

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
	Literatur .....	3
<b>2</b>	<b>Das Verhalten elektromagnetischer Strahlung an Grenzflächen</b>	<b>5</b>
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
<b>3</b>	<b>Absorption von Laserstrahlung</b>	<b>13</b>
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
<b>4</b>	<b>Energietransport und Wärmeleitung</b>	<b>41</b>
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
<b>5</b>	<b>Thermomechanik</b> . . . . .	<b>59</b>
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
<b>6</b>	<b>Phasenumwandlungen</b> . . . . .	<b>65</b>
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
<b>7</b>	<b>Schmelzbadströmung</b> . . . . .	<b>75</b>
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
<b>8</b>	<b>Laserinduziertes Verdampfen</b> . . . . .	<b>89</b>
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
<b>9</b>	<b>Plasmaphysik</b>	<b>109</b>
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
<b>10</b>	<b>Laserstrahlquellen</b>	<b>147</b>
10.1	CO <sub>2</sub> -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

<b>11 Oberflächentechnik</b>	<b>161</b>
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
<b>12 Umformen</b>	<b>213</b>
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

<b>13 Rapid Prototyping, Rapid Tooling</b>	<b>225</b>
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
<b>14 Fügen</b>	<b>251</b>
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

<b>15 Abtragen und Bohren</b>	<b>291</b>
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
<b>16 Schneiden</b>	<b>321</b>
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
<b>17</b>	<b>Systemtechnik</b>	<b>353</b>
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
<b>18</b>	<b>Lasermesstechnik</b>	<b>389</b>
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
<b>A</b>	<b>Ergänzungen: Optik</b>	<b>447</b>
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>B</b>	<b>Ergänzungen: Kontinuumsmechanik</b>	<b>455</b>
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
<b>C</b>	<b>Ergänzungen: Laserinduziertes Verdampfen</b>	<b>479</b>
C.1	Gleichung von Clausius-Clapeyron .....	479
C.2	Temperaturabhängigkeit der Verdampfungsenthalpie .....	480
C.3	Geschwindigkeitsmomente .....	481
	Literatur .....	482
<b>D</b>	<b>Ergänzungen: Plasmaphysik</b>	<b>483</b>
D.1	Einige Ergebnisse der Thermodynamik .....	483
D.2	Verallgemeinerungen bei mehrfach geladenen Ionen .....	485
	Literatur .....	486
<b>E</b>	<b>Bedeutung der verwendeten Symbole und Konstanten</b>	<b>487</b>
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
<b>F</b>	<b>Farbbildteil</b>	<b>503</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>521</b>