Überwachung der Lasereinrichtung zur Gewährleistung des sicheren Betriebs von Lasern der Klassen 3R, 3B und 4 und die Unterstützung des Arbeitgebers bei der Durchführung einer Gefahrenbeurteilung verantwortlich gemacht.

Es existieren noch Unklarheiten in der Arbeitsschutzverordnung OStrV, die zu Verwirrung und einer falschen Interpretation der aktuellen Aufgaben der LSB in der Praxis geführt haben. Zu betonen ist, dass in den Jahren vor 2010 keine Nachweise über Qualifikationen erforderlich waren. Schulungen und Laserschutzseminare finden ohne die erforderlichen Nachweise weiterhin statt und gefährden dadurch betroffene Personen sowie die Funktion der anerkannten LSB.

/REA2001/ /BRO2015/ BGV2017/

5.4 Technische Schutzmaßnahmen

Unter technischen Schutzmaßnahmen werden nicht die Normen und Richtlinien, sondern die einsetzbaren Schutzeinrichtungen, besonders Sicherheitskabinen, einer Laserstrahlanlage verstanden. Sicherheitskabinen (vgl. Abbildung 1) sind aufgrund der wachsenden Schutzanforderungen sowie der Marktnachfrage ein wesentlicher

Anlagenbestandteil, welches je nach Art eine Überwachungs- bzw. Steuerungsrolle einnehmen kann.

5.4.1 Passivschutzsysteme

Passivschutzsysteme (PSS) bestehen in der Regel aus Metall und Betonwänden, die die Lasereinrichtung umschließen. Der Schutz ist somit direkt von den physikalischen Eigenschaften der Materialien und deren Anordnung abhängig. Die einfachsten Varianten bestehen aus soliden Wänden, während sich Hohlstrukturen aus mehreren Metallfolien zusammensetzen. Diese sind bei Türen und leichteren Strukturen einsetzbar. Die Strahlungsabsorptionsfähigkeit des Materials oder des gesamten Systems gibt den funktionellen Schutz an. Heutzutage existiert keine konkrete Norm, die den Aufbau von PSS und/oder Expositionsgrenzwerte verschiedener Werkstoffe mit genauen Schutzzeiten beschreibt und zusammenfasst. Die Messung des funktionellen Schutzes von PSS erfolgte nach der Dauerbeanspruchung einer bestimmten Laserleistung und einem bestimmten Abstand. Lugauer /LUG2016/ konnte sich in seinem Versuch einer Schutzzeit für den untersuchten Passivschutz nähern. Nach der direkten Strahlung eines 8 kW Nd: YAG Laserstrahles ist die Schutzeinrichtung zum Versagen gekommen, weswegen das übliche Verfahren zum Prüfen von PSS im Detail überprüft werden muss. Um eine erste Datenbank für diese Anwendung zu bekommen, ist eine Untersuchung der Schutzmaterialien durchzuführen. /LUG2014/ /LUG2016/

Laserstrahlen mit kleinen Spotdurchmessern bis 1 kW können Stahl- und Betonwände in kurzer Zeit durchschneiden, wobei Hochleistungsstrahlen über 5 kW auch bei geringer Fokussierung massive Betonwände beschädigen können. Die Klassifizierung von PSS erfolgt über deren Widerstandsfähigkeit im Fehlerfall. Abbildung 22 gibt die unterschiedlichen Prüfklassen (T1, T2 und T3) von Laserschutzwänden und den empfohlenen Verwendungsbereich nach DIN 60825-4 an. Je nach Schutzklasse muss die PSS die entsprechende Zeit bei „Worst-Case Scenario“ Bestrahlung überstehen. Die T1 Klasse müsste dann bei einer maximalen Strahlung von 20 kW über 8 Stunden im Betrieb standhalten. Physikalisch auftretende Effekte sind bei dem Aufbau von Schutzwänden nicht zu unterschätzen. Der Mie-Effekt und die thermisch induzierte Brennpunktverschiebung, welche zur Bildung eines metallischen Rauches und einer erhöhten Absorption des Strahles bzw. zu einer Veränderung der Strahldichte auf der Oberfläche der Schutzwände führt, sind für eine sichere Auslegung zu berücksichtigen. Das Eigengewicht der Schutzwände und des gesamten Systems sind eventuell mit einer notwendigen

Verstärkung der Gebäudestruktur und einem erhöhten Platzbedarf verbunden, wobei ebenfalls Kosten entstehen.

/HEB2009/ /REI2009a/ /REI2009b//LAS2014/ /LAS2017/

Prüfklasse	Inspektionsintervall s	Empfohlene Verwendung der Schutzwand
T1	30 000	Für automatische Produktion
T2	100	Für zyklischen Kurzzeitbetrieb und zwischenzeitlicher Überprüfung
T3	10	Für kontinuierliche Überwachung durch Beobachtung

Abbildung 22: Klassifizierung von Laserschutzwänden nach DIN 60825-4 nach /HEB2009/

5.4.2 Aktivschutzsysteme

Aktivschutzsysteme (ASS) bestehen aus Sensoren und Detektionseinrichtungen, die ausdringende Strahlung erkennen. Die Sensoren nehmen optische und thermische Signale auf, mit denen sie das Überschreiten von zulässigen Grenzwerten erkennen können. Das Überschreiten dieser Grenzwerte führt zu einem sofortigen Ausschalten der Anlage und verhindert somit das Austreten der gefährlichen Strahlung. ASS bieten im Gegensatz zu PSS eine zusätzliche Überwachung und Steuerung des Systems im Fehlerfall, welche die Laserstrahlanlage im Notfall ausschaltet. Nichtsdestotrotz werden PSS zum korrekten Betrieb von ASS benötigt, da diese eine gewisse Fehlererkennungszeit benötigen. Aktivschutzsysteme werden nicht als Hybridsysteme berücksichtigt, da der passive Schutz bei der Sicherheitsbewertung des funktionellen Schutzes nicht berücksichtigt wird.

Die Anforderungen von ASS nach der EC Machinery Directive (Directive 2006/42/EC 2006) sowie der harmonisierten Norm EN ISO 13849-1 (2008) verkomplizieren den Aufbau der ASS und erhöhen dadurch die Kosten eines normgeprüften Systems. Die Unternehmen Lasermet Ltd. und REIS Lasertec bieten womöglich die einzigen ASS auf dem aktuellen Markt.

/LUG2016/ /LUG2014/ /DIN60825-1/

5.4.2.1 „Laser-Jailer“ von Lasermet Ltd.

Der „Laser-Jailer“ bietet eine sichere Umhüllung für Hochleistungslaser mit verschiedenen Wellenlängen und bis zu mehreren kW. Der „Laser-Jailer“ wird mit den patentierten 300 x 300 mm „Active Laser Interlock“ Panels ausgerüstet. Diese

senden, bei Erkennung einer Fehlerstrahlung, ein Signal an den Interlock Controller, der die Anlage ausschaltet. Das System hat die Form einer umhüllenden Kabine und eignet sich für alle Anlagengrößen, da die modularen Panels zusammengeschaltet werden können. Fehlerstrahlungen werden innerhalb von 50 ms erkannt und das System abgeschaltet. Aufgrund des flexiblen und modularen Designs der Panels ist die Größe des Systems skalierbar.

/LAS2014/ /LAS2017/

5.4.2.2 „Laser-Spy-Sensor“ von REIS Lasertec

Der Laser-Spy-Sensor bietet ein austauschbares, aktiv sicherndes Element in doppelwandigen Kabinen. Aufgrund des kleinen modulareren Aufbaus des Sensors kann dieser einfach an kostengünstige doppelwandige Metallkabinen installiert werden. Der lichtempfindliche Sensor misst das Eindringen des Laserstrahles in den lichtdichten Zwischenraum der Kabinenwände und schaltet die Anlage aus bevor die gefährliche Strahlung durch die Wände austreten kann. Dies geschieht innerhalb einer Reaktionszeit von 30 ms. Die Schutzkabinen sind nach der Laserklasse zu realisieren und bieten somit ein ASS für alle Laserleistungen mit Berücksichtigung der Investitionskosten. Der maximale Überwachungsradius eines Sensors beträgt 2,5 m, wobei größere Kabinen mit mehreren Sensoren ausgestattet werden müssen. Abbildung 23 stellt die Integration von einem oder mehreren Laser-Spy-Sensoren in den Not-Aus-Schaltkreis der Laserstrahlanklagesteuerung dar.

/REI2009a/ /REI2009b/

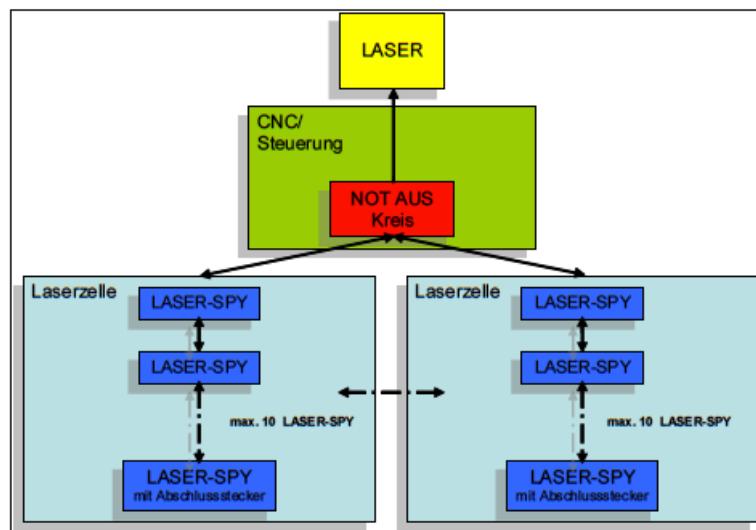


Abbildung 23: Integration eines Laser-Spy-Sensors in den Not-Aus Schaltkreis einer Laserstrahlanklage mit doppelwandigen Schutzkabinen nach /REI2009a/

5.4.3 Hybridschutzsysteme

Hybridschutzsysteme bieten einen erweiterten Schutz für den Umgang mit Hochleistungslasern. Diese berücksichtigen den passiven und aktiven Schutzanteil des Gesamtsystems und optimieren somit die Auslegung beider Schutzanteile (vgl. 5.4.2.2). Die LMB unterliegt einem wachsenden Trend in der modernen Industrie und fordert neue Systeme höherer Sicherheit und Verlässlichkeit. Wie im vorherigen Abschnitt bereits angekündigt, können ASS ohne das Einbringen von passiven Schutzwänden nicht in Betrieb genommen werden. Die passive Schutzwand sichert den Schutz während das ASS reagiert. Dabei entfallen Konstruktions- und Entwicklungskosten der Schutzwände sowie des Sensors.

/REI2009a/ /REI2009b/

Lugauer /LUG2016/ geht bei der Betrachtung der Aktiv- und Passivschutzsysteme ganzheitlich vor und analysiert deren Versagenswahrscheinlichkeit für den optimalen Schutz unter Berücksichtigung der Anlagenkosten. Dabei wurde eine Methodik zur ganzheitlichen Bewertung und Auswahl eines Hybridschutzsystems entwickelt. Die Methodik, welche im Anhang I ausführlich dargestellt ist, schafft ein interessantes Werkzeug für die Bestimmung und Dimensionierung der Sicherheitskomponenten einer Laserbearbeitungsanlage. Mithilfe des Schemas kann der Aufwand von ASS verringert und die entsprechenden Normen und Richtlinien eingehalten werden. Aufgrund der fehlenden Datenbanken zur Strahlungsbeständigkeit und zur Standzeit verschiedener Materialien ist die Methodik derzeit schwer einzusetzen.

/LUG2016/ /LUG2014/

5.5 Zwischenfazit Lasersicherheit

- I. Hochleistungslaser in der LMB entsprechen der Klasse 4 und sind sehr gefährlich für die Augen und die Haut.
- II. Der Laserschutzbeauftragte ist für den sicheren Betrieb von Lasereinrichtungen ab Klasse 3R verantwortlich.
- III. Prototypen sind nach den entsprechenden Normen zu kennzeichnen und als solche zu behandeln.
- IV. Detaillierte Schutzzeiten von passiven Schutzsystemen sind heutzutage eher wenig erforscht und eine Datenbank liegt nicht vor.
- V. Aktive Schutzsysteme sind aufgrund eines hohen erforderlichen funktionellen Schutzes teuer und deren Aufbau kompliziert.
- VI. Hybridschutzsysteme, bestehend aus Passiv und Aktivschutz, senken die Anforderungen eines ASS und dadurch deren Aufwand.

Der Leistungsbereich der in der LMB verwendeten Laser stellt ein hohes Gefährdungspotenzial für den Menschen dar. Daher sind die entsprechenden Normen zur Produktsicherheit und zum Arbeitsschutz streng einzuhalten. Derzeit erhältliche Schutzmühllungen eignen sich im Besonderen für bereits bestehende LMB-Systeme, um die aktuellen Schutzanforderungen für Hochleistungslaser zu gewährleisten. Diese externen Hilfsschutzsysteme umhüllen die Anlage und sind daher mit raumbezogenen Kosten verbunden, wobei sie ebenfalls die Zugänglichkeit zum Arbeitsbereich verschlechtern. Bei der Konzeptualisierung einer modernen Anlage zur Bearbeitung mittels Laserstrahlung muss ein integriertes Schutzsystem mitbedacht werden. Die Umhüllung des Arbeits- und Strahlungsbereichs mit einer passiven Einrichtung ausreichenden Stärke stellt die einfachste Lösung zur Produktsicherheit dar. Nichtsdestotrotz ist eine moderne Anlage so auszurüsten, dass sie kritische Bearbeitungsfälle erkennt und das System notfalls abschalten kann. Die Kosten eines ASS können durch konstruktive Maßnahmen gesenkt werden. Die Optimierung oder das Verkleinern der umhüllenden Kabine führt bei den Laser-Spy-Sensoren zu einer Reduzierung der erforderlichen Sensoren. Der Laser-Spy-Sensor bietet gegenüber den patentierten Panels des „Laser-Jailer“ von Lasermet eine flexiblere Variante. Die Auslegung der Schutzkabine erfolgt in der konstruktiven Phase der Anlage durch eine doppelwandige lichtdichte Kabine auf welche ein Sensor installiert wird. Durch die Einsparung von konstruktiven und raumbezogenen Kosten stellt die Integration des Laser-Spy-Sensors eine geringere Investition dar.

/LUG2016/ /LUG2014/ /REI2009a/ /REI2009b/ /LAS2014/ /LAS2017/ /HEB2009/

6 Bearbeitungs- und Anlagenkonzept

Die 5 Hauptkomponenten der Laserstrahlwanlage (vgl. Abbildung 1) setzen sich aus dem Laser und seinem Zubehör, der Strahlmanipulation vom Resonator in den Arbeitsbereich, der Werkstückhandhabung sowie der Steuerung und der Sicherheitseinrichtung zusammen. Dabei ist die Mehrheit der Anlagenkomponenten ausschließlich von der Bauteilhandhabung und der gewählten Laserquelle abhängig, weswegen diese bewertet werden müssen.

Abbildung 24 gibt eine bildliche Darstellung der möglichen Einflussstellen zur Erzeugung verschiedener Laserspotgeometrien auf der Arbeitsoberfläche und stellt das Grundkonzept zur Bewertung möglicher Kombinationen dar. Eine umfassende Bearbeitungsspur oder Ringspur mit einem zusätzlichen translatorischen indirekt regelbareren Antrieb und eine komplette Bearbeitung des Bauteils werden bevorzugt. /BEY1998/

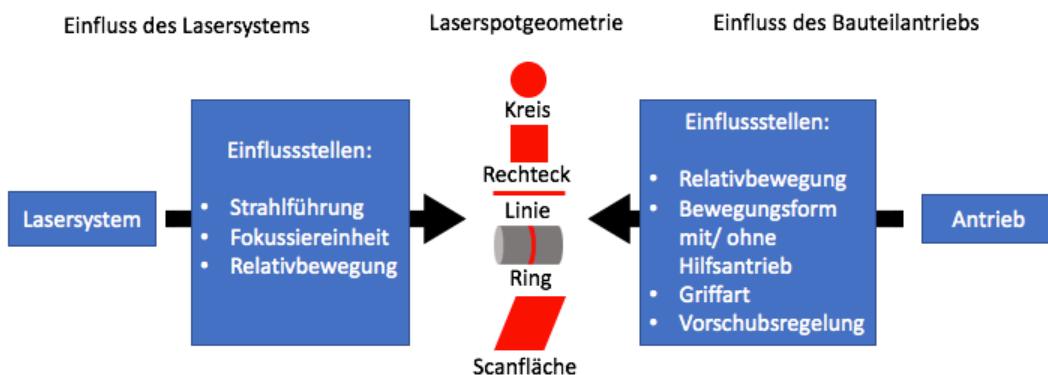


Abbildung 24: Bedeutung des Laser- und Bauteilantriebssystems für die Laserspotgeometrie

6.1 Einfluss des Bauteilantriebs

Zur Bewertung der Einflussstellen des Bauteilantriebs und deren Relativbewegung in der Laserstrahlwanlage sind die prinzipiell erzeugbaren Bahnen auf der Werkstückoberfläche zu untersuchen. Eine ununterbrochene Bearbeitung, der günstigste Antrieb zur Erzeugung einer Mantelfläche oder einer spiralförmigen Fläche, bei gleichzeitigen kompletten und einspurigen Bearbeitung, ist bevorzugt. Diese Kriterien werden überwiegend mit einem Ring-Spot-Verfahren erfüllt.

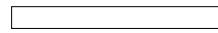
Das Auftreten des „Back-Tempering“ Effekts verursacht eine Enthärtung bei einer mehrspurigen Bauteilbearbeitung. Das Prinzip der Ring-Spot Geometrie sorgt aufgrund der schnellen Rotation und der virtuellen Vergrößerung des Laserspots für eine einspurige ununterbrochene Bearbeitung des Bauteils und verhindert somit die Enthärtung zwischen den Spuren. Das Prinzip lässt sich gut für zylindrische Bauteile

bis 30 mm Durchmesser anwenden, da größere Durchmesser eine exponentiell wachsende Anzündungszeit benötigen. Die Abschreckung von Bauteilen mit kleinen Durchmessern bis 15 mm ist eventuell mit einer externen Kühlung, z.B. durch Wasser, zu unterstützen, da aufgrund der Erwärmung des Grundmaterials eine Selbstabschreckung nicht ausreichend ist. Eine variable Drehzahl im Bereich von 1.000 U/min gehört zu den Voraussetzungen einer Ring-Spot-Bearbeitung. Höhere Drehzahlen haben keine vorteilhafte Änderung der Energiedichteverteilung des Strahles auf der Bauteilloberfläche zur Folge. Das Ring-Spot Verfahren stellt gegenüber torischen Spiegeln und schwankender Optik eine leistungsgünstigere Variante dar, da der Hauptstrahl nicht umgeleitet oder verteilt wird. Daher wird das Ring-Spot-Verfahren als Bearbeitungsstrategie bevorzugt. Tabelle 6 stellt die zu bewertende Hauptantriebe für rotationssymmetrische Bauteile zusammenfassend dar. In Tabelle 7 sind Kriterien zur Bewertung der einzelnen Antriebsmöglichkeiten zu finden. /ORA2014/ /GIO2011/ /GIO2010/

Tabelle 6: Untersuchte Antriebsvarianten und Kurzerklärung des Bewegungsprinzips für rotationssymmetrische Bauteile.

Hauptantrieb	Kurzbeschreibung
Horizontaler Spindel	Prinzip eines axial gespannten Bauteils angetrieben durch eine Dreieinheit in horizontaler Richtung.
Vertikale Spindel	Prinzip eines axial gespannten Bauteils angetrieben durch eine Dreieinheit in vertikaler Richtung.
Doppelspindel mit Umspannung	Prinzip eines axial gespannten Bauteils angetrieben durch eine Dreieinheit in horizontaler/vertikaler Richtung. Die Umspannung erfolgt bei hohen Drehzahlen anhand der Synchronisation beider Spindeln.
Spitzenlose Einstechbearbeitung	Prinzip des spannlosen rotatorischen Antriebes mit einem Festanschlag. Das Bauteil bewegt sich im Arbeitsbereich ohne weitere Hilfseinrichtungen nur rotatorisch.
Spitzenlose Durchlaufbearbeitung	Prinzip des spannlosen kombinierten Antriebes. Das Bauteil bewegt sich im Arbeitsbereich ohne weitere Hilfseinrichtungen je nach Variante rotatorisch und translatorisch.
Zwischen Spitzen	Prinzip des nicht rotierenden Bauteils. Es entstehen zwei Varianten: mit und ohne translatorischen Antrieb zur Bauteilbewegung in axialer Richtung.

Tabelle 7: Bewertungskriterien der Hauptantriebe für rotationssymmetrische Bauteile mit farbige Kodierung der Kriterien.

Bewertungskriterien Hauptantrieb	Beschreibung	Möglichkeiten
Relativbewegung	Kennzeichnet die Bewegung des Bauteils	Fest Beweglich
Bewegungsform ohne Hilfsantrieb	Prinzipielle Bewegungsform des Hauptantriebs ohne externe Einflüsse. Bei der Kombination erfolgt ein relativer Vorschub des Bauteils.	Rotatorisch Translatorisch Kombination
Griffart	Prinzipielle Griffarten des Bauteils. Die Einspannung kann auf der Arbeitsoberfläche (AO), Restfläche (RF) oder frei sein.	Frei AO RF
Vorschubsregelung	Abhängigkeit des Bauteilvorschubs vom Hauptantrieb	Abhängig Unabhängig
Erzeugbare Bahnen ohne Hilfsantrieb	<p>Erzeugbare Bahnlinien/-formen auf der Bauteiloberfläche ohne externen Vorschub</p> <p><u>Punkt</u>: Festes Bauteil, erfordert eine translatorische und rotatorische Bewegung der Lasereinheit.</p> <p><u>Linie</u>: Translatorische Bewegung anhand des Bauteils, erfordert eine rotierende Lasereinheit.</p> <p><u>Ring</u>: Zylindrischer Umfang, erfordert eine translatorische Bewegung der Lasereinheit.</p> <p><u>Spiral</u>: Zylindrischer Umfang mit translatorischer Bewegung anhand des Bauteils, erfordert keine weitere Bewegung der Lasereinheit.</p>	Punkt Linie Ring Spiral
Bearbeitungsart	Kennzeichnet die Möglichkeit einer ununterbrochenen Bearbeitung zur Vermeidung der „Toten Zone“	unterbrochen nicht unterbrochen
Schaltbarer Hilfsantrieb	Durch die Schaltung eines Hilfsantriebs kann ein relativer Vorschub erzeugt werden. Der Hilfsantrieb treibt das Lasersystem an.	Linearantrieb Dreheinheit
Erzeugbare Bahnen mit Hilfsantrieb	<p>Erzeugbare Bahnlinien/-formen auf der Bauteiloberfläche mit geschaltetem Hilfsantrieb</p> <p><u>Linie</u>: einzelne Spur auf einer Oberfläche</p> <p><u>Fläche</u>: begrenzte Bearbeitungsfläche</p> <p><u>Mantelfläche</u>: einspurige komplete Bearbeitung des Bauteils bei schneller Drehung</p> <p><u>Spiralfläche</u>: mehrspurige komplete Bearbeitung des Bauteils bei langsamer Drehung</p>	Linie Fläche Mantelfläche Spiralfläche
Farbkodierung	<p><u>Neutral</u>: Hat keinen Einfluss auf das System</p> <p><u>Grün</u>: Gewünschte Parameter</p> <p><u>Gelb</u>: Kritische Stelle, könnte das System beeinflussen</p> <p><u>Rot</u>: sofortiger Ausschuss</p>	   

Die Bewertung der Hauptantriebe nach deren Bewertungskriterien stellt Tabelle 8 dar. Dabei ist die Betrachtung der erzeugbaren Bahnen ohne und mit einem zusätzlichen geschalteten Hilfsantrieb zu betonen. Durch die Farbkodierung sind die neutralen, gewünschten, kritischen und Ausschussstellen jeder Variante zu erkennen.

Tabelle 8: Bewertungsmatrix der Hauptantriebsvarianten nach den erzeugbaren Bahnen mit einer farbigen Bewertung der einzelnen Kriterien

Hauptantrieb	Hauptspindel			Spitzenlose Bearbeitung		Zwischen Spitzen	
	Horizontale Spindel	Vertikale Spindel	Doppelspindel mit Umspannung	Spitzenlose Einstechbearbeitung	Spitzenlose Durchlaufbearbeitung	mit Linearantrieb	Antriebslos
Relativbewegung	bewegliches Bauteil	bewegliches Bauteil	bewegliches Bauteil	bewegliches Bauteil	bewegliches Bauteil	bewegliches Bauteil	festes Bauteil
Bewegungsform ohne Hilfsantrieb	rotatorisch	rotatorisch	rotatorisch	rotatorisch	Abhängig von Subvariante	translatorisch	n.a.
Griffart	AO	AO	Doppel AO	frei	frei	RF	RF
Bearbeitungart	unterbrochen	unterbrochen	nicht unterbrochen	nicht unterbrochen	nicht unterbrochen	nicht unterbrochen	nicht unterbrochen
Vorschubsregelung	Unabhängig vom Hauptantrieb	Unabhängig vom Hauptantrieb	Unabhängig vom Hauptantrieb	Unabhängig vom Hauptantrieb	Abhängig von Subvariante	Abhängig vom Hauptantrieb	Unabhängig vom Hauptantrieb
Erzeugbare Bahnen ohne Hilfsantrieb	Ring	Ring	Ring	Ring	Spiral /Ring	Linie	Punkt
Schaltbarer Hilfsantrieb	Linearantrieb	Linearantrieb	Linearantrieb	Linearantrieb	Linearantrieb	Dreheinheit	Linearantrieb
Erzeugbare Bahnen mit Hilfsantrieb	Spiral- / Mantelfläche	Spiral- / Mantelfläche	Spiral- / Mantelfläche	Spiral- / Mantelfläche	Spiral- / Mantelfläche	Spiral- / Mantelfläche	Linie

Anhand der ersten Bewertung ergeben sich vier Hauptantriebe, die aufgrund des ungünstigen Griffes und der ungenügenden Bewegung bzw. Erzeugung der erforderlichen Bahnen, ausgeschlossen wurden. Das kritische Kriterium der Doppelspindel mit Umspannung wird aufgrund der Komplexität des Umspannungsvorgangs, welcher die Synchronisierung beider Spindeln und die gleichzeitige Umspannung bei hohen Drehzahlen ohne Beschädigung des Bauteils fordert, ebenso als Ausschuss betrachtet. Wie aus Tabelle 8 zu entnehmen ist, ist die spitzenlosen Bearbeitung das einzige mögliche Verfahren, welches in Bezug auf das Laseranlagenkonzept einen Durchlauf von rotationssymmetrischen Bauteilen ermöglicht. Dabei muss zwischen zwei Hauptvarianten der spitzenlosen Bearbeitung unterschieden werden, deren kritischen Stellen und Subvarianten in Tabelle 9 genauer betrachtet werden.

Tabelle 9: Bewertungsmatrix der spitzenlosen Einstech- und Durchlaufbearbeitungsantriebe nach den erzeugbaren Bahnen mit einer farbigen Bewertung der einzelnen Kriterien.

Hauptantrieb	Spitzenlose Bearbeitung			
	Spitzenlose Einstechbearbeitung		Spitzenlose Durchlaufbearbeitung	
Variante	Seitenlader	Hinterlader	MIT Längsvorschub in der Bearbeitung	OHNE Längsvorschub in der Bearbeitung
Relativbewegung	bewegliches Bauteil	bewegliches Bauteil	bewegliches Bauteil	bewegliches Bauteil
Bewegungsform ohne Hilfsantrieb	rotatorisch	rotatorisch	Kombination	rotatorisch
Griffart	frei	frei	frei	frei
Bearbeitungsart	nicht unterbrochen	nicht unterbrochen	nicht unterbrochen	nicht unterbrochen
Vorschubsregelung	Unabhängig vom Hauptantrieb	Unabhängig vom Hauptantrieb	Abhängig vom Hauptantrieb	Unabhängig vom Hauptantrieb
Erzeugbare Bahnen ohne Hilfsantrieb	Ring	Ring	Ring	Ring
Schaltbarer Hilfsantrieb	Linearantrieb	Linearantrieb	Linearantrieb	Linearantrieb
Erzeugbare Bahnen mit Hilfsantrieb	Spiral- / Mantelfläche	Spiral- / Mantelfläche	Spiral- / Mantelfläche	Spiral- / Mantelfläche

Aus dieser genaueren Bewertung der spitzenlosen Bearbeitungsvarianten folgt, dass die Kombination einer Durchlaufbearbeitung mit Längsvorschub ungeeignet ist. Durch das Zusammenspiel von rotatorischen und translatorischen Bewegungsformen ist die Vorschubregelung vom Hauptantrieb abhängig. Das heißt, dass das Bauteil in translatorischer Richtung abhängig von der Drehzahl der Walzen angetrieben wird, wodurch die Genauigkeit der Steuerung negativ beeinflusst wird. Aufgrund dessen wird die spitzenlose Durchlaufbearbeitung mit Längsvorschub in der Bearbeitung nicht weiter betrachtet.

Somit sind drei Antriebsvarianten aufgrund der Kombination bewegtes Bauteil - bewegtes Lasersystem für die Bearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen geeignet, welche sich dennoch im Aufbau und Ablauf der Bearbeitung unterscheiden. Eine detaillierte Betrachtung der Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten ist Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Vor- und Nachteile der nach den Bewertungskriterien geeigneten Varianten der spitzenlosen Bearbeitung nach /WEC2005/ /HEI2014/ /CON2006/

Variante	spitzenlose Einstechbearbeitung mit Seitenlader	spitzenlose Einstechbearbeitung mit Hinterlader	spitzenlose Durchlaufbearbeitung ohne Längsvorschub in der Bearbeitung
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Translatorische Bewegung des Bauteils mit Festanschlag gesichert • Schwerkraft bei vertikalen Bewegungen ausnutzbar. • Verkürzter Aufbau • Platzsparend, da vertikal geordnetes Ein- und Entladen der Bauteile 	<ul style="list-style-type: none"> • Translatorische Bewegung des Bauteils mit Festanschlag gesichert • Platzsparend, da Ein- und Entladen an einer Seite 	<ul style="list-style-type: none"> • Translatorische Bewegung des Bauteils mit Festanschlag in der Bearbeitung gesichert • Automatisches nacheinander Ein- und Entladen in dieselbe Richtung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikaler Aufbau • Ladevorgang des Lademagazins von oben und daher ergonomisch schlecht • Ein- und Entladen an einer Seite der Maschine • Kein Durchlauf der Bauteile • Verschiebung des Laserkopfes für Ein- und Entladevorgänge 	<ul style="list-style-type: none"> • Verlängerung der Maschine aufgrund der Bauteilführung • Ein- und Entladen an einer Seite der Maschine • Kein Durchlauf der Bauteile 	<ul style="list-style-type: none"> • Verlängerung der Bauteilführung, da Ein- und Entladen an zwei Seiten der Anlage erfolgt • Horizontaler Aufbau

Alle drei Varianten sind mit Vor- und Nachteilen für den Aufbau der Anlage verbunden. Dabei ist die spitzenlose Durchlaufbearbeitung ohne Längsvorschub in der Bearbeitung die einzige, die einen Durchlauf der Bauteile ermöglicht. Daher stellt diese die bestmögliche Variante für die Auslegung des Bauteilantriebssystems dar. Durch die vorhandenen Hilfsmittel, in Form einer linearangetriebenen Schubstange, ist das simultane Ein- und Entladen der Bauteile in der gleichen Richtung möglich. Dadurch verkürzt sich im Vergleich zu den Einstechbearbeitungsvarianten die Rüstzeit. Da die Bearbeitung ohne Längsvorschub erfolgt, ist diese als eine diskontinuierliche Bearbeitung zu bezeichnen. Eine geringe Neigung von etwa 0.5°, wie bei der Einstechbearbeitung (vgl. Kapitel 4.4.2), sorgt für eine geringe Kraft gegen den beweglichen Festanschlag. Nach Ende der Bearbeitung bewegt sich dieser seitlich aus der Bauteilbewegungssachse, um den Durchlauf des Bauteils zu ermöglichen. Ein geschalteter Linearantrieb wird für die Lasereinheit vorausgesetzt.

6.2 Einfluss des Lasersystems

Durch die Anforderungen an ein multiprozessfähiges Lasersystem, welches laserhärtende, -abtragende und -auftragende Prozesse beinhaltet, eignen sich nicht alle verfügbaren Laserquellen. Daher ist die Auswahl dieser zu begrenzen. Gaslasersysteme, wie das CO₂- System, benötigen eine komplexe Strahlführung mit Spiegeloptiken und eine zusätzliche Gasversorgung für die Strahlformung. Sie stellen für die Bearbeitung von Baustählen keinen erheblichen Vorteil gegenüber Festkörper- und Diodenlasern, welche durch flexiblere Faseroptiken in den Arbeitsbereich geführt werden, dar. Aufgrund der hohen Komplexität und der damit verbundenen Kosten ist das CO₂-Lasersystem auszuschließen.

Der konventionelle Festkörperlaser, der Nd: YAG, ist gegenüber den Faser- und Diodenlasern ineffizient und mit hohen Wartungskosten und einer kürzeren Lebensdauer verbunden. Der Nd: YAG benötigt aufgrund der niedrigen Effizienz eine leistungsfähigere Kühlung, welche mit höheren Energiekosten und Raumbedarf einhergeht. Des Weiteren ist die Vergrößerung der Laserspotfläche für den Gaußstrahl ungünstig, da es aufgrund einer radial abnehmenden Leistung zu einer ungleichmäßigen Energieverteilung kommt. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit, z.B. beim Laserhärten, welche direkt vom Laserspotdurchmesser abhängt, wird dadurch negativ beeinflusst, weswegen das System für härtende Verfahren nicht geeignet ist. Daher wird es für das in dieser Arbeit zu erstellende Laserstrahlanlagenkonzept ausgeschlossen.

Die Wahl des Laserabdampfens als Reinigungsstrategie sichert eine hochqualitative technische Sauberkeit der Bauteile für eine störfreie Bearbeitung. Die Reinigungsstrategie fordert einen Laser im gepulsten Betrieb, wobei das Laserhärten, Laserabtragen und Laserauftragen einen Laser im Dauerstrich-Betrieb benötigen. Dioden- und Faserlaser können in beiden Betriebsarten verwendet werden. Die Top-Hat Verteilung eines HDL beseitigt die Defizite eines Gaußstrahles aufgrund des in einer Richtung rechteckigen Strahlprofils und eignet sich besonders für Härteverfahren, wobei seine schlechte Strahlqualität eine schwierige Fokussierung, ohne Polarisiertheit, nach sich zieht. Für abtragende und schneidende Verfahren ist eine präzise Fokussierbarkeit jedoch von Bedeutung. Daher ist der HDL ungeeignet und wird ebenfalls ausgeschlossen.

Zuletzt ist das Faserlasersystem als Möglichkeit zu betrachten. Durch sein gleichmäßiges radiales Strahlprofil wird sowohl eine große homogene Leistungsverteilung als auch eine sehr kleine und präzise Fokussierung des

Laserspots erzeugt. Der Faserlaser im Single-Mode deckt die erforderliche Leistung von 1-2 kW für die Lasermaterialbearbeitung und die Reinigung von rotationssymmetrischen Bauteilen bis 30 mm Durchmesser ab. Aufgrund dessen eignet sich der Faserlaser für härtende, auftragende und abtragende Laserverfahren. Ein wartungsfreier Betrieb, eine kompakte Bauform, gute Effizienz, geringer Kühlungsbedarf, ausgezeichnete Strahlqualität, flexible Strahlführung mit Faseroptiken, geringe Anschaffungskosten und die längste Lebensdauer gegenüber der hier dargestellten Laserquellen stellen die überwiegenden Vorteile des Faserlasers dar und führen zu der Bewertung des Faserlasers als geeignetes Strahlformungssystem.

/CLE2017/ /CLE0000/ /JAC2016/ /MEN2013/ /LIM2007/ /LI2000/ /KEN2004/ /REA2001/ /EIC2006/ /IND2017/ /IPG20017/ /TRU2017/ /COS2017/

Eine Zusammenfassung der ausgewählten Laserquellen bietet Abbildung 25.

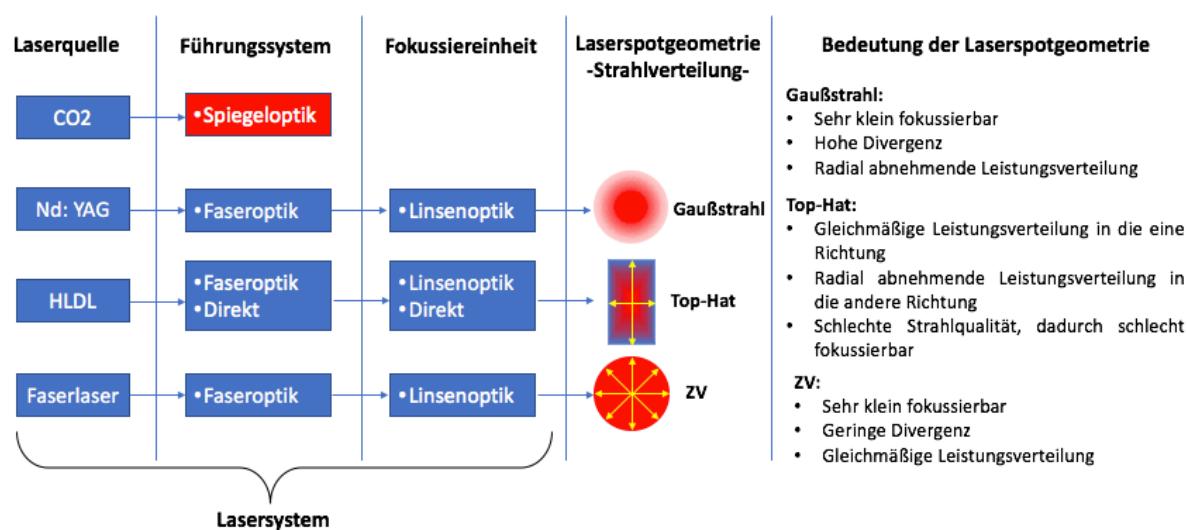


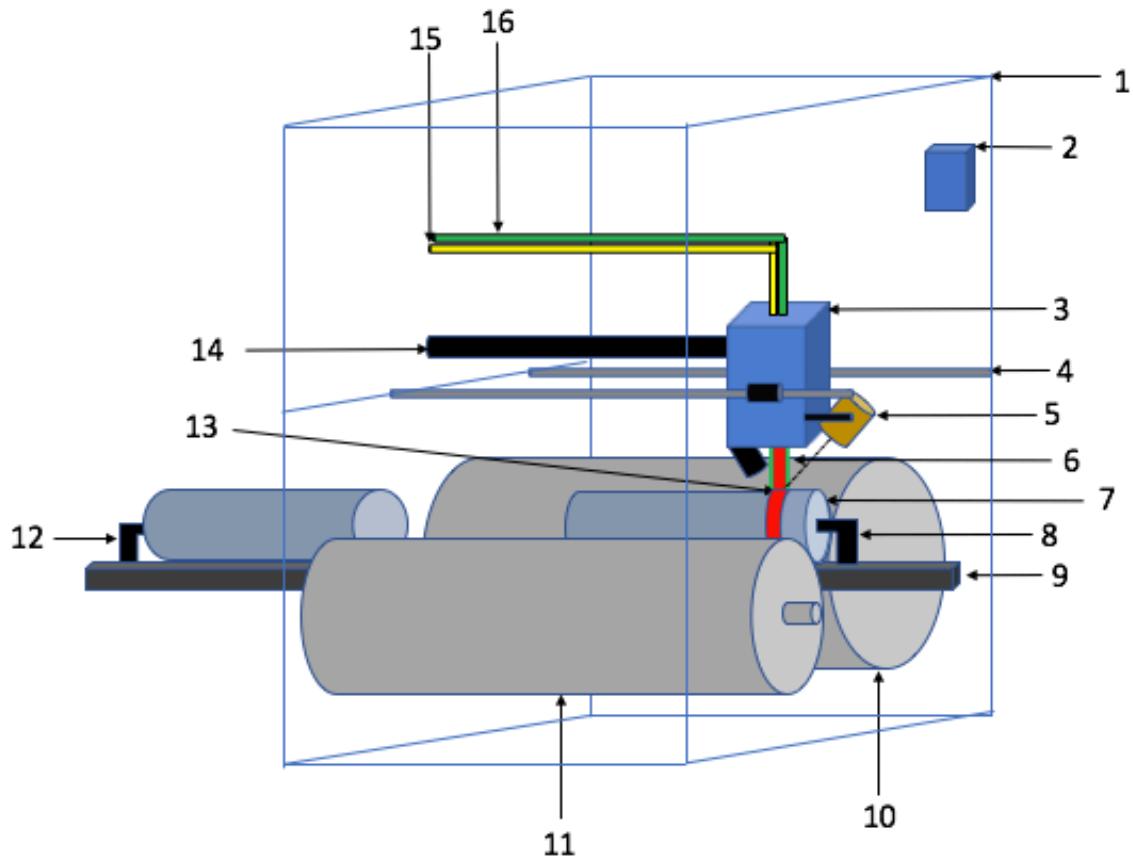
Abbildung 25: Einfluss des Lasersystems auf die Laserspotgeometrie und Strahlverteilung verschiedener Laserquellen nach /LIM2007/ /LI2000/ /KEN2004/ /REA2001/ /EIC2006/ /COS2017/

Neben der bereits betrachteten Bauteilhandhabung und der Laserquellen ist ebenfalls der Laserschutz von allgemeiner Bedeutung für die Erstellung eines Laseranlagenkonzepts. Anhand des Arbeitsschutzes und der Produktsicherheit der Laseranlage ist für die entsprechende Laserquelle, Leistungsbereich und Wellenlänge ein Laserschutz entsprechend der Laserklasse 4 zu gewährleisten. In der Prototypphase ist diese bereits als eine gefährliche Laserquelle für den menschlichen Körper zu betrachten und mit den entsprechenden Kennzeichnungen zu versehen. Einen sowohl passiven als auch aktiven Schutz bietet die Kombination eines Laser-Spy-Sensors und einer doppelwandigen Kabine. Daraus ergibt sich der

bestmögliche Laserschutz mit automatisierter Ausschaltungsfunktion im Fehlerfall, welcher einen unkomplizierten und kostengünstigen Aufbau mit sich bringt.

6.3 Darstellung des Bearbeitungs- und Anlagenkonzepts

Abbildung 26 stellt die prinzipielle Konstruktion einer möglichen Laserstrahlwanlage für die Bearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren



dar.

Abbildung 26: Anlagenkonzept für die Lasermaterialbearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren.

Komponenten des Laserstrahlwanlagenkonzepts:

1. Doppelwandige Sicherheitskabine (vgl. Kapitel 5.4)
2. Laser-Spy-Sensor (vgl. Kapitel 5.4.2.2)
3. Laserkopf, mit interner Fokussiereinheit
4. Spindeltrieb, translatorischer Antrieb der Lasereinheit (vgl. Kapitel 4.2)
5. Pyrometer (vgl. Kapitel 2.2.4)
6. Laserstrahl (rot) mit Schutzgasmantel (Grün) (vgl. Kapitel 2.4)
7. Bauteil (in Bearbeitung)
8. Beweglicher Festanschlag (vgl. Kapitel 4.3)

9. Werkstückträger (vgl. Kapitel 4.3)
10. Walze 2 (vgl. Kapitel 4.3)
11. Regelkörper (Walze 1), besitzt eine geringe Neigung (vgl. Kapitel 4.3)
12. Nachschubeinheit (vgl. Kapitel 4.2)
13. Ring-Spot-Geometrie (vgl. Kapitel 2.3.2)
14. Absaugerohr (vgl. Kapitel 3.3)
15. Faseroptik (vgl. Kapitel 2.4.3.2)
16. Schutzgaszufuhr (vgl. Kapitel 2.4.4)

Bearbeitungsstrategie: Ring-Spot-Geometrie Prinzip

Reinigungsstrategie: Laserabdampfen

Werkstückhandhabung: spitzenlose Durchlaufbearbeitung ohne Vorschub in der Bearbeitung (diskontinuierlich)

Laserquelle: Faserlaser mit 1-2 kW Leistung

Strahlführung: Faseroptik (monomode)

Kühlsystem: Kühlungsbedarf zwischen 0,7-1,4 kW

7 Fazit und Ausblick

Fazit

Die Absicht dieser Arbeit war die Erstellung eines Bearbeitungs- und Anlagenkonzepts für die selektive Lasermaterialbearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen im Durchlaufverfahren. Ziel war es daher geeignete Bewertungskriterien der Hauptkomponenten der Laserstrahlwanlage unter Berücksichtigung von Kosten, Qualität und Produktivität aufzustellen.

Um ein mögliches Anlagenkonzept erstellen zu können, war zunächst eine umfangreiche Auseinandersetzung mit dem Stand der Technik notwendig. Dabei erfolgte, ausgehend vom grundlegenden Verständnis der Lasermaterialbearbeitung, eine Betrachtung der möglichen Fehlerstellen und Bearbeitungsstrategien für rotationssymmetrische Werkstücke. Des Weiteren war die Betrachtung der Haupteinflussstellen, des Laser- und Bauteilhandhabungssystems und der damit verbundenen technischen Sauberkeit im Hinblick auf das zu erstellende Anlagenkonzept, unentbehrlich. Neben den rein technologischen galt es ebenfalls rechtliche Aspekte in die Arbeit zu integrieren, welche überwiegend die Lasersicherheit und den Arbeitsschutz betreffen.

Mit dem Stand der Technik als Grundlage konnte dann die Auswahl der Hauptbearbeitungsstrategie erfolgen. Das Prinzip des Ring-Spot-Geometrie Verfahrens ist die sinnvollste Möglichkeit den „Back-Tempering“ Effekt zu verhindern, wodurch eine Erhöhung der Qualität beim Laserhärteln stattfindet. Neben dem Laserhärteln eignet sich das Verfahren ebenso für auftragende und abtragende Prozesse. Derzeit beziehen sich die experimentellen Untersuchungen zur Ring-Spot-Geometrie ausschließlich auf die Bearbeitung der Bauteile mithilfe einer Drehbank, welche mit einem ungünstigen Griff der Oberfläche des Bauteils verbunden ist. Um eine Erhöhung der Produktivität und der Materialeinsparung, durch Vermeidung von Nacharbeit, zu erzielen, folgte die Auseinandersetzung mit möglichen Bauteilantrieben. Ziel dabei war es, aufgrund zuvor aufgestellter Bewertungskriterien, eine ununterbrochene und komplette Bearbeitung des zylindrischen Bauteils herauszustellen. Die spitzenlose Durchlaufbearbeitung ohne Längsvorschub in der Bearbeitung ergab sich als der passende Bauteilantrieb, da dieser keine Einspannung des Bauteils mit sich bringt.

Darüber hinaus hängt mit der mehrstufigen Bearbeitungsanlage eine multiprozessfähige Laserquelle zusammen. Diese wurden ebenfalls im Hinblick auf Qualität, Produktivität und Kosten untersucht. Der Faserlaser hat sich aufgrund

seiner hohen Strahlqualität, Strahlprofil und wechselnde Betriebsarten, kontinuierlich und gepulst, als geeignete Laserquelle für Baustähle herausgestellt. Im Gegensatz zu den anderen dargestellten Laserquellen lässt sich der Laserspot, aufgrund seiner gleichmäßigen Leistungsverteilung, für härtende, abtragende und auftragende Prozessen anpassen. Damit ist eine Reinigungsstrategie durch Laserabdampfen ebenso ermöglicht. Zusätzlich führt die Kompaktheit, hohe Effizienz, und Kopplung mit Faseroptiken zu einem unkomplizierten, kostengünstigen Aufbau des Lasersystems.

Da es sich um die Entwicklung eines neuen Konzepts handelt, kann ein integriertes Sicherheitssystem, welches den neuesten Anforderungen der Laserklasse 4 entspricht, bedacht werden. Dieses hat den Vorteil, gegenüber einer nachträglich zugefügten umhüllenden Kabine, dass es kompakter ist und direkt auf die Steuerung der Anlage zugreifen kann und somit einen erhöhten Schutz im Fehlerfall bietet. Der Einsatz einer doppelwandigen Kabine mit einem Schutzsensor stellt zudem die wirtschaftlichere und sicherste Variante dar.

Bei der Erstellung dieses beschriebenen Konzeptes traten Probleme und Schwierigkeiten in einigen Bereichen auf. Dazu gehört die allgemeine Dimensionierung der Laserstrahlanlage, welche mit einer Vielzahl von voneinander abhängigen Komponenten verbunden ist. Diese Komplexität der Zusammenhänge erschwerte die isolierte Betrachtung und somit auch die isolierte Bewertung der einzelnen Aspekte, die für ein komplettes oder umfangreiches Anlagenkonzept notwendig sind. Um ein umfassendes Bearbeitungs- und Anlagenkonzepts erstellen zu können, ist zudem eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Laserstrahlanlagenkomponenten (vgl. Abbildung 1) notwendig, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.

Ausblick

Diese Arbeit orientiert sich an bereits vorhandenen Kenntnisse zur Lasermaterialbearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen. Dabei ergaben sich einige eher wenig ausführlich betrachtete Aspekte im Bereich der Laserspotgeometrie und des Einflusses eben dieser auf die verschiedenen Prozesse. Das erstellte Anlagenkonzept kann, durch eine genauere Betrachtung des Bauteil- und Walzenmaterials zur Bestimmung des Einflusses der Kontaktflächen auf den Wärmeffuss des Bauteils, optimiert werden. Allgemein ist zu betonen, dass das entwickelte Konzept die anfallenden Kosten möglichst gering hält. Komplexe und

somit auch kostenintensivere Hilfsmittel, welche sich eventuell vorteilhaft auf die Bauteilhandhabung auswirken könnten, wurden nicht betrachtet.

Abschließend ist hervorzuheben, dass sich Lasertechnologien in einer konstanten Entwicklung befinden und sich deren industriellen Einsatzmöglichkeiten in multiprozessfähigen Anlagen zunehmend vergrößern.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- /BAL2014/ BALLIU Machine Tool Corporation: URL: http://www.balliu.be/de/products/ablation/laser_ablation/, Stand 2014. Letzter Zugriff 20.08.2017.
- /BAU0000/ Bauteilreinigung, das Portal: http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_found_article/extern_article_id/101/q/din%208592, Stand o.J., Letzter Zugriff 20.08.2017.
- /BEY1998/ Beyer, E.; Wissenbach, K.: *Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung, Laser in Technik und Forschung*. Dresden: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998. ISBN 3-540-63224-7.
- /BLI2013/ Bliedtner, J.; Müller, H.; Barz, A.: *Lasermaterialbearbeitung. Grundlagen-Verfahren-Anwendungen-Beispiele*. Carl-Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013, ISBN (E-Book) 978-3-446-42929-1.
- /BRE2009/ Breitling, D. (2009): *Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung*. In: Graf, T. (Hrsg.) *Laser in der Materialbearbeitung* Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: Herbert Utz Verlag GmbH, 2010.
- /BRO2015/ Brose, M.; Reidenbach, H.-D.: *Der Laserschutzbeauftragte (LSB)-gestern, heute und morgen*. In: StrahlenschutzPRAXIS, 2015, Heft 4, S.58–67.
- /CAR2010/ Caron-Guillemette, G.: *A Review of the Use of Lasers in Transformation Hardening*. Université du Québec à Rimouski, Département de mathématiques, informatique et génie, 2010.
- /CLE0000/ Clean Lasersystem GmbH.: *Oberflächen Reinigen und Vorbehandeln*. Broschüre, o.J., URL: http://cleanlaser.de/wDeutsch/kontakt/downloads/documents/prospekte/Klebe_und_Lackiervorbehandlung.pdf
- /CLE2017/ Clean Lasersystem GmbH.: *Klebe und Lackiervorbehandlung*. Broschüre, 2017, URL: http://cleanlaser.de/wDeutsch/kontakt/downloads/documents/prospekte/Klebe_und_Lackiervorbehandlung.pdf
- /CON2006/ Conrad, K. J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Werkzeugmaschinen*, 2. Auflage. Hannover: Carl Hanser Verlag München Wien, 2006, ISBN-10: 3-446-40641-7.
- /COS2017/ Costa Rodrigues, G.; Duflou, J.: *Opportunities in laser cutting with direct diode laser configurations*. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2017.
- /DAV2012/ Davim, J. P. (Hrsg.): *Lasers in Manufacturing*. London, UK: ISTE Ltd; Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc, 2012, ISBN 978-1-84821-3692
- /DIE2016/ Dietrich, J: *Praxis der Zerspanntechnik, Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*. 12. überarbeitete Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016, E-Book-ISBN 978-3-658-14053-3

- /DOW2009/ Dowden, J. (Hrsg.): *The Theory of Laser Materials Processing, Heat and Mass Transfer in Modern Technology*. Springer Series in Materials Science 119. Colchester: Springer; Canopus Academic Publishing Limited, 2009.
- /EIC2006/ Eichler, J.; Eichler, H.J.: *Laser, Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 6., aktualisierte Auflage. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, ISBN-10: 3-540-30149-6.
- /ENG2014/ Engler, A.: *Entwicklung eines Versuchskonzeptes zum lokalen laserunterstützten Glattwalzen*. Dresden, TU Dresden, Institut für Oberflächentechnik, Diplomarbeit, 2014.
- /FÖH2011/ Föhl, C. (2011): *Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen*. In: Graf, T. (Hrsg.) *Laser in der Materialbearbeitung* Forschungsberichte des IFSW, Stuttgart: Herbert Utz Verlag GmbH, 2011.
- /FRA2017a/ Fraunhofer IFAM: https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Institutsprofil/Standorte/Bremen/Klebtechnik_Oberflaechen/Plasmatechnik_und_Oberflaechen/Vorbehandlung-Reinigung-Aktivierung/Lasertechnik.html, Stand 2017, Letzter Zugriff 20.08.2017.
- /FRA2017b/ Fraunhofer IFAM: https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Institutsprofil/Standorte/Bremen/Klebtechnik_Oberflaechen/Plasmatechnik_und_Oberflaechen/Vorbehandlung-Reinigung-Aktivierung.html, Stand 2017, Letzter Zugriff 20.08.2017.
- /GIO2010/ Giorleo, L.; Liu, A.; & Previtali, B.: *Apparent spot in circular laser hardening: Effect of process parameters*. In: International Journal of Material Forming, 2010, Vol.3 Suppl. 1: S.1119–1122.
- /GIO2011/ Giorleo, L.; Previtali, B.; Semeraro, Q.: *Modelling of back tempering in laser hardening*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, Vol. 54: S.969–977.
- /HAA1996/ Haase, B.: *Bauteilreinigung. Alternativen zum Einsatz von Halogenkohlenwasserstoffen. Reinigungsmittel, Reinigungsmechanismen und Reinigungsanlagen*. 1. Auflage. Malsheim: Expert-Verlag, 1996.
- /HEB2009/ Heberer E. M.: *Prüfen von Schutzwänden mit festgelegter Schutzwirkung* (Veranst.): Vortrag auf: Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung, 2009, Hennef: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (BGIA/BGETE).
- /HEI2014/ Heisel, U.; Klocke, F.; Uhlmann, E.; Spur, G. (Hrsgg.): *Handbuch Spanen und Abtragen, Edition Handbuch der Fertigungstechnik*. München. Carl Hanser Verlag. 2014, E-Book-ISBN 978-3-446-43-699-2.

- /HER0000/ Hermle Schleiftechnik KG.: http://www.hermle-schleiftechnik.de/pages/de_unsere_schleiftechniken.php, Stand o.J. Letzter Zugriff 20.08.2017
- /HES2006/ Hesse, S.: *Grundlagen der Handhabungstechnik*. Carl Hanser Verlag München Wien. 2006, ISBN-10: 3-446-40473-2.
- /HOR2014/ Horak, W.: *Lasersicherheit im Spannungsfeld zwischen Produktsicherheit und Arbeitsschutz*, In: StrahlenschutzPRAXIS, 2014. Heft 3, S.49–53.
- /HÜG1992/ Hügel, H.: *Strahlwerkzeug Laser, Eine Einführung*. Stuttgart: Springer Fachmedien Wiesbaden, 1992, ISBN (E-book) 978-3-663-11535-9.
- /IND2017/ INDUX The Industry Platform: <https://wiki.induux.de/Faserlaser>, Stand 5.07.2017, Letzter Zugriff 07.07.2017.
- /IPG2017/ IPG Photonics Corporation: <http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers>, Stand 2017, Letzter Zugriff 07.07.2017.
- /JAC2016/ Jackson, D.: *Carbon Dioxide Spray Cleaning for Modern Manufacturing*. In: Ci Ceramic Industry, 2016, November, S.10–13.
- /KEN2004/ Kennedy, E.; Byrne, G.; Collins, D. N.: *A review of the use of high power diode lasers in surface hardening*. In: Journal of Materials Processing Technology, 2004, Vol. 155–156 (1–3), S. 1855–1860.
- /KOU1983/ Kou, S.; Sun, D. K.: *Heat flow during the laser transformation hardening of cylindrical bodies*. In: Metallurgical Transactions A, 1983, Vol. 14A, S.1859–1867.
- /LAS2014/ Lasermet Ltd.: Laser Castle- Laser Safety Cabins. Broschüre, 2014, URL: <http://www.laseroptronic.it/doc/LaserCastle-UK-Brochure.pdf>
- /LAS2017/ Lasermet Ltd.: <http://www.lasermet.com/active-laser-guard.php>, Stand 2017, Letzter Zugriff 20.08.2017
- /LI2000/ Li, L.: *The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing*. In: Optics and Lasers in Engineering, 2000, Vol. 34, S. 231-253.
- /LIM2007/ de Lima, M. S. F.; Goia, F. A.; Riva, R.; do Espírito Santo, A. M.: *Laser surface remelting and hardening of an automotive shaft sing a high-power fiber laser*. In: Materials Research, 2007, Vol. 10 (4), S.461–467.
- /LIU2010/ Liu, A.: *Study of the Back Tempering Phenomenon in Laser Hardening of Large Surfaces*. Mailand, Politecnico di Milano, Dissertation, 2010.
- /LUG2014/ Lugauer, F. P.; Braunreuther, S.; Wiedemann, R.; Zaeh, M. F.; *Laser Intensity as a Basis for the Design of Passive Laser Safety Barriers – A Dangerous Approach*. In: Physics Procedia, 2014, Vol. 56, S.1384–91.
- /LUG2016/ Lugauer, F. P.; Stiehl, T. H.; Zaeh, M. F.: *Functional Safety of Hybrid Laser Safety Systems – How can a Combination between Passive and Active Components Prevent Accidents?*. In: Physics Procedia, 2016, Vol. 83, S.1196–1205.

- /MAR2017/ Martínez, S.; Lamikiz, A.; Ukar, E.; Calleja, A.; Arrizubieta, J. A.; Lopez de Lacalle, L. N.: *Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process*. In: Optics and Lasers in Engineering, 2017, Vol. 90, S.72–80.
- /MAT2011/ Matic, M: *Laserstrahlschweißen hochfester Werkstoffe an rotationssymmetrischen Bauteilen*. Dresden, Technische Universität, Dissertation, 2011.
- /MEN2013/ Menz Industriedienstleistungs-GmbH.: http://www.menz-sauber.de/leistungen/teillereinigung/?gclid=CjwKCAjw_dTMBRBHEiwAplzn_KEYNtrpiEhl3AvYfcwlW0DmDWwOGpRlh4xfbQ6xYaPA88Fcx2VaexoCAI8QAvD_BwE, Stand 2013-2017. Letzter Zugriff 20.08.2017.
- /MIC2016/ Michel, R.: *Strahlenschutz- Vergangenheit und Zukunft*. In: StrahlenschutzPRAXIS, 2016, Heft 3, S.13–45.
- /MUL2017/ Multicom Inc.: <http://www.multicominc.com/training/technical-resources/single-mode-vs-multi-mode-fiber-optic-cable/>, Stand 2017. Letzter Zugriff 08.07.2017.
- /NEU2012/ Neugebauer. R. (Hrsg.): *Werkzeugmaschinen, Aufbau, Funktion und Anwendungen von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. Chemnitz: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2012, ISBN 978-3-642-300776.
- /ORA2014/ Orazi, L.; Liverani, E.; Ascari, A.; Fortunato, A.; Tomesani, L.: *Laser surface hardening of large cylindrical components utilizing ring spot geometry*. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2014, Vol. 63, S.233–236.
- /PAN2002/ Pantelis, D. I.; Bouyiouri, E.; Kouloumbi, N.; Vassiliou, P.; Koutsomichalis, A.: *Wear and corrosion resistance of laser surface hardened structural steel*. Surface and Coatings Technology, 2002, Vol. 298, S.125–134.
- /PAR1973/ Parmentier, E.M.; Greenbeg, R. A.: *Supersonic-Flow Aerodynamic Windows for High-Power Lasers*. In: Aiaa Journal, 1973, Vol. 11(7), S. 943–949.
- /PAT2007/ Patwa, R.; Shin, Y. C.: *Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels*. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, Vol. 47 (2), S. 307–320.
- /PER1999/ Perovic, B: *Werkzeugmaschinen und Vorrichtungen, Berechnung und Konstruktion*. Berlin: Carl Hanser Verlag München Wien, 1999. ISBN 3-446-21031-8.
- /REA2001/ Ready, J.F.; Farson, D.F.; Feeley, T. (Hrsgg.): *LIA Handbook of Laser Materials Processing, 1. Edition*. Orlando: Laser Institute of America Magnolia Publishing Inc., 2001, ISBN 0-912035-15-3.

- /REI1988/ Reinhold, R; Clausnitzer, M: *Schleifen, Grundlagen und Intensivierung*. 1. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1988, ISBN 3-341-00262-6.
- /REI2009a/ REIS GmbH. & Co. KG. Maschinenfabrik- Division REIS Lasertec: *Laserspy- aktive Sensorik für die Lasersicherheit. Handbuch und Betriebsanleitung*, 2009, URL: <http://www.reislasertec.de/de/produkte/lasersicherheitstechnik/laserspy--safety-sensor>
- /REI2009b/ REIS GmbH. & Co. KG. Maschinenfabrik- Division REIS Lasertec: *Laserspy- aktive Sensorik für die Lasersicherheit. Flyer*, 2009, URL: <http://www.reislasertec.de/de/produkte/lasersicherheitstechnik/laserspy--safety-sensor>
- /RJL2017/ RJL Micro & Analytic GmbH.: <http://www.rjl-microanalytic.de/html/restschmutzanalyse-restschmutzbestimmung.html>, Stand 2017, Letzter Zugriff 14.08.2017.
- /ROZ2000/ Rozzi, J. C.; Pfefferkorn, F. E.; Incropera, F. P.; Shin, Y. C.: *Transient, three-dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride: I. Comparison of predictions with measured surface temperature histories*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, Vol. 43, S.1409–1424.
- /SAF2006/ Safdar, S.; Li, L.; Sheikh, M. A.; Liu, Z.: *An Analysis of the Effect of Laser Beam Geometry on Laser Transformation Hardening*. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, Vol. 128(3), S.659-667.
- /SCH2016/ Schweda, S.; Ellenrieder, S.: *Reinigung und Restschmutzanalyse in der additiven Fertigung*. In: JOT Journal für Oberflächentechnik, Ausgabe Industrielle Teilereinigung, 2016, S. 12-13.
- /SEI2013/ Seifert, M.; Anhalt, K.; Baltruschat, C.; Bonss, S.; & Brenner, B.: *Qualitätsgesichertes Laserstrahlhärteten durch mobile Temperaturkalibrierung (Quality assured laser heat treatment by mobile temperature calibration)*. In: Proceedings Fachtagung Temperatur, 2013.
- /SEN2009/ Sensortherm GmbH.: Berührungslose Temperaturmessung mit Metis-Pyrometern. Broschüre, Dez. 2010. URL: https://www.sensortherm.de/userfiles/file/download/PS_Metis_II_de.pdf
- /SKV2006/ Skvarenina, S.; Shin, Y. C.: *Predictive modeling and experimental results for laser hardening of AISI 1536 steel with complex geometric features by a high-power diode laser*. In: Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6), S. 2256–2269.
- /TAN2010/ Tani, G.; Fortunato, A.; Ascoli, A.; Campana, G.: *Laser surface hardening of martensitic stainless steel hollow parts*. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, Vol. 59, S.207–210.

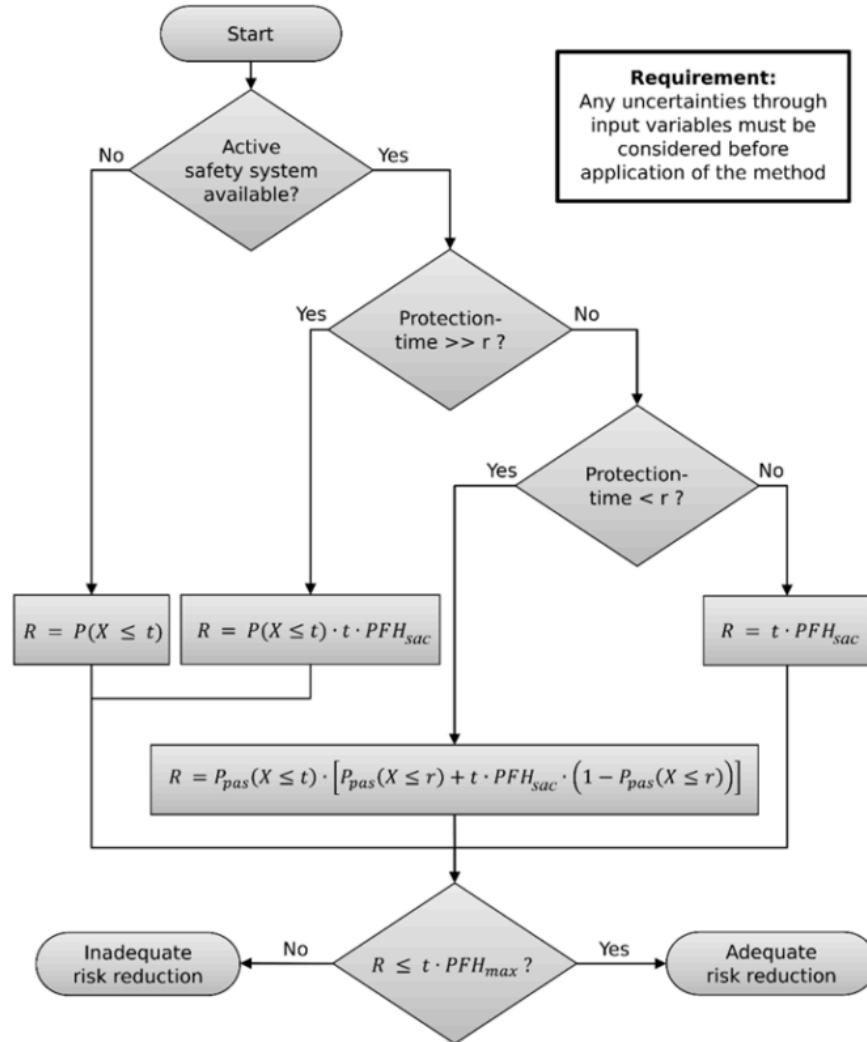
- /THE2015/ Thermal Care Inc.: <https://www.thermalcare.com/1-to-3-ton-portable-chillers/>, Stand 2015-2017, Letzter Zugriff 09.07.2017.
- /TIA2006/ Tian, Y.; Shin, Y. C.: *Thermal modeling for laser-assisted machining of silicon nitride ceramics with complex features*. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, Vol. 128(2), S. 425–434.
- /TOW1999/ Townes, C. H.: *How the Laser Happened: Adventures of a Scientist*. New York: Oxford University Press Inc., 1999, ISBN 0-195-12268-2.
- /TRU2013/ Trunz, P. (Hrsg.): *Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik, Schmutz ist Materie am falschen Ort*. In: ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V, Frankfurt am Main, 2013.
- /TRU2017/ TRUMPF GmbH.: https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/laser/faserlaser/, Stand 2017. Letzter Zugriff 07.07.2017.
- /TSC2003/ Tschätsch, H: *Werkzeugmaschinen, der spanlosen und spanenden Formgebung*. 8. Auflage. Dresden: Carl Hanser Verlag München Wien, 2003, ISBN 3-446-22141-7.
- /WEC2005/ Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen Maschinenarten und Anwendungsbereiche*, 6. neu bearbeitete Auflage. Aachen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, ISBN-10: 3-540-22504-8.
- /WOL2004/ Wolf, A; Steinmann, R: *Greifer in Bewegung. Faszination der Automatisierung von Handhabungsaufgaben*. Stuttgart: Carl-Hanser Verlag München Wien, 2004, ISBN 3-446-22932-9.
- /XUL2011/ Xu, L.; Zheng, R.; Gu, C.; Wang, A.; Ming, H.: *All-fiber laser generates cylindrical vector beams*. In: SPIE Newsroom, 2011.
- /ZWI2014/ Zwinkau, R.; Krebs, M.: *Reinheitsgerechte Materialflusssysteme*. Dortmund, TU Dortmund, Institut für Produktionssysteme, Professur für Arbeits- und Produktionssysteme, 2014, Schlussbericht 17495 N/1 im Auftrag des IGF.

Normen und Richtlinien

- /BGV2017/ Maschinenbau- und Metall-Berufsgenossenschaft (BG): BGV B2-
Unfallverhütungsvorschrift Laserstrahlung: April 2017, aktualisierte
Fassung.
- /BMA2017/ Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.): Arbeitsschutz,
Inkohärente Optische Strahlung, Technische Regeln: Mai 2017.
- /DIN60825-1/ DIN EN 60825-1: Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1:
Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen, Richtlinie 2014/35/EU
des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014
- /DIN8580/ DIN 8580: 2003-09: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.
- /DIN8592// DIN 8592 (1985): Einordnung der Reinigungsverfahren in die
Fertigungsverfahren.
- /VDA19.2/ Verband der Automobilindustrie e. V.: Technische Sauberkeit in der
Montage Teil 2. Umgebung, Logistik, Personal und
Montageeinrichtungen. 1. Auflage, Frankfurt am Main, 2010.
- /VDA19/ Verband der Automobilindustrie e. V.: Prüfung der Technischen
Sauberkeit. Partikelverunreinigungen funktionsrelevanter Automobilteile.
2. überarbeitete Ausgabe., Berlin, 2014.

Anhang

Anhang I

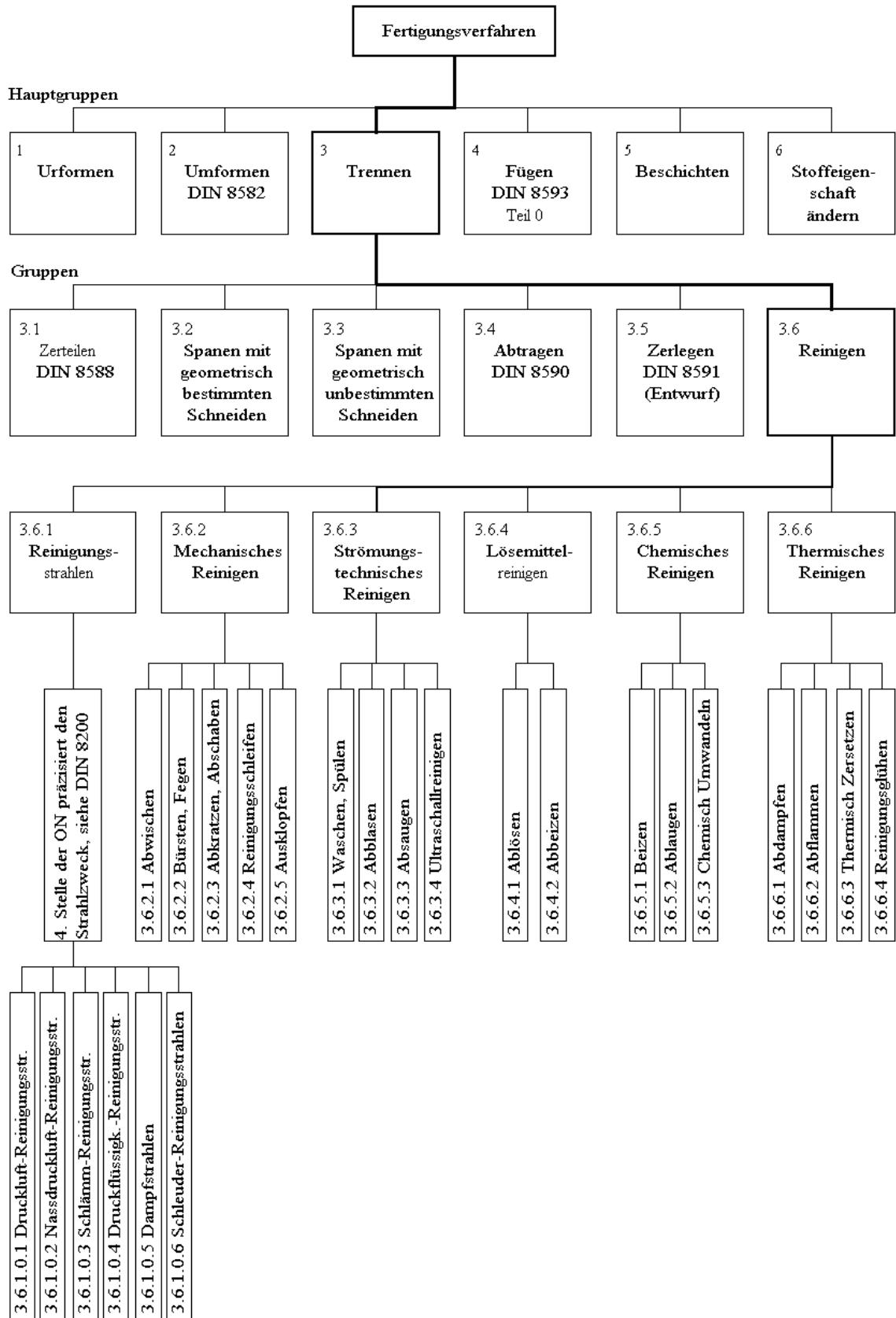


Anhang 1: Ablaufschema der Methodik zur Bewertung und Dimensionierung von Hybridschutzsystemen. Nomenklatur siehe oben nach /LUG2016/

Nomenklatur:

- R Erreichte Risiko Reduktion
- r Reaktionszeit der Sensorik-Aktorik Verkettung in Stunden h
- P Eintrittswahrscheinlichkeit
- X Variable der Standzeit der passiven Schutzkomponente
- t Wartungsintervall in s
- PFH_{max} Maximal zulässige Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Fehlers pro Stunde
- PFH_{sac} Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Fehlers der Sensorik-Aktorik pro Stunde
- P_{pas}(k) Eintrittswahrscheinlichkeit des Events k für die passive Schutzkomponente

Anhang II



Anhang 2: Entwurf zur DIN 8592 (1985): Einordnung der Reinigungsverfahren in die Fertigungsverfahren nach /BAU0000/