

# Inhalt

<b>Vorwort.....</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>Laserstrahlungsquellen .....</b>	<b>46</b>
<b>Inhalt.. .....</b>	<b>7.</b>	<b>3.1</b>	<i>Gaslaser.....</i>	<i>46</i>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>13</b>	3.1.1	CO <sub>2</sub> -Laser.....	46
<b>2 Grundlagen der Lasertechnik.....</b>	<b>19</b>	3.1.1.1	Geströmte Systeme.....	48
2.1 <i>Licht als elektromagnetische Welle .....</i>	<i>19</i>	3.1.1.2	Quasistationäre Systeme.....	50
2.2 <i>Emission und Absorption.....</i>	<i>21</i>	3.1.1.3	Stationäre Systeme (Sealed-Off). 51	
2.3 <i>Grundanordnung eines Lasers.....</i>	<i>23</i>	3.1.2	Excimerlaser.....	53
2.3.1 Erzeugung einer Besetzungs- inversion .....	25	3.2	<i>Halbleiterlaser .....</i>	<i>56</i>
2.3.2 Linienbreite und Linienform .....	27	3.3	<i>Festkörperlaser .....</i>	<i>61</i>
2.3.3 Strahlungsverstärkung.....	28	3.3.1	Stablaser .....	63
2.4 <i>Optische Resonatoren .....</i>	<i>29</i>	3.3.2	Slablaser.....	66
2.4.1 Grundformen.....	30	3.3.3	Scheibenlaser .....	67
2.4.1.1 Stabiler Resonator .....	31	3.3.4	Faserlaser.....	69
2.4.1.2 Instabiler Resonator.....	32	3.3.5	Oszillator-Verstärker- Anordnungen .....	73
2.4.2 Resonatoranforderungen.....	32	3.3.6	Kurzpuls laser .....	75
2.4.3 Eigenschwingungen des Resonators (Moden) .....	33	<b>4</b>	<b>Laserstrahleigenschaften und -parameter.....</b>	<b>80</b>
2.4.3.1 Transversale Moden.....	33	4.1	<i>Wellenlänge und Bandbreite.....</i>	<i>81</i>
2.4.3.2 Axiale Moden .....	35	4.2	<i>Laserleistung, Energie und Impulsparameter .....</i>	<i>84</i>
2.4.4 Die Güte des Resonators.....	36	4.3	<i>Polarisation .....</i>	<i>93</i>
2.4.5 Zeitliche und räumliche Kohärenz.....	37	4.4	<i>Strahlausbreitung und -geometrie.....</i>	<i>95</i>
2.4.6 Kopplung von Eigenschwin- gungen (Modenkopplung).....	38	4.5	<i>Intensität und Intensitätsverteilung.....</i>	<i>96</i>
2.5 <i>Betriebsarten des Lasers.....</i>	<i>39</i>	4.6	<i>Fokussieren von Laserstrahlung.....</i>	<i>97</i>
2.5.1 Kontinuierlicher Betrieb.....	39	4.7	<i>Strahlqualität .....</i>	<i>100</i>
2.5.2 Impulsbetrieb .....	40	4.8	<i>Laserstrahlstabilität.....</i>	<i>108</i>
2.5.2.1 Elektrische Anregung.....	40	<b>5</b>	<b>Wechselwirkungsprozesse .....</b>	<b>110</b>
2.5.2.2 Güteschaltung .....	40	5.1	<i>Reflexion, Absorption, Transmission .....</i>	<i>112</i>
2.5.2.3 Methoden der Modenkopplung..	43	5.2	<i>Thermische Wechselwirkungsvorgänge.....</i>	<i>121</i>
2.5.2.4 Pulskompressionen .....	44	5.2.1	Wärmeeinflusszone.....	121
2.5.2.5 Frequenzvervielfachte Lasersysteme.....	44	5.2.2	Wärmeleitungsvorgänge .....	122
		5.2.3	Wärmeleitungsgleichungen.....	123
		5.2.4	Temperaturmessung .....	125
		5.3	<i>Athermische Wechselwirkungsvorgänge ....</i>	<i>128</i>

5.4	<i>Wechselwirkungsprozess - Energieeinkopplung</i> .....	129	7	<b>Verfahren der Lasermaterial- bearbeitung</b> .....	<b>173</b>
5.4.1	Schmelzbaddynamik.....	131	7.1	<i>Abtragen und Strukturieren</i> .....	173
5.4.2	Laserinduziertes Plasma.....	133	7.1.1	Grundverfahren des Abtragens.....	173
5.4.3	Abtragsmodelle.....	133	7.1.2	Ausgewählte Verfahren des Abtragens und Strukturierens.	179
5.4.4	Geometrieausbildung infolge der Wechselwirkung.....	136	7.1.2.1	Laserstrahlentschichten .....	180
5.4.4.1	Ausbilden eines Bohrloches.....	136	7.1.2.2	Laserstrahlflächenabtragen .....	184
5.4.4.2	Ausbilden einer Dampf- kapillare (Keyhole).....	137	7.1.2.3	Laserstrahlformabtragen.....	187
5.4.4.3	Ausbilden eines Schneidspaltes .....	138	7.1.2.4	Laserstrahl- sublimationsabtragen .....	188
6	<b>Lasermaterialbearbeitungsanlagen</b> .....	<b>140</b>	7.2	<i>Laserstrahlbohren</i> .....	<b>191</b>
6.1	<i>Grundaufbau von Lasermaterial- bearbeitungsanlagen</i> .....	140	7.2.1	Grundlagen des Laser- strahlbohrens .....	192
6.2	<i>Strahlführung und Strahlformung</i> .....	141	7.2.2	Bohrverfahren.....	194
6.2.1	Optische Komponenten.....	141	7.2.3	Einflussgrößen auf den Bohrprozess.....	197
6.2.1.1	Planparallele Platten.....	142	7.2.4	Anwendungen .....	200
6.2.1.2	Linsen .....	143	7.3	<i>Beschriften</i> .....	<b>208</b>
6.2.1.3	Spiegel.....	145	7.3.1	Verfahrensgrundlagen.....	208
6.2.1.4	Diffraktive Elemente .....	146	7.3.2	Beschriftungsverfahren.....	211
6.2.1.5	Optische Fasern .....	147	7.3.3	Beschriftungsanlagen .....	215
6.2.1.6	Sonderformen .....	148	7.3.4	Lasertypen und Leistungsklassen .....	218
6.2.2	Opto-mechanische Komponenten .....	149	7.3.5	Beschriftungsparameter .....	219
6.2.3	Anordnungen zur Strahlführung.....	151	7.3.6	Ausgewählte Beschriftungsmethoden und Applikationsbeispiele .....	223
6.2.3.1	Grundanordnungen.....	151	7.3.6.1	Anlassbeschriften.....	223
6.2.3.2	Strahlteilung.....	153	7.3.6.2	Farbumschlag von Kunststoffen .....	225
6.2.4	Anordnungen zur Strahlformung.....	154	7.3.6.3	Abtragen von Oberflächenschichten .....	228
6.2.4.1	Strahlaufweitung .....	154	7.3.6.4	Gravur.....	230
6.2.4.2	Strahlfokussierung.....	156	7.4	<i>Laserstrahlschneiden</i> .....	<b>232</b>
6.2.4.3	Formung der Intensitätsverteilung.....	159	7.4.1	Verfahrensgrundlagen.....	233
6.2.4.4	Strahlüberlagerung .....	161	7.4.2	Schneidverfahren .....	236
6.3	<i>Bearbeitungseinrichtung</i> .....	<b>163</b>	7.4.2.1	Sublimationsschneiden .....	236
6.3.1	Grundanordnungen.....	163	7.4.2.2	Schmelzschnitten.....	239
6.3.2	Bewegungseinheiten .....	165	7.4.2.3	Brennschnitten .....	243
6.3.2.1	Eindimensionale Bearbeitung .....	165	7.4.2.4	Spezielle Schneidverfahren .....	247
6.3.2.2	Zweidimensionale Bearbeitung .....	166	7.4.2.4.1	Hochgeschwindigkeits- schneiden .....	247
6.3.2.3	Dreidimensionale Bearbeitung .....	167	7.4.2.4.2	Präzisionsschneiden .....	249
6.4	<i>Gesamtsystemlösungen</i> .....	<b>170</b>	7.4.2.4.3	Schneiden mit Scansystemen (Remoteschneiden) .....	253

7.4.2.4.4	Wasserstrahlunterstütztes Schneiden .....	256	7.5.6	Ausgewählte Anwendungen .....	309
7.4.3	Schneidsysteme .....	258	7.5.7	Schweißnahtqualitäten und -kontrolle.....	311
7.4.3.1	Laserstrahlungsquellen und -komponenten .....	258	7.6	<i>Löten.....</i>	312
7.4.3.2	Schneidanlagen.....	261	7.6.1	Grundlagen des Lötens.....	313
7.4.3.3	NC-Programmerstellung.....	262	7.6.2	Verfahren des Laserstrahllöten .....	314
7.4.4	Schneidstrategien.....	263	7.6.2.1	Weichlöten .....	315
7.4.5	Schnittkantendarstellung und -bewertung.....	268	7.6.2.2	Hartlöten .....	318
7.4.6	Fehlergrößen und -ursachen ....	270	7.6.2.3	Hochtemperaturlöten .....	324
7.5	<i>Schweißen.....</i>	273	7.7	<i>Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung.....</i>	327
7.5.1	Schweißtechnische Grundlagen.....	274	7.7.1	Laserstrahlhärten .....	328
7.5.2	Grundlegende Schweißverfahren.....	276	7.7.2	Umschmelzen und Glasieren....	332
7.5.2.1	Wärmeleitungsschweißen.....	277	7.7.3	Legieren, Beschichten, Dispergieren .....	334
7.5.2.2	Tiefschweißen .....	278	7.7.4	Spezielle Verfahren des Funktionalisierens von Bauteiloberflächen .....	338
7.5.3	Einflussgrößen der Schweißverfahren.....	280	7.7.5	Thermochemische Laserstrahlbehandlung von SiC-Oberflächen.....	340
7.5.3.1	Absorption der Laser- strahlung, Intensität und Einschweißtiefe.....	280	7.8	<i>Lasergestützte generative Fertigungsverfahren.....</i>	342
7.5.3.2	Nahtform und -qualität.....	282	7.8.1	Verfahrensgrundlagen.....	344
7.5.3.3	Prozessgase .....	284	7.8.2	Laserstrahlungsquellen.....	346
7.5.4	Ausgewählte Verfahren .....	289	7.8.3	Verfahren .....	347
7.5.4.1	Schweißen mit hoher Brillanz..	289	7.8.3.1	Generieren aus der flüssigen Phase .....	347
7.5.4.2	Feinschweißen/ Mikrobearbeitung.....	291	7.8.3.2	Generieren aus der pulverförmigen Phase .....	353
7.5.4.3	Schweißen beschichteter Werkstoffe.....	295	7.8.3.2.1	Direktes Selektives Lasersintern .....	355
7.5.4.4	Schweißen artfremder Materialien .....	296	7.8.3.2.2	Indirektes Lasersintern .....	364
7.5.4.5	Schweißen mit Zusatzwerkstoffen .....	296	7.8.3.3	Selektives Laserschmelzen.....	367
7.5.4.5.1	Schweißen mit Zusatzdraht ....	297	7.8.3.4	LaserCUSING / Concept Modelling .....	370
7.5.4.5.2	Schweißen mit Pulver .....	298	7.8.3.5	Layer Laminate Manufacturing .....	373
7.5.4.5.3	Automatisiertes Laserauftragsschweißen .....	300	8	<b>Bearbeitung von Glaswerkstoffen.....</b>	380
7.5.4.5.4	Handgeführtes und teilautomatisiertes Laserstrahlschweißen .....	301	8.1	<i>Grundlagen.....</i>	380
7.5.4.5.5	Mikropulverauftrags- schweißen (Micro-Cladding) ....	304	8.1.1	Werkstoffeigenschaften .....	380
7.5.4.6	Hybridschweißen.....	305	8.1.1.1	Transmission, Absorption und Reflexion .....	382
7.5.5	Ausgewählte Lasersysteme für das Schweißen .....	306	8.1.1.2	Ausdehnungskoeffizient.....	383
			8.1.1.3	Viskosität .....	383

8.1.1.4	Wärmeleitfähigkeit und Temperatur- wechselbeständigkeit.....	384	9.2	<i>Laserstrahlschweißen von Kunststoffen.....</i>	<i>450</i>
8.1.1.5	Festigkeit.....	385	9.2.1	Verfahrensprinzip .....	450
8.1.1.6	Spannungszustände.....	385	9.2.2	Materialeignung und Auswahl der Farbstoffe und Pigmente .....	452
8.1.2	Verfahren und ausgewählte Wechselwirkungsprozesse.....	386	9.2.3	Schweißtechnologien .....	454
8.2	<i>Abtragen und Strukturieren .....</i>	<i>388</i>	9.2.4	Laserstrahlungsquellen und Systeme .....	457
8.2.1	Direktes Abtragen .....	388	9.2.5	Prozesskontrolle .....	458
8.2.2	Indirektes Abtragen .....	396	9.2.6	Ausgewählte Prüfverfahren .....	460
8.3	<i>Bohren.....</i>	<i>398</i>	9.2.7	Anwendungsbeispiele.....	461
8.4	<i>Schneiden.....</i>	<i>401</i>	9.3	<i>Laserstrahltrennen .....</i>	<i>464</i>
8.5	<i>Absprengen und Separieren.....</i>	<i>405</i>	9.3.1	Grundlagen.....	464
8.5.1	Spannungsinduziertes Separieren von Flachgläsern .....	405	9.3.2	Laserstrahlungsquellen und Systeme .....	465
8.5.2	Absprengen und Separieren rotations- symmetrischer Gläser.....	410	9.3.3	Ausgewählte Anwendungen .....	466
8.6	<i>Beschriften.....</i>	<i>415</i>	9.3.4	Trennen von Verbundwerkstoffen.....	469
8.6.1	Direkte Laserkenn- zeichnung .....	415	9.3.5	Schadstoffemissionen .....	475
8.6.2	Indirektes Laserstrahl- beschriften .....	417	9.4	<i>Beschriften.....</i>	<i>476</i>
8.7	<i>Laserstrahlpolieren.....</i>	<i>418</i>	9.5	<i>Abtragen und Strukturieren.....</i>	<i>480</i>
8.8	<i>Fügen.....</i>	<i>424</i>	10	<b>Lasersicherheit .....</b>	<b>488</b>
8.8.1	Schweißen von Glaswerkstoffen .....	424	10.1	<i>Laserklassen und Gefährdungspotenzial... </i>	<i>489</i>
8.8.1.1	Schweißen mit angepassten Strahlparametern .....	425	10.2	<i>Schutzmaßnahmen.....</i>	<i>489</i>
8.8.1.2	Bearbeiten mit mehreren Arbeitsstrahlen .....	427	10.2.1	Technische und bauliche Schutzmaßnahmen.....	489
8.8.1.3	Hybrides Laserstrahl- schweißen .....	430	10.2.2	Persönliche Schutzmaßnahmen.....	490
8.8.2	Löten .....	432	10.2.2.1	Schutz der Augen .....	490
8.9	<i>Umformen.....</i>	<i>437</i>	10.2.2.2	Schutz der Haut .....	492
9	<b>Bearbeitung von Kunst- und Verbundwerkstoffen .....</b>	<b>445</b>	10.2.3	Organisatorische Maßnahmen.....	492
9.1	<i>Grundlagen.....</i>	<i>445</i>	10.3	<i>Normen und Richtlinien .....</i>	<i>493</i>
			10.4	<i>Ausgewählte Laserschutzkomponenten.....</i>	<i>494</i>
				<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>496</b>
				<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>516</b>