

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung: Strahlwerkzeug Laser .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Das Werkzeug.....</b>	<b>8</b>
2.1	Ausbreitung und Charakterisierung von Laserstrahlen.....	8
2.1.1	Die Energie des elektromagnetischen Feldes.....	9
2.1.2	Elektromagnetische Wellen .....	10
2.1.3	Die Intensität elektromagnetischer Wellen .....	14
2.1.4	Die Kohärenz.....	15
2.1.5	Paraxiale Wellen .....	16
2.1.6	Durchmesser und Divergenz von Laserstrahlen .....	22
2.1.7	Die Beugungsmaßzahl.....	24
2.1.8	Berechnung der Strahlausbreitung mit Hilfe der Strahlmatrizen.....	27
2.1.9	Die Fokussierung von Laserstrahlen.....	34
2.1.10	Licht im absorbierenden Medium.....	40
2.1.11	Zusammenfassung von Abschnitt 2.1 .....	42
2.2	Erzeugung von Laserstrahlung .....	43
2.2.1	Die Energiequantelung .....	43
2.2.2	Die diskreten Energiezustände atomarer Systeme .....	46
2.2.3	Absorption und Emission von Licht .....	48
2.2.4	Erzeugung der Laseraktivität .....	51
2.2.5	Der Laser-Resonator.....	58
2.2.6	Betriebsarten von Lasern .....	60
2.2.7	Zusammenfassung von Abschnitt 2.2 .....	61
2.3	Strahlquellen für die Fertigung .....	62
2.3.1	Festkörperlaser.....	62
2.3.2	Gaslaser .....	77
2.3.3	Zusammenfassung von Abschnitt 2.3 .....	84
2.4	Systemtechnik.....	85
2.4.1	Optische Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung .....	86
2.4.2	Gasdynamische Komponenten .....	106
2.4.3	Bearbeitungsstationen.....	112
2.4.4	Laserintegration in Werkzeugmaschinen .....	117
2.4.5	Zusammenfassung von Abschnitt 2.4 .....	120

<b>3</b>	<b>Grundlagen der Wechselwirkung Laserstrahl/Werkstück .....</b>	<b>121</b>
3.1	Energieeinkopplung .....	122
3.1.1	Energiebilanz in der Wechselwirkungszone, Wirkungsgrade .....	122
3.1.2	Energiedeposition im Werkstück .....	128
3.1.3	Fresnelabsorption .....	131
3.1.4	Zusammenfassung von Abschnitt 3.1 .....	154
3.2	Wärmewirkungen im Werkstück .....	155
3.2.1	Wärmeleitungseffekte .....	156
3.2.2	Phasenübergänge .....	184
3.2.3	Zusammenfassung von Abschnitt 3.2 .....	188
3.3	Modifikation des einfallenden Laserstrahls .....	189
3.3.1	Laserinduzierte Plasmen .....	189
3.3.2	Streu- und Absorptionsvorgänge an Partikeln .....	206
3.3.3	Absorption an Molekülen .....	211
3.3.4	Zusammenfassung von Abschnitt 3.3 .....	213
3.4	Abschätzung erzielbarer Prozessergebnisse aus der Energiebilanz .....	214
<b>4</b>	<b>Schneiden .....</b>	<b>218</b>
4.1	Verfahren .....	219
4.2	Energiebilanz und daraus ableitbare Prozessergebnisse .....	222
4.2.1	Energieeinkopplung durch Fresnelabsorption .....	223
4.2.2	Energiezufuhr infolge Oxidation .....	224
4.2.3	Verlustleistung .....	227
4.2.4	Experimentelle Evidenz .....	228
4.3	Einfluss der Laserstrahleigenschaften .....	233
4.3.1	Laserleistung .....	234
4.3.2	Polarisation .....	235
4.3.3	Wellenlänge .....	237
4.3.4	Strahlparameterprodukt, Fokusdurchmesser .....	239
4.3.5	Fokuslage .....	240
4.4	Schmelzeaustrieb .....	240
4.4.1	Schneiddüsen und charakteristische Strömungsfelder .....	240
4.4.2	Gasströmung im Schnittspalt und Schmelzeströmung .....	249
4.5	Qualitätsaspekte .....	254
4.6	Zusammenfassung von Kapitel 4 .....	258

<b>5</b>	<b>Schweißen .....</b>	<b>260</b>
5.1	Schwelle: Wärmeleitungs- / Tiefschweißen.....	260
5.2	Verfahrensprinzip.....	268
5.3	Energieeinkopplung an der Kapillarwand.....	271
5.3.1	Energiebilanz .....	271
5.3.2	Kapillargeometrie .....	271
5.3.3	Fresnelabsorption.....	273
5.3.4	Modifikation der Energieeinkopplung durch Plasma in der Kapillare.....	276
5.4	Fluidmechanische Effekte.....	278
5.4.1	Auswirkungen gleitender Stufen an der Kapillarfront.....	280
5.4.2	Umströmung der Kapillare .....	283
5.4.3	Effekte der Oberflächenspannung.....	289
5.4.4	Dampfströmung in der Kapillare .....	295
5.5	Einfluss der Umgebungsatmosphäre.....	298
5.5.1	Metалldampf- und Schutzgasplasma .....	299
5.5.2	Streuung in Metалldampffackel.....	302
5.5.3	Zustand der Schmelzebadoberfläche .....	303
5.6	Prozessergebnisse .....	303
5.6.1	Prozesswirkungsgrad und energiespezifisches Volumen .....	304
5.6.2	Einfluss der Prozessparameter auf die Nahtgeometrie .....	308
5.7	Prozessinstabilitäten .....	313
5.7.1	Kapillarinstabilitäten: Spritzer und Auswürfe, Porenbildung .....	314
5.7.2	Schmelzebadinstabilitäten: Humping .....	318
5.8	Modifikationen des Schweißprozesses .....	321
5.8.1	Doppelfokustechnik.....	322
5.8.2	Elektromagnetische Volumenkräfte .....	325
5.9	Zusammenfassung von Kapitel 5.....	329
<b>6</b>	<b>Laserstrahlverfahren zur Oberflächenmodifikation .....</b>	<b>332</b>
6.1	Martensitisches Randschichthärten.....	335
6.1.1	Verfahrensprinzip.....	336
6.1.2	Energieeinkopplung und Wärmeleitung .....	340
6.1.3	Prozessergebnisse .....	354
6.1.4	Temperaturgeregeltes Härten .....	359
6.2	Beschichten.....	362

6.2.1	Verfahrensmerkmale .....	362
6.2.2	Energieeinkopplung .....	369
6.2.3	Prozessergebnisse.....	376
6.2.4	Einfluss der Prozessparameter auf die Spurgeometrie .....	378
6.2.5	Prozessoptimierungen .....	382
6.3	Zusammenfassung von Kapitel 6 .....	385
<b>7</b>	<b>Bohren und Abtragen .....</b>	<b>387</b>
7.1	Thermische Ablation .....	389
7.1.1	Grundlegende Betrachtungen.....	389
7.1.2	Den Abtrag modifizierende Einflüsse .....	402
7.2	Bohren.....	408
7.2.1	Einzelpulsbohren.....	410
7.2.2	Perkussionsbohren .....	417
7.2.3	Trepanier- und Wendelbohren .....	424
7.3	Abtragen.....	426
7.3.1	Maskenabbildungsverfahren .....	427
7.3.2	Schreibende Verfahren .....	430
7.4	Spanendes Abtragen .....	434
7.5	Zusammenfassung von Kapitel 7 .....	437
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>439</b>
<b>9</b>	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>466</b>