

Inhalt

- 1 Einführung: Strahlwerkzeug Laser 1
- Teil I Das Werkzeug..... 9
- 2 Der Laserstrahl 11
 - 2.1 Ausbreitung und Charakterisierung von Laserstrahlen..... 11
 - 2.1.1 Die Energie des elektromagnetischen Feldes..... 11
 - 2.1.2 Elektromagnetische Wellen 12
 - 2.1.3 Die Intensität elektromagnetischer Wellen 17
 - 2.1.4 Die Kohärenz..... 18
 - 2.1.5 Paraxiale Wellen 19
 - 2.1.6 Durchmesser und Divergenz von Laserstrahlen 25
 - 2.1.7 Die Beugungsmaßzahl 27
 - 2.1.8 Berechnung der Strahlausbreitung mit Hilfe der Strahlmatrizen 29
 - 2.1.9 Die Fokussierung von Laserstrahlen..... 37
 - 2.1.10 Licht im absorbierenden Medium..... 44
 - 2.1.11 Zusammenfassung von Abschnitt 2.1 46
 - 2.2 Erzeugung von Laserstrahlung 47
 - 2.2.1 Die Energiequantelung elektromagnetischer Strahlung..... 47
 - 2.2.2 Die diskreten Energiezustände atomarer Systeme 49
 - 2.2.3 Absorption und Emission von Strahlung 51
 - 2.2.4 Erzeugung der Laseraktivität 54
 - 2.2.5 Der Laser-Resonator 62
 - 2.2.6 Betriebsarten von Lasern 64
 - 2.2.7 Zusammenfassung von Abschnitt 2.2 65
 - 2.3 Strahlquellen für die Fertigung 66
 - 2.3.1 Festkörperlaser..... 66
 - 2.3.2 Gaslaser 81
 - 2.3.3 Zusammenfassung von Abschnitt 2.3 87
- 3 Die Systemtechnik..... 89
 - 3.1 Optische Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung 89
 - 3.1.1 Spiegel und Linsen als Elemente der Strahlführung und -formung 91
 - 3.1.2 Fokussierende Optiken 95
 - 3.1.3 Strahlführung in freier Propagation 97

3.1.4	Leistungsübertragung durch flexible Glasfasern.....	106
3.2	Gasdynamische Komponenten.....	109
3.2.1	Düsen.....	109
3.2.2	Aerodynamische Fenster.....	109
3.2.3	Querjet.....	111
3.3	Bearbeitungsstationen.....	114
3.3.1	Anlagen mit kartesisch erzeugten Bearbeitungsbahnen.....	114
3.3.2	Roboterbasierte Bearbeitungsstationen.....	116
3.3.3	Anlagentechnisches Entwicklungspotential.....	118
3.4	Laserintegration in Werkzeugmaschinen.....	119
3.5	Zusammenfassung von Kapitel 3.....	122
Teil II Die Grundlagen der Wechselwirkung Laserstrahl-Werkstück.....		125
4	Energieeinkopplung.....	127
4.1	Leistungsbilanz in der Wechselwirkungszone.....	127
4.1.1	Wirkungsgrade.....	133
4.2	Energiedeposition im Werkstück.....	134
4.3	Fresnelabsorption.....	137
4.3.1	Absorptionsgrad von Metallen.....	142
4.3.2	Optische Daten keramischer Werkstoffe.....	147
4.3.3	Einkoppelgrad an Modellgeometrien.....	149
4.4	Zusammenfassung von Kapitel 4.....	163
5	Wärmewirkungen im Werkstück.....	165
5.1	Wärmeleitungseffekte.....	166
5.1.1	Ruhende Wärmequellen.....	168
5.1.2	Bewegte Wärmequellen.....	175
5.1.3	Kurzzeitig wirkende Wärmequellen auf halbbunendlichem Körper.....	185
5.1.4	Wärmeakkumulation durch wiederholte, kurzzeitige Energieeinträge.....	188
5.1.5	Wärmeleitungsbasierte Berechnung des Wärmewirkungsgrads.....	191
5.1.6	Das Zwei-Temperaturen-Modell.....	194
5.1.7	Materialabtrag mit ultrakurzen Pulsen.....	198
5.2	Einfluss von Phasenübergängen und Materialströmen.....	201
5.2.1	Einfluss der latenten Wärmen auf den Temperaturverlauf.....	201
5.2.2	Druckabhängigkeit der Verdampfungsstemperatur.....	203
5.2.3	Verdampfung: Massenstromdichte und Rückstoßdruck.....	205

5.2.4	Änderungen des Energietransports im Werkstück	207
5.2.5	Geometrische Veränderungen der Wechselwirkungszone.....	207
5.2.6	Wirkung der Oberflächenspannung	208
5.3	Zusammenfassung von Kapitel 5.....	213
6	Modifikation des einfallenden Laserstrahls	215
6.1	Laserinduzierte Plasmen.....	215
6.1.1	Entstehung laserinduzierter Plasmen	216
6.1.2	Absorption von Laserstrahlung.....	218
6.1.3	Brechungseffekte	221
6.1.4	Dynamische Effekte.....	223
6.2	Streu- und Absorptionsvorgänge an Partikeln	232
6.2.1	Strahlungsextinktion	232
6.2.2	Beeinflussung der Strahlgeometrie	234
6.3	Absorption an Molekülen	235
6.4	Zusammenfassung von Kapitel 6.....	237
7	Abschätzung erzielbarer Prozessergebnisse aus der Leistungsbilanz.....	239
Teil III	Die Verfahren.....	245
8	Schneiden.....	247
8.1	Verfahren	249
8.2	Leistungsbilanz und daraus ableitbare Prozessergebnisse	251
8.2.1	Leistungseinkopplung durch Fresnelabsorption	253
8.2.2	Energiezufuhr infolge Oxidation	256
8.2.3	Verlustleistung	260
8.2.4	Experimenteller Vergleich der Energiezufuhr beim Schmelz- und Brennschneiden.....	262
8.3	Einfluss der Laserstrahleigenschaften.....	266
8.3.1	Laserleistung.....	267
8.3.2	Polarisation	268
8.3.3	Wellenlänge	269
8.3.4	Strahlgeometrie und Fokusslage	272
8.4	Schmelzeaustrieb	273
8.4.1	Schneiddüsen und charakteristische Strömungsfelder	273
8.4.2	Gasströmung und Schmelzeströmung im Schnittspalt.....	282
8.5	Zusammenfassung von Kapitel 8.....	294

9	Schweißen	297
9.1	Schwelle zwischen Wärmeleitungs- und Tiefschweißen.....	298
9.2	Verfahrensprinzip	307
9.3	Leistungseinkopplung an der Kapillarwand.....	310
9.3.1	Leistungsbilanz	310
9.3.2	Kapillargeometrie.....	311
9.3.3	Fresnelabsorption	315
9.3.4	Modifikation der Energieeinkopplung durch Plasma in der Kapillare	319
9.4	Fluidmechanische Effekte.....	320
9.4.1	Auswirkungen gleitender Stufen an der Kapillarfront	322
9.4.2	Umströmung der Kapillare.....	325
9.4.3	Effekte der Oberflächenspannung.....	331
9.4.4	Dampfströmung in der Kapillare.....	342
9.5	Einfluss der Umgebungsatmosphäre.....	344
9.5.1	Metaldampf- und Schutzgasplasma	345
9.5.2	Streuung in Metaldampffackel	348
9.5.3	Zustand der Schmelzebadoberfläche.....	349
9.5.4	Reduzierter Umgebungsdruck.....	349
9.6	Prozessergebnisse.....	351
9.6.1	Prozesswirkungsgrad und energiespezifisches Volumen.....	352
9.6.2	Einfluss von Vorschubgeschwindigkeit und Strahleigenschaften auf die Nahtgeometrie	355
9.7	Prozessinstabilitäten.....	360
9.7.1	Spritzer und Auswürfe, Porenbildung	361
9.7.2	Schmelzebadinstabilitäten: Humping.....	367
9.8	Modifikationen des Schweißprozesses.....	370
9.8.1	Modifikation der Energieeinkopplung	371
9.8.2	Modifikation des Kräftegleichgewichts mittels elektromagnetischer Volumenkräfte	374
9.9	Laserstrahlschweißen transparenter Werkstoffe	378
9.10	Zusammenfassung von Kapitel 9	380
10	Oberflächenmodifikationen – Härten	383
10.1	Übersicht: Verfahren zur Oberflächenmodifikation	383
10.2	Martensitisches Randschichthärten	386

10.2.1	Verfahrensprinzip.....	387
10.2.2	Energieeinkopplung und Wärmeleitung	391
10.2.3	Prozessergebnisse	406
10.2.4	Temperaturgeregeltes Härten	410
10.3	Zusammenfassung von Kapitel 10.....	413
11	Additive Verfahren.....	415
11.1	Beschichten.....	415
11.1.1	Verfahrensmerkmale	416
11.1.2	Energieeinkopplung.....	424
11.1.3	Prozessergebnisse	431
11.1.4	Einfluss der Prozessparameter auf die Spurgeometrie.....	433
11.1.5	Prozessoptimierungen.....	437
11.2	Auftragsschweißen	440
11.3	Pulverbettbasiertes selektives Laserstrahlschmelzen.....	442
11.3.1	Verfahrensgrundlagen und Phänomenologie	442
11.3.2	Energieeinkopplung und Spuraufbau.....	447
11.3.3	Qualitätsbeeinflussende Effekte.....	450
11.4	Zusammenfassung von Kapitel 11	453
12	Abtragende Verfahren	455
12.1	Thermische Ablation.....	457
12.1.1	Energetische Abschätzung der erzielbaren Abtragsraten	458
12.1.2	Den Abtrag modifizierende Einflüsse.....	474
12.2	Abtragen	477
12.2.1	Musterprojektionsverfahren.....	478
12.2.2	Schreibende Verfahren.....	480
12.3	Spanendes Abtragen.....	484
12.4	Bohren	487
12.4.1	Einzelpulsbohren	488
12.4.2	Perkussionsbohren	491
12.4.3	Wendelbohren	502
12.5	Zusammenfassung von Kapitel 12.....	506
	Literatur	509
	Sachwortverzeichnis	553