

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Literatur	3
2	Das Verhalten elektromagnetischer Strahlung an Grenzflächen	5
2.1	Die Fresnel-Formeln	5
2.1.1	Fresnel-Formeln mit Absorption	8
2.1.2	Auswertung der Fresnel-Formeln. Brewster-Effekt	9
2.1.3	Totalreflektion	11
2.2	Anwendungen der Sonderfälle der Fresnel-Formeln in der Lasertechnik.....	12
2.2.1	Brewster-Effekt	12
2.2.2	Totalreflexion	12
	Literatur	12
3	Absorption von Laserstrahlung	13
3.1	Beschreibung der Phänomene.....	14
3.1.1	Verknüpfungen.....	16
3.1.2	Wellengleichung	18
3.1.3	Geometrie des Werkstücks	18
3.1.4	Randbedingungen	19
3.2	Nichtleiter	19
3.2.1	Elektronische Polarisierung	20
3.2.2	Ionische Polarisierung.....	22
3.2.3	Zusatzstoffe in Kunststoffen.....	24
3.3	Dielektrische Eigenschaften von Plasmen.....	24
3.3.1	Stoßfreies Plasma	25
3.3.2	Stoßbestimmtes Plasma	27
3.4	Absorption metallischer Werkstoffe	28
3.5	Das Drude-Modell der Absorption	30
3.6	Temperaturabhängigkeit der Absorption von Metallen	33
3.7	Einfluss des Oberflächenzustandes.....	35
	Literatur	39
4	Energietransport und Wärmeleitung	41
4.1	Energietransportgleichung	41

4.2	Wärmeleitungsmechanismen	43
4.3	Wärmeleitungsgleichung mit konstanten Koeffizienten und Methode der Green'schen Funktionen	44
4.3.1	Punktquelle	46
4.3.2	Linienquelle	48
4.3.3	Transversal unendlich ausgedehnte Oberflächenquelle ...	50
4.3.4	Transversal unendlich ausgedehnte Volumenquelle	53
4.3.5	Gauß'sche Intensitätsverteilung	54
4.3.6	Endliche Werkstückdicke	55
4.4	Temperaturabhängige thermophysikalische Konstante	56
4.5	Wärmeleitung bei kurzen Pulsdauern	57
	Literatur	58
5	Thermomechanik	59
5.1	Elastische Verformungen	59
5.1.1	Uniaxiale Belastung	60
5.1.2	Uniaxiale Verzerrung	60
5.2	Thermisch induzierte Spannungen	60
5.3	Plastische Verformung	61
5.3.1	Beispiele plastischer Verformungen	63
	Literatur	63
6	Phasenumwandlungen	65
6.1	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	65
6.1.1	Reines Eisen	65
6.1.2	Eisen-Kohlenstoff-Gemische	67
6.2	Härten von perlitischem Gefüge	70
6.2.1	Kohlenstoff-Diffusion	70
	Literatur	73
7	Schmelzbadströmung	75
7.1	Massen-, Impuls- und Energiebilanz	75
7.2	Randbedingungen	76
7.3	Ebene Potentialströmung	79
7.3.1	Quellströmung und Dipolströmung	80
7.3.2	Strömung um einen Zylinder	81
7.4	Laminare Grenzschichtströmung	83
7.4.1	Reibungsbestimmte Grenzschichtströmung	86
7.4.2	Trägheitsbestimmte Grenzschichtströmung	87
	Literatur	88
8	Laserinduziertes Verdampfen	89
8.1	Dampfdruck im thermodynamischen Gleichgewicht	89
8.2	Verdampfungsrate	91

8.3	Teilchen- und Energiebilanz beim laserinduzierten Verdampfen	95
8.4	Beschreibung des Verdampfungsprozesses als Verbrennungswelle	100
8.5	Kinetische Beschreibung des Verdampfens und der Knudsen-Schicht	104
	Literatur	107
9	Plasmaphysik	109
9.1	Debye-Radius und Definitionen	111
9.2	Einige Ergebnisse der Thermodynamik und Statistik eines Plasmas	114
9.2.1	Zustandssumme eines idealen Plasmas	115
9.2.2	Zustandsgrößen eines idealen Plasmas	118
9.2.3	Coulomb-Korrekturen	119
9.2.4	Massenwirkungsgesetz und Saha-Gleichung	122
9.3	Transporteigenschaften von Plasmen	125
9.4	Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit Plasmen	130
9.5	Nichtgleichgewichtsprozesse	136
9.6	Plasmastrahlung im LTE-Modell	139
9.6.1	Linienstrahlung	141
9.6.2	Absorption durch Übergänge zwischen zwei gebundenen Zuständen	142
9.6.3	Strahlungsleistung bei Linienstrahlung	142
9.6.4	Linienprofile	143
9.6.5	Bremsstrahlung	144
9.6.6	Rekombinationsstrahlung	145
9.6.7	Apparateinfluss	145
	Literatur	146
10	Laserstrahlquellen	147
10.1	CO ₂ -Laser	147
10.1.1	Grundlagen	147
10.1.2	Bauformen	147
10.2	Nd:YAG-Laser	149
10.2.1	Grundlagen	149
10.2.2	Bauformen	150
10.3	Diodenlaser	152
10.3.1	Grundlagen	152
10.3.2	Bauformen und Eigenschaften	155
10.4	Excimerlaser	158
10.4.1	Grundlagen	158
10.4.2	Aufbau	159
	Literatur	160

11 Oberflächentechnik	161
11.1 Umwandlungshärten	161
11.1.1 Motivation	161
11.1.2 Verfahrensbeschreibung	162
11.1.3 Physikalische Grundlagen	165
11.1.4 Anwendungsergebnisse	166
11.1.5 Industriell relevante Anwendungsbeispiele	170
11.2 Umschmelzen	175
11.2.1 Physikalische Grundlagen	175
11.2.2 Verfahrensbeschreibung	180
11.2.3 Anwendungsergebnisse	182
11.2.4 Anwendungsbeispiel	184
11.3 Laserstrahlpolieren	185
11.3.1 Motivation	185
11.3.2 Verfahrensbeschreibung	185
11.3.3 Anlagentechnik	188
11.3.4 Anwendungsbeispiele	188
11.4 Beschichten	191
11.4.1 Motivation	191
11.4.2 Verfahrensbeschreibung	191
11.4.3 Werkstofftechnik	195
11.4.4 Anwendungen	195
11.5 Legieren und Dispergieren	198
11.5.1 Motivation	198
11.5.2 Physikalische Grundlagen	199
11.5.3 Verfahrensbeschreibung	200
11.5.4 Anwendungsergebnisse	202
11.5.5 Anwendungsbeispiel	205
11.6 Pulsed Laser Deposition	205
11.6.1 Physikalische Grundlagen	207
Literatur	211
12 Umformen	213
12.1 Biegen	213
12.1.1 Einleitung	213
12.1.2 Prozessmodelle	214
12.1.3 Umformergebnisse	219
12.1.4 Anwendungen des Laserstrahlmikroumformens in Aktuatoren	219
Literatur	223

13 Rapid Prototyping, Rapid Tooling	225
13.1 Selektives Laser Sintern (SLS)	225
13.1.1 Einleitung	225
13.1.2 Selektives Laser Sintern von Kunststoffpulver	226
13.1.3 Indirektes Selektives Laser Sintern von Metallen	226
13.1.4 Direktes Selektives Laser Sintern von Metallen	227
13.1.5 Selective Laser Melting (SLM)	229
13.2 Laserstrahlgenerieren	231
13.2.1 Einführung	231
13.2.2 Eigenschaften generierter Bauteile	234
13.2.3 CAD/NC-Kopplung	236
13.2.4 Anwendungsgebiete	237
13.2.5 Instandhaltung und Reparatur	239
13.3 Stereolithographie	240
13.3.1 Verfahrensbeschreibung	240
13.4 Layer Lamine Manufacturing (LLM)	242
13.4.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)	242
13.5 Nicht lasergestützte Rapid Prototyping Verfahren	244
13.5.1 Solid Ground Curing (SGC)	244
13.5.2 Fused Deposition Modeling (FDM)	244
13.5.3 Three Dimensional Printing (3DP)	247
13.5.4 Layer Milling Process (LMP)	247
Literatur	249
14 Fügen	251
14.1 Schweißen von Metallen	251
14.1.1 Wärmeleitungsschweißen	251
14.1.2 Tiefschweißen	257
14.1.3 Laser-Hybridschweißen	262
14.2 Laserstrahlschweißen von thermoplastischen Kunststoffen	267
14.2.1 Motivation	267
14.2.2 Verfahrensgrundlagen und -beschreibung	268
14.2.3 Anwendungsergebnisse	272
14.2.4 Anwendungsbeispiele	273
14.2.5 Ausblick	275
14.3 Löten	276
14.3.1 Physikalisch-technische Grundlagen	277
14.3.2 Verfahrensbeschreibung	279
14.3.3 Anwendungsbeispiel	281
14.4 Mikroschweißen	282
14.4.1 Einführung	282
14.4.2 Verfahrenstechnik und Ergebnisse	283
Literatur	288

15 Abtragen und Bohren	291
15.1 Einzelpulsbohren	291
15.1.1 Physikalische Grundlagen	292
15.1.2 Verfahrensbeschreibung	295
15.1.3 Anwendungen	296
15.1.4 Anwendungsbeispiele	299
15.2 Perkussionsbohren	300
15.2.1 Physikalische Grundlagen	300
15.2.2 Verfahrensbeschreibung	302
15.2.3 Anwendungen	303
15.2.4 Beispiel	304
15.3 Trepanierbohren	305
15.3.1 Verfahrensbeschreibung	306
15.3.2 Anwendungen	306
15.3.3 Anwendungsbeispiele	308
15.4 Mikrostrukturieren	309
15.4.1 Einleitung	309
15.4.2 Strahlformung für die Mikrostrukturierung	309
15.4.3 Absorption der Laserstrahlung	311
15.4.4 Beispiele	313
15.5 Reinigen	314
15.5.1 Verfahrensbeschreibung	314
15.5.2 Anwendungsbeispiele	316
Literatur	319
16 Schneiden	321
16.1 Laserstrahlbrennschneiden	321
16.1.1 Einleitung	321
16.1.2 Leistungsbedarf und Leistungsangebot beim Brennschneiden	321
16.1.3 Autogenes Brennschneiden	322
16.1.4 Verfahrensprinzip	325
16.1.5 Abbrandstabilisiertes Laserstrahlbrennschneiden	328
16.2 Schmelzschneiden	330
16.2.1 Grundlagen	330
16.2.2 Verfahrensparameter	331
16.2.3 Schmelzschneiden mit Spiegeloptiken und Autonomer Düse	334
16.2.4 Anwendungsbeispiele	336
16.3 Hochgeschwindigkeitsschneiden	336
16.3.1 Grundlagen	336
16.3.2 Verfahrensbeschreibung	338
16.3.3 Bearbeitungsbeispiele	340

16.4	Sublimationsschneiden	341
16.4.1	Einleitung	341
16.4.2	Leistungsbilanz beim Laserstrahl- Sublimationsschneiden	342
16.4.3	Anwendungsbeispiele für das Sublimationsschneiden von Nichtmetallen	344
16.5	Laserstrahlfeinschneiden	345
16.5.1	Einführung und Anwendungsgebiete	345
16.5.2	Verfahrensgrundlagen	346
16.5.3	Verwendete Laserstrahlquellen	348
16.5.4	Applikationsbeispiele	349
	Literatur	352
17	Systemtechnik	353
17.1	Prozessüberwachung	353
17.1.1	Motivation	353
17.1.2	Einordnung der Verfahren	353
17.1.3	Vor- und nachlaufende Prozessüberwachung	354
17.1.4	Prozessüberwachung am Bearbeitungsort	355
17.1.5	Prozessüberwachung mit räumlich integral messenden Detektoren	360
17.1.6	Prozessüberwachung mit bildgebenden Sensoren	361
17.2	Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen zur Materialbearbeitung mit Laserstrahlung	367
17.2.1	Werkzeugmaschinen-Modelle	367
17.2.2	Komponenten des Grundmodells	370
17.2.3	Funktionserweiterungen von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen für die Materialbearbeitung mit Laserstrahlung	378
	Literatur	386
18	Lasermesstechnik	389
18.1	Lasertriangulation	389
18.1.1	Einführung	389
18.1.2	Messung geometrischer Größen	390
18.1.3	Scheimpflug-Bedingung und Kennlinie eines Triangulationssensors	391
18.1.4	Anwendungsbeispiele	394
18.1.5	Wirtschaftliche Bedeutung	399
18.2	Interferometrie	399
18.2.1	Michelson-Interferometer	402
18.2.2	Mach-Zehnder-Interferometer	404
18.2.3	Fizeau-Interferometer	405
18.2.4	Speckle-Interferometrie	406

18.2.5	Weißlicht-Interferometer	408
18.3	Laserinduzierte Fluoreszenz	411
18.3.1	Grundlagen der Fluoreszenz	411
18.3.2	Fluoreszenzmarker in den Biowissenschaften	415
18.3.3	Wirtschaftliche Bedeutung der laserinduzierten Fluoreszenz	419
18.4	Konfokale Mikroskopie	420
18.4.1	Motivation	420
18.4.2	Grundlagen	421
18.4.3	Auflösungsvermögen	422
18.4.4	Anwendungsbeispiele	423
18.4.5	Konfokale 2-Photonenmikroskopie	424
18.5	Abtastsysteme für optische Speichermedien	424
18.5.1	Motivation	424
18.5.2	Physikalische Grundlagen	425
18.5.3	Technische Realisierungen des Abtastsystems (Pick-Up)	426
18.5.4	Weiterentwicklung der DVD	428
18.6	Laser-Emissionsspektrometrie	429
18.6.1	Motivation und Zielsetzung des Verfahrens	429
18.6.2	Grundlagen	430
18.6.3	Verfahrensbeschreibung	434
18.6.4	Zeitaufgelöste Spektroskopie	436
18.6.5	Datenauswertung	437
18.6.6	Messbereich	439
18.6.7	Anwendungsbeispiele	440
	Literatur	442
A	Ergänzungen: Optik	447
A.1	Herleitung der Fresnel-Formeln	447
A.2	Dielektrische Eigenschaften von Plasmen	449
A.3	Beschreibung elektromagnetischer Felder durch komplexe Größen	452
	Literatur	453
B	Ergänzungen: Kontinuumsmechanik	455
B.1	Koordinatensysteme und Deformationsgradient	455
B.2	Deformation	457
B.2.1	Physikalische Bedeutung der Komponenten des Green'schen Verzerrungstensors	458
B.3	Ableitungen nach der Zeit	459
B.4	Reynolds'sches Transporttheorem	460
B.5	Massenbilanz	462

B.6	Impulsbilanz	463
B.7	Materialgleichungen	464
B.7.1	Elastische Festkörper	465
B.7.2	Newton'sche Fluide	466
B.8	Energiegleichung	467
B.9	Zusammenstellung einiger wichtiger mathematischer Formeln für die Berechnung des Energietransports	470
B.9.1	Integration über den Raum	471
B.9.2	Integration über die Zeit	473
B.9.3	Errorfunktionen	474
B.9.4	Exponentialintegral	475
B.10	Diffusion in Metallen	475
	Literatur	477
C	Ergänzungen: Laserinduziertes Verdampfen	479
C.1	Gleichung von Clausius-Clapeyron	479
C.2	Temperaturabhängigkeit der Verdampfungsenthalpie	480
C.3	Geschwindigkeitsmomente	481
	Literatur	482
D	Ergänzungen: Plasmaphysik	483
D.1	Einige Ergebnisse der Thermodynamik	483
D.2	Verallgemeinerungen bei mehrfach geladenen Ionen	485
	Literatur	486
E	Bedeutung der verwendeten Symbole und Konstanten	487
E.1	Verwendete Formelzeichen	489
E.2	Konstanten	497
E.3	Kennzahlen	498
E.4	Referenzzustand	498
E.5	Materialkonstanten 1	499
E.6	Materialkonstanten 2	500
	Literatur	502
F	Farbbildteil	503
	Sachverzeichnis	521

Lasertechnik für die Fertigung
Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den
innovativen Ingenieur

Poprawe, R.

2005, XVIII, 526 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-21406-9