

Leitfaden zur Laserintegration in Fertigungseinrichtungen

V 1.0

© Laserinstitut Mittelsachsen e.V. 2004

Gefördert im Rahmen der BMBF-Initiative:
FKZ 0311716 A-E



Inhalt

Inhaltsverzeichnis.....	I - VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	XVII

0. Einleitung	1
0.1 Motivation.....	1

Teil 1: Einführung in die Lasermaterialbearbeitung

1. Laserstrahlquellen	3
1.1 Grundlagen	3
1.1.1 Laserstrahlerzeugung.....	3
1.1.2 Kenngrößen	5
1.1.2.1 Strahlausbreitungsformel.....	5
1.1.2.2 Strahlqualitätskennzahlen.....	5
1.1.2.3 Strahlparameterprodukt	6
1.1.2.4 Intensitätsverteilung.....	6
1.1.2.5 Strahlpolarisation.....	9
1.2 Gaslaser.....	11
1.2.1 CO ₂ -Laser	11
1.2.1.1 Quergeströmter CO ₂ -Laser.....	12
1.2.1.2 Längsgeströmter CO ₂ -Laser	12
1.2.1.3 CO ₂ -Slab-Laser	13
1.2.2 Weitere Gaslaser.....	14
1.3 Festkörperlaser	15
1.3.1 Nd:YAG-Laser	15
1.3.2 Scheibenlaser	17
1.3.3 Weitere Festkörperlaser	18
1.4 Diodenlaser.....	18
1.5 Farbstofflaser	20
1.6 Literaturverweis und weiterführende Literatur	20
2. Strahlführung und -formung	21
2.1 Strahlführung.....	21
2.1.1 Strahlteleskop	21
2.1.2 Strahlweichen/ Strahlumschalter.....	22
2.1.3 Strahlteiler/ Energieteiler	22
2.1.4 Scannerspiegel	23
2.1.5 Strahlführung für CO ₂ -Laser	23
2.1.6 Strahlführung für Nd:YAG-Laser	23
2.2 Strahlformung.....	26

2.2.1	Statische Strahlformung	26
2.2.1.1	Linsen	26
2.2.1.2	Spiegel.....	27
2.2.1.3	Masken	28
2.2.1.4	Weitere Strahlformungssysteme	28
2.2.2	Dynamische Strahlformung.....	30
2.2.2.1	Scannende Systeme	30
2.2.2.2	Schwingspiegel	32
2.2.2.3	Rotierende Optik	32
2.2.2.4	Rotierende Spiegel.....	33
2.2.2.5	Segmentspiegel.....	33
2.2.2.6	Adaptive Optik.....	34
2.3	Kühlung der optischen Komponenten	35
2.4	Reinigung der optischen Komponenten	36
2.5	Düsen	36
2.6	Literaturverweis und weiterführende Literatur	37
3	Kurzbeschreibung der Laserverfahren	38
3.1	Laserschweißen	40
3.1.1	Definition.....	40
3.1.2	Prozesstechnologie	41
3.1.2.1	Laserstrahlschweißen.....	41
3.1.2.2	Prozessanforderungen und –grenzen, Schutzgase	43
3.1.2.3	Werkstoffe.....	45
3.1.3	Lasergerechte Konstruktion.....	46
3.1.4	Vorteile/ Unterschiede zu anderen Schweißverfahren.....	52
3.1.5	DIN	53
3.1.6	Literaturverweis und weiterführende Literatur	54
3.2	Laserschneiden.....	56
3.2.1	Definition.....	56
3.2.2	Prozesstechnologie	57
3.2.2.1	Prozessanforderungen und –grenzen, Gase.....	58
3.2.2.2	Werkstoffe.....	60
3.2.3	Lasergerechte Konstruktion.....	61
3.2.4	Vorteile/ Unterschiede zu andern Schneidverfahren.....	64
3.2.5	DIN	65
3.2.6	Literaturverweis und weiterführende Literatur	66
3.3	Laserbohren.....	67
3.3.1	Definition.....	67
3.3.2	Prozesstechnologie	67
3.3.2.1	Prozessanforderungen und –grenzen, Schutz-/ Prozessgase	70
3.3.2.2	Werkstoffe.....	71
3.3.3	Lasergerechte Konstruktion.....	72
3.3.4	Vorzeile/ Unterschiede zu anderen Bohrverfahren.....	72
3.3.5	Literaturverweis und weiterführende Literatur	73
3.4	Oberflächenbearbeitung mit Laserstrahl	74

3.4.1	Laserhärten/ Randschichthärten.....	74
3.4.1.1	Prozesstechnologie	74
3.4.1.2	Prozessanforderungen und –grenzen, Schutzgase.....	75
3.4.1.3	Werkstoffe.....	76
3.4.1.4	Lasergerechte Konstruktion.....	76
3.4.1.5	Vorteile/ Unterschiede zu anderen Härteverfahren.....	80
3.4.1.6	Literaturverweis und weiterführende Literatur	81
3.4.2	Laserreinigen	82
3.4.2.1	Prozesstechnologie	82
3.4.2.2	Prozessanforderungen und –grenzen, Schutz-/ Prozessgase	83
3.4.2.3	Werkstoff/ Anwendung	84
3.4.2.4	Vorteile/ Unterschiede zu anderen Reinigungsverfahren.....	85
3.4.2.5	Literaturverweise und weiterführende Literatur.....	86
3.4.3	Laserbeschriften/ Lasermarkieren.....	87
3.4.3.1	Prozesstechnologie	87
3.4.3.2	Prozessanforderungen und –grenzen	90
3.4.3.3	Werkstoffe.....	91
3.4.3.4	Lasergerechte Konstruktion.....	92
3.4.3.5	Vorteile/ Unterschiede zu anderen Beschriftungsverfahren	93
3.4.3.6	Literaturverweis und weiterführende Literatur	95
3.4.4	Laserbeschichten, Laserlegieren, Laserdispergieren	96
3.4.4.1	Prozesstechnologie	97
3.4.4.2	Prozessanforderungen und –grenzen	98
3.4.4.3	Werkstoffe.....	99
3.4.4.4	Lasergerechte Konstruktion.....	100
3.4.4.5	Vorteile/ Unterschiede zu vergleichbaren Beschichtungsverfahren.....	101
3.4.4.6	Literaturverweis und weiterführende Literatur	101
3.4.5	Laserumschmelzen	102
3.4.5.1	Prozesstechnologie	103
3.4.5.2	Prozessanforderungen und –grenzen	103
3.4.5.3	Werkstoffe.....	104
3.4.5.4	Lasergerechte Konstruktion.....	105
3.4.5.5	Vorteile/ Unterschiede zu anderen Verfahren.....	105
3.4.5.6	Literaturverweis und weiterführende Literatur	105
3.5	Hybridverfahren.....	107
3.5.1	Prozesstechnologie	107
3.5.2	Prozessanforderungen und –grenzen, Schutzgase	109
3.5.3	Werkstoffe.....	110
3.5.4	Vorteile/ Unterschiede zu anderen Schweißverfahren.....	110
3.5.5	Literaturverweis und weiterführende Literatur	111
4	Laserspezifische Verfahrensangaben - Applikationsbeispiele.....	112

Teil 2: Lasereinsatz in WZM und Fertigungseinrichtungen – Maschinentechnik

5	Begriffsbestimmung.....	119
5.1	Literatur.....	121
6	Möglichkeiten der Laserintegration in die Fertigung/ in Fertigungseinrichtungen	122
6.1	Verkettung eigenständiger Lasermaschinen mit konventioneller Fertigungstechnik („Laser-Only“-Prozess).....	128
6.1.1	Anlagenkonzepte für die Lasermaterialbearbeitung.....	128
6.1.1.1	Kartesische Systeme	129
6.1.1.2	Koordinatentisch.....	132
6.1.1.3	Strahlableitungssystem.....	133
6.1.1.4	Industrieroboter – Knickarmroboter.....	134
6.1.1.5	Handbearbeitungssystem.....	137
6.1.2	Stand der Technik: „Laser-Only“-Prozess	138
6.1.3	Literatur.....	138
6.2	Integration von Laserverfahren in konventionelle Fertigungstechnik (spanende Werkzeugmaschinen, Folgeverbundwerkzeuge, Umformmaschinen) 140	
6.2.1	Lösungsansätze: Laserbearbeitung in Drehmaschinen, Drehzentren, Fräsmaschinen, Bohr- und Fräszentren	141
6.2.1.1	Grundlagen des Zerspanens	141
6.2.1.2	Laser als unterstützendes Werkzeug in Werkzeugmaschinen	143
6.2.1.3	Laser als ergänzendes oder zusätzliches Werkzeug in WZM.....	148
6.2.2	Laserintegrierte Komplettbearbeitungssysteme in der Praxis	158
6.2.2.1	Laserintegrierte Drehmaschine von IPT Aachen	160
6.2.2.2	Traub TNC 30 DGY	161
6.2.2.3	Index G200 und V100.....	162
6.2.2.4	Boehringler – NG 200 Laser.....	165
6.2.2.5	Maho MH600 C	166
6.2.2.6	Laserintegrierte Fräsmaschine von IWS & Arnold	168
6.2.2.7	Lasertec - DMU 60 L	169
6.3	Literatur.....	170
7	Sensorik im Zusammenhang mit dem Lasereinsatz – (Qualitätssicherungselemente wie Prozessüberwachungseinrichtungen, Nahtführungssensoren, Optiküberwachung u.a.)	172
7.1	Prozesssensoren.....	174
7.2	Thermographie – Temperaturüberwachung durch Pyrometer.....	176
7.3	Abstandssensoren.....	177
7.4	Nahtfolgesensoren	178
7.5	Literatur.....	180
8	Anschluss-, Aufstell- und Betriebsbedingungen der in der Materialbearbeitung typischen Laserquellen	181
8.1	Literatur.....	184

9	Ansteuerung des Lasers.....	185
9.1	Programmierung.....	187
9.2	Steuerung bei der Laserintegration.....	188
9.3	Literatur.....	189
10	Einbeziehung des Lasers und peripherer Komponenten in die Fernwartung der Anlage	190
10.1	Literatur.....	191
11	Anforderungen an periphere Komponenten, wie Schutz- und Prozessgaszuführungen sowie Absaugeinrichtung, Zusatzwerkstoffförderung und Spannvorrichtung	192
11.1	Zusatzwerkstoffe und deren Fördersysteme	192
11.2	Gaszuführung.....	193
11.3	Absaugeinrichtungen.....	198
11.4	Spannvorrichtungen	200
11.5	Literatur.....	201
12	Anforderungen an die Prozess- bzw. Schutzgase, Cross Jet.....	202
12.1	Anforderungen an das Prozessgas.....	202
12.2	Cross Jet und Schutzglas	203
12.3	Literatur.....	204
13	Lasersicherheit.....	205
13.1	Sicherheitsanforderungen.....	205
13.1.1	Laserspezifische Sicherheitsanforderungen.....	205
13.1.1.1	Gefahr und Grenzwerte für das Auge	206
13.1.1.2	Gefahr und Grenzwerte für die Haut	208
13.1.2	Anlagenspezifische Sicherheitsanforderungen.....	209
13.1.3	Verfahrensspezifische Sicherheitsanforderungen.....	210
13.2	Organisatorische Maßnahmen.....	210
13.3	Meldepflichten	212
13.4	Laserschutzbeauftragter	212
13.5	Laserklassen.....	212
13.6	Beispiellösungen für das Erreichen einer Laser-Klasse-1-Anordnung.....	214
13.7	Literatur.....	214
14	Normen und Richtlinien für den Lasereinsatz.....	216
14.1	Literatur.....	219
15	Kostenbetrachtung/ Wirtschaftlichkeit der laserintegrierten Komplettbearbeitung	220
15.1	Literatur.....	222

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung	TEA	Transversaler Atmosphärendruck-Laser
AO	Adaptive Optik	TEM	Transversaler Elektromagnetischer Mode
BAT	biologischer Arbeitsstofftoleranzwert	TRG	Technische Regeln für Gase
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift	TRK	technischen Richtkonzentrationen
bzw.	beziehungsweise	u.a.	unter anderem
CAD	Computer Aided Design	UV	ultraviolett
CCD	Charge-coupled Device	UVV	Unfallverhütungsvorschrift
CMB	Control Metal Build-Up	VBG	Vorschrift der Berufsgenossenschaft
CNC	Computerized Numerical Control	VDE	Verein Deutscher Elektrotechniker
CVD	chemical vapor deposition	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
cw	continuous wave, Dauerstrich	vgl.	vergleichend
d.h.	das heißt	VIS	Strahlung im sichtbaren Spektralbereich
DIN	Deutsches Institut für Normung	WEZ	Wärmeeinflusszone
DNC	Direct Numerical Control	WIG	Wolfram-Inert-Gas
DVS	Deutscher Verlag für Schweißtechnik	WZM	Werkzeugmaschine
EN	europäische Norm	z.B.	zum Beispiel
engl.	englisch	2D	zweidimensional
GZS	Grenzwert der zugänglichen Strahlung	3D	dreidimensional
HF	Hochfrequenz		
HLDL	Hochleistungsdiodenlaser		
IR	infrarot		
ISO	International Standardization Organization		
LAM	Laser assisted machining		
lat.	lateinisch		
MAG	Metall-Aktiv-Gas		
MAK	maximale Arbeitsplatzkonzentration		
MIG	Metall-Inert-Gas		
MZB	maximal zulässige Bestrahlung		
NC	Numerical Control		
o.ä.	oder ähnliche		
PVD	physical vapor deposition		
pw	pulsed wave		
S.	Seite		
s.	siehe		
SPP	Strahlparameterprodukt		
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung		

Abbildungsverzeichnis

Abb. 0:	Verkürzung der Durchlaufzeit infolge von Laserintegration; Quelle: Drechsel, J.: Möglichkeiten der Laserintegration in Werkzeugmaschinen; Vortrag zur Intec 2002; 08.03.2002	1
Abb. 1:	Laserprinzip	4
Abb. 2:	Schematische Darstellung eines Vierniveausystems.....	4
Abb. 3:	Definition der Parameter eines Laserstrahls.....	5
Abb. 4:	Laserintensitätsverläufe für Kreissymmetrie: TEM00, TEM10, TEM01*(von links) ..	7
Abb. 5:	PRIMES Fokusmonitor und Powermonitor zur Vermessung des Laserstrahles und der Laserleistung; Quelle: Drechsel, J.: Schlussbericht zum InnoRegio Innosachs Verbundprojekt 2.2: „Laseroberflächenbearbeitung“	7
Abb. 6:	Rotationsscheibe des FocusMonitors und der interne Strahlengang; Quelle: Kramer, R.; Schwede, H.: Einrichtung und Strahlvermessung beim Einsatz von HLDL; In: 2. Workshop Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern, IWS Dresden, 14. – 15. Oktober 1999.....	8
Abb. 7:	Ergebnis einer Kaustikmessung – dargestellt auf der grafischen Benutzerober- fläche des FocusMonitors von Primes Quelle: < http://www.primes.de >; verfügbar am 25.05.2004	8
Abb. 8:	Strahlvermessung – Prometec; Quelle: Cremer, V.: Strahldiagnostik an Hoch- leistungsdiodenlasern; In: 2.Workshop: Anwendung von Hochleistungs-Dioden- lasern, IWS Dresden, 14.-15. Oktober 1999	9
Abb. 9:	Räumliche Strahleigenschaften – Polarisation	9
Abb. 10:	Einflüsse auf den Bearbeitungsprozess	10
Abb. 11:	HF angeregter quergeströmter CO ₂ -Laser; Quelle: Rofin Sinar Laser: Einfüh- rung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung, 2000.....	12
Abb. 12:	Prinzip des schnell längsgeströmten CO ₂ -Lasers; Quelle: Rofin Sinar Laser: Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung, 2000.....	13
Abb. 13:	Prinzip eines CO ₂ -Slap-Lasers; Quelle: < http://www.rofin.com/index-e.htm >; verfügbar am 10.03.2004.....	13
Abb. 14:	Prinzip des lampengepumpten Nd:YAG-Lasers; Quelle: Laserlexikon 2.0 Fraunhofer IWS Dresden.....	16
Abb. 15:	Prinzip des diodengepumpten Nd:YAG-Lasers; Quelle: Laserlexikon 2.0 Fraunhofer IWS Dresden.....	16
Abb. 16:	Prinzip eines Scheibenlasers; Quelle: Laserlexikon 2.0 Fraunhofer IWS Dresden	18
Abb. 17:	Licht aus pn-Übergang; Quelle: Rofin Sinar Laser: Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung, 2000	19
Abb. 18:	Laserbarren mit vielen Einzellasern; Quelle: Rofin Sinar Laser: Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung, 2000.....	19

Abb. 19: Prinzipieller Aufbau eines HLDL; Quelle: Diodenlaser in der industriellen Anwendung; In: 4. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern“, 6.-7. Mai 2003, IWS Dresden.....	19
Abb. 20: Prinzip der Strahlaufweitung.....	21
Abb. 21: Prinzip der Strahlumschaltung.....	22
Abb. 22: Strahlteilung durch Prisma.....	22
Abb. 23: Strahlteilung durch teildurchlässige Spiegel.....	22
Abb. 24: Aufbau eines Lichtleitkabels Quelle: Laserlexikon 2.0 Fraunhofer IWS Dresden.....	24
Abb. 25: Prinzip der Stufen- (oben) und der Gradientenlichtfaser (unten).....	25
Abb. 26: Einfache Möglichkeiten der Strahlformung nach einer Faserübertragung; Quelle: VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien (Hrsg.): Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern – Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995; ISBN 3-18-401533-5.....	25
Abb. 27: Fokussierung von Laserstrahlung durch Linsen.....	26
Abb. 28: Linsenarten.....	27
Abb. 29: Strahlformung durch eine in den Strahlengang eingebrachte Maske; Quelle: Kuntze, T.: Excimerlaser werden flexibel – Markierungsverfahren mit Mikrospiegelarrays; IWKM 2003, Wissenschaftliche Berichte – Lasertechnologie; Nr.1, 2003; ISSN 1437-7624.....	28
Abb. 30: Strahlhomogenisierung.....	29
Abb. 31: Kaleidoskop Quelle: Laserlexikon 2.0 Fraunhofer IWS Dresden.....	29
Abb. 32: Wirkprinzip eines Facettenspiegels.....	30
Abb. 33: Prinzip des Scannerverfahrens.....	31
Abb. 34: Bildfeldkrümmung in Folge des Einsatzes von Scannerspiegeln.....	31
Abb. 35: Prinzip des F-Theta-Linsensystems.....	32
Abb. 36: Schwingungsspiegel; Quelle: < http://www.gsilumonics.com >; verfügbar am 08.04.2004.....	32
Abb. 37: Polygonspiegel für die Lasermaterialbearbeitung.....	33
Abb. 38: Kühlwasserdruckgesteuerte Adaptive Optik; Quelle: Schuberth, S.: Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO ₂ - Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken – Bamberg: Meisenbach Verlag, 1998; ISBN 2-87525-106-7.....	34
Abb. 39: Adaptive Optik mit Piezo-Aktuatoren; Quelle: Schuberth, S.: Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO ₂ -Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken – Bamberg: Meisenbach Verlag, 1998; ISBN 2-87525-106-7.....	34
Abb. 40: Prinzip der Spiegelkühlung.....	35
Abb. 41: Gasdüsen für das Laserschweißen.....	37

Abb. 42: Fertigungsverfahren nach DIN 8580; Nach: M. Geiger; G. Eßler; M. Schmid: Mikroproduktion – Chance und Herausforderung für die Lasertechnik; In: Stuttgarter Lasertage SLT'03; 25. – 26. September 2003.....	38
Abb. 43: Absorptionsgrad verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Wellen- länge; Quelle: Stimper: Anwendungspotential der HLDL zur Reparatur von Turbinenschaufeln; In: 3. Workshop „Industrielle Anwendung von Hoch- leistungs-Diodenlasern, 14. – 15. September 2000, IWS Dresden	39
Abb. 44: Laserstrahlschweißen; Quelle: http://www.trumpf.com/scripts/redirect.php?domain=www.trumpf.com&top=1.header.html&nav=1.navigation.html&content=1.bildergalerie.html >; verfügbar am 03.05.2004.....	41
Abb. 45: Prinzip des Laserstrahlschweißens; Quelle: Beyer, E.: Schweißen mit Laser – Grundlagen - 1.Auflage – Erscheinungsort: Springer Verlag, 1995.....	42
Abb. 46: Prinzip des Laserstrahlschweißens von Kunststoff; Quelle: Hierl, S.: Fügen von Kunststoffen mit Laserstrahlung; In: 4. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern“, 6.-7. Mai 2003, IWS Dresden	45
Abb. 47: Stoß- und Nahtarten beim Laserstrahlschweißen; Quelle: http://www.laserzentrum-hannover.de/download/wahlpflichtfach_lasertechnik/09_Schweissen_mit_dem_Laserstrahl.pdf ; verfügbar am 05.07.2004.....	46
Abb. 48: Toleranzanforderungen an Spaltbreite und Kantenversatz.....	47
Abb. 49: Toleranzanforderungen	47
Abb. 50: Toleranzanforderungen – Werkstückabstand.....	47
Abb. 51: Zugänglichkeit von Schweißstellen	48
Abb. 52: Ratschlag zur Konstruktion – Schweißen.....	48
Abb. 53: Gewährleistung der Wärmeableitung	49
Abb. 54: Minimaler Positionieraufwand.....	49
Abb. 55: sensorgerechte Konstruktion; Quelle: Radaj, D.; Koller, R.; Dilthey, U.; Buxbaum, O. (Hrsg.): Laserschweiß-gerechtes Konstruieren. Fachbuchreihe Schweißtechnik – Band 116, 1. Auflage– Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1994; ISBN 3-87155-143-0.....	50
Abb. 56: Drei-Blech-Verbindung	50
Abb. 57: Schweißen verzinkter Bleche; Quelle: Radaj, D.; Koller, R.; Dilthey, U.; Buxbaum, O. (Hrsg.): Laserschweißgerechtes Konstruieren. Fachbuchreihe Schweißtechnik – Band 116 – 1. Auflage – Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1994; ISBN 3-87155-143-0.....	51
Abb. 58: doppelt Zinkschicht vermeiden.....	51
Abb. 59: Mögliche Stoßanordnungen beim Schweißen von Kunststoff; Nach: Pütz, H.: Fügen von Kunststoffen mit HLDL; In: 2. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern“, 14.-15. Oktober 1999, IWS Dresden.....	52
Abb. 60: thermische Schneidverfahren nach DIN 2310.....	56
Abb. 61: Prinzipskizze – Schneiden.....	57

Abb. 62: Lasergeschnittenes Bauteil	
Quelle: < http://www.maschinenbau-wagner.de/index.htm >, verfügbar am 27.05.2004.....	58
Abb. 63: Laserstrahlschneidanwendung	
Quelle: Abram, L.: Laserhärten mit HLDL; In: 2. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern; 14.-15. Oktober 1999, IWS Dresden	59
Abb. 64: Beim Schneiden spitzer Ecken Laserleistung anpassen, oder Kontur verändern..	63
Abb. 65: Schnittfolge beachten.....	63
Abb. 66: Lasergebohrtes Getriebe	
Quelle: http://www.trumpf-laser.com/ ; verfügbar am 05.07.2004	67
Abb. 67: Bohrlocharten.....	68
Abb. 68: Bohrlochgeometrien	68
Abb. 69: Schematische Darstellung unterschiedlicher Bohrvarianten: (von links)	
Einzelpuls-, Perkussions-, Trepanier- und Wendelbohren.....	69
Abb. 70: Prinzipaufbau einer Festkörperlaser-Bohranlage	70
Abb. 71: Mit Laser erstellte Mikrobohrungen	
Quelle: < http://www.schorcht.de/bohren.html >, verfügbar am 27.05.2004	71
Abb. 72: Vorteil des Backermaterials	72
Abb. 73: Verfahren – Laserhärten.....	74
Abb. 74: Laserstrahlhärten; Quelle: < http://www.thyssen-laser.de/verfahrensentwicklung.html >, verfügbar am 27.05.2004.....	75
Abb. 75: Ratschläge für die Konstruktion – Härten.....	77
Abb. 76: Ratschläge für die Konstruktion – Härten von Ecken.....	77
Abb. 77: Formgestaltung von Kanten beim Laserstrahlhärten	78
Abb. 78: Beispiele für günstige Querschnittsübergänge	78
Abb. 79: Herstellung der endgültigen Form nach dem Härten	79
Abb. 80: Ideale Intensitätsverteilung für eine konstante Temperatur im Brennfleck; Quelle: < http://www.ifsw.uni-stuttgart.de/deutsch/profil/jubi/laserhaerten.html >, verfügbar am 27.05.2004.....	79
Abb. 81: Laserstrahlprofil und das entstehende Härteprofil	
Quelle: Dierken, R.: Laserstrahlhärten mit robotergeführten Diodenlasern; In: 4. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern, 6.-7. Mai 2003, IWS Dresden.....	79
Abb. 82: teilweise lasergereinigtes Bauteil; Quelle: < http://www.dbu.de/pro/projekt34.html >, verfügbar am 02.06.2004.....	82
Abb. 83: Laserstrahlreinigen.....	82
Abb. 84: Einflüsse auf die Qualität und Quantität beim Laserstrahlreinigen.....	84
Abb. 85: Beschriftung beschichteter Bauteile – Drehzahlmesser; Quelle: http://www.trumpf-laser.com/ ; verfügbar am 05.07.2004.....	87

Abb. 86: Beschriftung durch Scanner-Verfahren; Quelle: http://www.laser-zentrum-hannover.de/de/veranstaltungen/laserzertifikat/wpf_lasertechnik/06_Beschriften_mit_dem_Laser.pdf ; verfügbar am 05.07.2004.....	88
Abb. 87: Masken-Beschriftungsverfahren durch Projektion	88
Abb. 88: Beschriftung durch Dot-Matrix-Verfahren, Scanner- und Maskenverfahren (von links)	89
Abb. 89: Laserbeschriftung einer Tastatur; Quelle: http://www.teschauer-laser.de/homepage/d.htm ; verfügbar am 17.05.2004	90
Abb. 90: Positionierung der Beschriftungsmaske im Strahlengang	92
Abb. 91: Bearbeitungsergebnis in Abhängigkeit von der Lage der Maske relativ zur Strahlachse	93
Abb. 92: zweistufiges Dispergieren.....	96
Abb. 93: einstufiges Beschichten.....	96
Abb. 94: einstufiges Laserlegieren.....	97
Abb. 95: Skizze Legieren, Beschichten und Dispergieren	97
Abb. 96: Laserbeschichtung; Quelle: http://www.ifsw.uni-stuttgart.de/deutsch/profil/jubi/beschichten_hochleistung.html ; verfügbar am 06.07.2004	99
Abb. 97: Ratschlag zur Konstruktion: Spitzen und scharfe Kanten vermeiden	100
Abb. 98: Prinzipskizze – Umschmelzen	102
Abb. 99: Laserumschmelzen von Nockenwellen mit 17 kW CO ₂ -Laser; Quelle: http://www.ibk-kellner.de/Bearbeitung/Oberflächenbearbeitung/body_oberflächenbearbeitung.html ; verfügbar am 06.07.2004.....	104
Abb.100: Hybridschweißen; Quelle: http://www.cmit.csiro.au/innovation/2002-12/hybrid.cfm ; verfügbar am 06.07.2004	107
Abb.101: Hybridschweißdüse mit stechend nachlaufendem Lichtbogen.....	108
Abb.102: Hybridschweißkopf; Quelle: http://www.fronius.com/unternehmen/presse/archiv.htm ; verfügbar am 17.05.2004	109
Abb.103: Klassifizierung der Werkzeugmaschinen nach dem Automatisierungsgrad Quelle: Hirsch, A.: Werkzeugmaschinen – Grundlagen. – Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2000; ISBN 3-528-04950-2	119
Abb.104: Elemente einer Werkzeugmaschine; Quelle: Tönshoff, H. K.: Werkzeugmaschinen – Grundlagen. – Berlin, Heidelberg u.a.: Springer Verlag, 1995; ISBN 3-540-58674-1	120
Abb.105: Prinzipieller Aufbau einer Laserbearbeitungsmaschine Quelle: Radauer, T.: Integrierter Lasereinsatz erweitert Komplettbearbeitung; URL: http://www.hausarbeiten.de/rd/faecher/hausarbeit/tec/17643.html , verfügbar am 15.04.2004.....	120
Abb.106: Einbindung der Lasermaterialbearbeitung in den Fertigungsfluss.....	123
Abb.107: Störeinflüsse auf Strahlführungssysteme in konventionellen Werkzeugmaschinen; Quelle: Mayrose, H.-G. A. B.: Einsatz von Bearbeitungslasern in	

konventionellen Werkzeugmaschinen zur Erweiterung ihres Anwendungsspektrums – Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsbeispiele. – 1. Auflage – Aachen: Verlag Shaker, 1993; ISBN 3-86111-341-4.....	126
Abb.108: Prinzip des „Laser-Only“-Prozesses.....	128
Abb.109: Fliegende Optik; Quelle: http://images.google.de/imgres?imgurl=www.metall-meister.de/images/lasertechnik-1.jpg&imgrefurl=http://www.metall-meister.de/produktion/lasertec.htm&h=158&w=300&sz=11&tbnid=lynRRe5QiEsJ:&tbnh=57&tbnw=110&start=42&prev=/images%3Fq%3Dlaserschneidanlage%26start%3D40%26hl%3Dde%26lr%3D%26ie%3DUTF-8%26sa%3DN ; verfügbar am 01.07.2004.....	130
Abb.110: Schematische Darstellung einer 5-Achs-Hybridanlage; Quelle: Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser – 1. Auflage – Stuttgart: B.G. Teubner Verlag, 1992; ISBN 3-519-06134-1, S. 222.....	131
Abb.111: Portalanlage TLM 610 Quelle: < http://www.ntclaser.com/tlm.htm >, verfügbar am 21.05.2004	132
Abb.112: Bearbeitungsstation mit xy-Schlitten und Drehtisch; Quelle: Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser – 1. Auflage – Stuttgart: B.G. Teubner Verlag, 1992; ISBN 3-519-06134-1; S. 220.....	132
Abb.113: Strahlableitungssystem; Quelle: < http://www.imt.fb12.uni-siegen.de/he/forschung/conti/laser-pattern.gif >; verfügbar am 07.05.2005.....	133
Abb.114: REIS-Laserroboter RV16L mit integrierter CO ₂ -Laserstrahlführung; Quelle: < www.reisrobotics.com >; verfügbar am 12.05.2004.....	135
Abb.115: Vertikal-Knickarmroboter Quelle: < www.reisrobotics.com >; verfügbar am 12.05.2004.....	135
Abb.116: Knickgelenksystem; Quelle: < http://www.laser-zentrum-hannover.de/de/veranstaltungen/laserzertifikat/wpf_lasertechnik/04_Strahlfuehrung_und_formung.pdf >; am 17.05.2004.....	136
Abb.117: Handschweißkopf; Quelle: Handbearbeitung mit HLDL; In: 2. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern, 14.-15. Oktober 1999, IWS Dresden.....	137
Abb.118: Gliederung der Werkzeugmaschinen nach DIN 69651; Nach: Mayrose, H.-G. A. B.: Einsatz von Bearbeitungslasern in konventionellen Werkzeugmaschinen zur Erweiterung ihres Anwendungsspektrums – Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsbeispiele. – 1. Auflage – Aachen: Verlag Shaker, 1993; ISBN 3-86111-341-4.....	140
Abb.119: Zerspanen.....	142
Abb.120: Warmdrehen; Quelle: < http://widget.ecn.purdue.edu/~lamp/ >; verfügbar am 19.04.2004.....	144
Abb.121: Prinzip des Warmdrehens; Quelle: < http://tools.ecn.purdue.edu/~clm/Center_LAM/sld001.htm >; verfügbar am 19.04.2004	146

Abb.122: Benzinger TNE – Komplettbearbeitungsmaschine zum laserunterstützten Drehen, Quelle: < http://www.ste-bergwaldt.de/benzinger/images/benz_tne.jpg >; verfügbar am 23. 04.2004.....	146
Abb.123: Laserunterstütztes Fräsen; Quelle: < http://www.ipt.fraunhofer.de/cms.php?id=1597 >; verfügbar am 06.05.2004.....	147
Abb.124: Drehmaschine mit integriertem Laserstrahlschweißen; Quelle: < http://zfs.rus.uni-stuttgart.de/publikationen/lik-flyer.pdf >; verfügbar am 06.05.2004.....	149
Abb.125: Komplettbearbeitungsmaschine mit Stanz- und Laserkopf: TRUMATIC 6000 LASERPRESS; Quelle: < http://www.trumpf.com/1.index.html >; verfügbar am 19.05.2004.....	150
Abb.126: Auf TRUMATIC 6000 LASERPRESS gefertigtes Blech; Quelle: < http://www.trumpf.com/1.img-cust/TC-6000-L_D.pdf >; verfügbar am 19.05.2004.....	151
Abb.127: Laserdrehen.....	152
Abb.128: Laser-Fräsen.....	152
Abb.129: 5-Achs Drehzentrum mit Nd:YAG integrierten Schweißen und Härten; Quelle: < http://www.ifsw.uni-stuttgart.de/deutsch/beitrag/lasermagazin/fokus0400.html >; verfügbar am 19.05.2004.....	153
Abb.130: Arbeitsraum des Drehzentrums der Index G200 mit integrierter LBO-Laserbearbeitungsoptik zum Härten und Schweißen; Quelle: < http://www.ifsw.uni-stuttgart.de/deutsch/beitrag/lasermagazin/fokus0400.html >; verfügbar am 19.05.2004.....	154
Abb.131: Control Metal Build-Up – Maschine der Firma Albrecht Röders GmbH, Soltau Quelle: CD-ROM zum 2. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern“; 14.-15. Oktober 1999, IWS Dresden.....	156
Abb.132: Versuchsanlage – Drehzentrum mit integrierter Lasermaterialbearbeitung Quelle: Informationsblatt Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT – Produktionsanlagen für die Lasermaterialbearbeitung.....	160
Abb.133: Laserintegration in Traub TNC 30; Quelle: Drechsel, J.: Möglichkeiten der Laserintegration in Werkzeugmaschinen; Vortrag zur Intec 2002; 08.03.2002 ...	161
Abb.134: Integration eines Haas-Lasers in Traub TNC 30; Quelle: Drechsel, J.: Möglichkeiten der Laserintegration in Werkzeugmaschinen; Vortrag zur Intec 2002; 08.03.2002.....	161
Abb.135: Schema des Drehzentrums INDEX GS200 mit integriertem Laser; Quelle: Sigel, J.; Röders, J.; Shellabear, M.: Direktes Rapid Prototyping metallischer Bauteile; In: Stuttgarter Lasertage SLT'99.....	162
Abb.136: Laserintegration in die INDEX G200; Quelle: Infomaterial INDEX zur Laserintegration.....	163

Abb.137: Arbeitsraum in der laserintegrierten INDEX G200; Quelle: Drechsel, J.: Möglichkeiten der Laserintegration in Werkzeugmaschinen; Vortrag zur Intec 2002; 08.03.2002	163
Abb.138: Grundaufbau der INDEX V100; Quelle: < http://www.index-werke.de/en/index/produkte/verticalline/v100/ >; verfügbar am 21.06.2004	164
Abb.139: Boehringer NG 200 Laser; Quelle: < http://www.boehringer-maschinen.de/ >; verfügbar am 14.05.2004	165
Abb.140 Arbeitsraum der Boehringer NG 200 Laser.....	165
Abb.141: Laserintegrierte Komplettbearbeitungsmaschine MH600 C; Quelle: Drechsel, J.: Möglichkeiten der Laserintegration in Werkzeugmaschinen; Vortrag zur Intec 2002; 08.03.2002.....	166
Abb.142: Arbeitsraum der MH600 C mit integriertem Laser; Quelle: Drechsel, J.: Möglichkeiten der Laserintegration in Werkzeugmaschinen; Vortrag zur Intec 2002; 08.03.2002	167
Abb.143: 3-Achs-Laser-Fräszentrum; Quelle: IWS-Jahresbericht 2001, Seite 49	168
Abb.144: Arbeitsraum der DMU 60 L; Quelle: < http://www.etmachinist.com/mar-apr2002/techt.html >; verfügbar am 28.05.2004.....	169
Abb.145: DMU 60 L; Quelle: Sigel, J.; Röders, J.; Shellabear, M.: Direktes Rapid Prototyping metallischer Bauteile; In: Stuttgarter Lasertage SLT'99	169
Abb.146: Sensorprinzipien; Quelle: Wössner, J.; Laier, P.: On-line Qualitätsüberwachung beim Drahtwalzen; In: Sensor Magazin - Hannover: Magazin Verlag – (1998) Nr.2, S. 10 – 15	173
Abb.147: Struktur eines Sensorsystems; Quelle: M. Kogel-Hollacher; C. Dietz; T. Nicolay; M.Müller: Überwachungs- und Regelmethode für das Laserstrahlschweißen; In: Stuttgarter Lasertage SLT'99; 28. – 29. September 1999...	174
Abb.148: Auswahl von Prozessgrößensignalen beim Laserstrahlschweißen; Quelle: Specker, W.: Prozessüberwachung beim Schweißen mit Nd:YAG-Laser – Düsseldorf: VDI Verlag, 2002; ISBN 3-18-361402-2.....	174
Abb.149: Anordnung von Sensoren zur Messung von Prozessgrößen; Quelle: Specker, W.: Prozessüberwachung beim Schweißen mit Nd:YAG-Laser – Düsseldorf: VDI Verlag, 2002; ISBN 3-18-361402-2	175
Abb.150: Prinzipbild Temperaturregelung mit Pyrometer zur berührungslosen Temperaturerfassung; Quelle: Drechsel, J.: Schlussbericht zum InnoRegio Innosachs Verbundprojekt 2.2: „Laseroberflächenbearbeitung	176
Abb.151: Laufzeit-Abstandsmesser der Firma Turck; Quelle: < http://www.turck.pl/download/files/measure.pdf >; verfügbar am 03.05.2004	178
Abb.152: Laser Path Finder LPF; Quelle: < http://www.precitec.de >; verfügbar am 02.05.2004	178

Abb.153: Lichtschnittsensor mit Detektorfeld; Quelle: Falldorf, H.: Geometrievermessung und Nahtverfolgung an Tailored Blanks; URL: < http://www.falldorfsensor.de/images/seminar_isw.pdf >; verfügbar am 26.03.2004.....	179
Abb.154: Funktionseinheiten einer Laseranlage; Quelle: Erhardt, K.-M.; Heine, A.; Prommersberger, H.: Laser in der Materialbearbeitung – 1. Auflage – Würzburg: Vogel, 1993; ISBN 3-8023-0480-2.....	181
Abb.155: Platzbedarf einer Laserbearbeitungsmaschine; Quelle: Treiber, H.: Der Laser in der industriellen Fertigungstechnik – Darmstadt: Hoppenstedt, 1990; ISBN 3-87807-161-2.....	182
Abb.156: Versorgungseinheiten einer Laserbearbeitungsmaschine; Quelle: Treiber, H.: Der Laser in der industriellen Fertigungstechnik – Darmstadt: Hoppenstedt, 1990; ISBN 3-87807-161-2.....	182
Abb.157: Kühlprinzip Wasser-Luft-Kühler; Nach: Titscheck, G.: Einsparung von Stromkosten – Kühlung von Lasersystemen mit Energiesparsystem ESS. In: Laser – Kaufering: b-Quadrat Verlag – 12(1998) Nr.2, S. 10-11.....	183
Abb.158: Prinzipschema einer Laseranlagensteuerung; Quelle: Erhardt, K.-M.; Heine, A.; Prommersberger, H.: Laser in der Materialbearbeitung – 1. Auflage – Würzburg: Vogel, 1993; ISBN 3-8023-0480-2.....	185
Abb.159: Fernwartung von Laseranlagen; Quelle: Strategien zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Diodenlasern; n: 4. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern“, 6.-7. Mai 2003, IWS Dresden	191
Abb.160: Zusatzdrahtzuführung bei der Lasermaterialbearbeitung; Quelle: DeOdorico, B.: Löten mit HLDL; In 2. Workshop “Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern”; 14.-15. Oktober 1999, IWS Dresden.....	192
Abb.161: Einstufige Beschichtungsverfahren mit verschiedenartigem Zusatzwerkstoff; Quelle: Arnold, J.: Beschichten mit der Laser-Pulver-Technologie; In: Stuttgarter Lasertage 2001 SLT'01	193
Abb.162: Koaxialdüse, konvergente Koaxialdüse, Ringdüse; Nach: Chryssolouris, G.: Laser Machining – Theory and Practice – 1. Auflage – New York: Springer-Verlag, 1991; ISBN 3-540-97498-9.....	195
Abb.163: Stechende und schleppende Positionierung der Schutzgasdüse; Nach: Schmidt, W.: Positionierung der Schutzgasdüse; In: Laser – Kaufering: b-Quadrat Verlag – 11(1997) Nr.1, S. 24 – 25.....	196
Abb.164: Bauformen von Erfassungseinrichtungen; Quelle: VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien (Hrsg.): Sicherheitstechnische und medizinische Aspekte bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung	198
Abb.165 Spanntechnik für 2D-Konturen; Quelle: Hierl, S.: Fügen von Kunststoffen mit Laserstrahlung; In: 4. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern“, 6.-7. Mai 2003, IWS Dresden.....	200

Abb.166: Alternative Spanntechnik: Spannfedern und Glasplatte; Quelle: Hierl, S.: Fügen von Kunststoffen mit Laserstrahlung; In: 4. Workshop „Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern“, 6.-7. Mai 2003, IWS Dresden	201
Abb.167: Gasversorgung bei der Laserbearbeitung; Quelle: < http://www.lindegas.de >; verfügbar am 03.05.2004.....	202
Abb.168: Spezieller Cross Jet mit 2 seitlich angebrachten (Off-axis) Schutzgasdüsen; Quelle: < http://www.precitec.de >; verfügbar am 03.05.2004	203
Abb.169: Aufbau des menschlichen Auges.....	206
Abb.170: Transmission der Augenmedien	207
Abb.171: Eindringtiefe von Laserstrahlung in die humane Haut.....	208
Abb.172: Warnzeichen für Laserstrahlung	211