

# 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</b>	<b>Einleitung.....</b>	3.1.1	CO <sub>2</sub> -Laser.....	46
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Lasertechnik.....</b>	3.1.1.1	Geströimte Systeme.....	48
2.1	<i>Licht als elektromagnetische Welle .....</i>	3.1.1.2	Quasistationäre Systeme .....	50
2.2	<i>Emission und Absorption.....</i>	3.1.1.3	Stationäre Systeme (Sealed-Off) .	51
2.3	<i>Grundanordnung eines Lasers.....</i>	3.1.2	Excimerlaser.....	53
2.3.1	Erzeugung einer Besetzungs- inversion .....	3.2	<i>Halbleiterlaser .....</i>	<i>56</i>
2.3.2	Linienbreite und Linienform .....	3.3	<i>Festkörperlaser .....</i>	<i>61</i>
2.3.3	Strahlungsverstärkung.....	3.3.1	Stablaser .....	63
2.4	<i>Optische Resonatoren .....</i>	3.3.2	Slablaser.....	66
2.4.1	Grundformen.....	3.3.3	Scheibenlaser.....	67
2.4.1.1	Stabiler Resonator .....	3.3.4	Faserlaser.....	69
2.4.1.2	Instabiler Resonator.....	3.3.5	Oszillator-Verstärker- Anordnungen .....	73
2.4.2	Resonatoranforderungen.....	3.3.6	Kurzpulslaser.....	75
2.4.3	Eigenschwingungen des Resonators (Moden) .....	<b>4</b>	<b>Laserstrahleigenschaften und -parameter.....</b>	<b>80</b>
2.4.3.1	Transversale Moden.....	4.1	<i>Wellenlänge und Bandbreite .....</i>	<i>81</i>
2.4.3.2	Axiale Moden .....	4.2	<i>Laserleistung, Energie und Impulsparameter .....</i>	<i>84</i>
2.4.4	Die Güte des Resonators.....	4.3	<i>Polarisation .....</i>	<i>93</i>
2.4.5	Zeitliche und räumliche Kohärenz.....	4.4	<i>Strahlausbreitung und -geometrie.....</i>	<i>95</i>
2.4.6	Kopplung von Eigenschwin- gungen (Modenkopplung).....	4.5	<i>Intensität und Intensitätsverteilung.....</i>	<i>96</i>
2.5	<i>Betriebsarten des Lasers.....</i>	4.6	<i>Fokussieren von Laserstrahlung.....</i>	<i>97</i>
2.5.1	Kontinuierlicher Betrieb.....	4.7	<i>Strahlqualität .....</i>	<i>100</i>
2.5.2	Impulsbetrieb.....	4.8	<i>Laserstrahlstabilität.....</i>	<i>108</i>
2.5.2.1	Elektrische Anregung .....	<b>5</b>	<b>Wechselwirkungsprozesse .....</b>	<b>110</b>
2.5.2.2	Güteschaltung .....	5.1	<i>Reflexion, Absorption, Transmission .....</i>	<i>112</i>
2.5.2.3	Methoden der Modenkopplung..	5.2	<i>Thermische Wechselwirkungsvorgänge.....</i>	<i>121</i>
2.5.2.4	Pulskompressionen .....	5.2.1	Wärmeeinflusszone.....	121
2.5.2.5	Frequenzvervielfachte Lasersysteme .....	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			
5.4.1	Schmelzbaddynamik.....	131			
5.4.2	Laserinduziertes Plasma.....	133			
5.4.3	Abtragsmodelle.....	133			
5.4.4	Geometrieausbildung infolge der Wechselwirkung.....	136			
5.4.4.1	Ausbilden eines Bohrloches.....	136			
5.4.4.2	Ausbilden einer Dampf- kapillare (Keyhole).....	137			
5.4.4.3	Ausbilden eines Schneidspaltes.....	138			
<b>6</b>	<b>Lasermaterialbearbeitungsanlagen.....</b>	<b>140</b>			
6.1	<i>Grundaufbau von Lasermaterial- bearbeitungsanlagen.....</i>	<i>140</i>			
6.2	<i>Strahlführung und Strahlformung.....</i>	<i>141</i>			
6.2.1	Optische Komponenten.....	141			
6.2.1.1	Planparallele Platten.....	142			
6.2.1.2	Linsen.....	143			
6.2.1.3	Spiegel.....	145			
6.2.1.4	Diffraktive Elemente.....	146			
6.2.1.5	Optische Fasern.....	147			
6.2.1.6	Sonderformen.....	148			
6.2.2	Opto-mechanische Komponenten.....	149			
6.2.3	Anordnungen zur Strahlführung.....	151			
6.2.3.1	Grundanordnungen.....	151			
6.2.3.2	Strahlteilung.....	153			
6.2.4	Anordnungen zur Strahlformung.....	154			
6.2.4.1	Strahlaufweitung.....	154			
6.2.4.2	Strahlfokussierung.....	156			
6.2.4.3	Formung der Intensitätsverteilung.....	159			
6.2.4.4	Strahlüberlagerung.....	161			
6.3	<i>Bearbeitungseinrichtung.....</i>	<i>163</i>			
6.3.1	Grundanordnungen.....	163			
6.3.2	Bewegungseinheiten.....	165			
6.3.2.1	Eindimensionale Bearbeitung.....	165			
6.3.2.2	Zweidimensionale Bearbeitung.....	166			
6.3.2.3	Dreidimensionale Bearbeitung.....	167			
6.4	<i>Gesamtsystemlösungen.....</i>	<i>170</i>			
<b>7</b>	<b>Verfahren der Lasermaterial- bearbeitung.....</b>	<b>173</b>			
7.1	<i>Abtragen und Strukturieren.....</i>	<i>173</i>			
7.1.1	Grundverfahren des Abtragens.....	173			
7.1.2	Ausgewählte Verfahren des Abtragens und Strukturierens.....	179			
7.1.2.1	Laserstrahlenschichten.....	180			
7.1.2.2	Laserstrahlflächenabtragen.....	184			
7.1.2.3	Laserstrahlformabtragen.....	187			
7.1.2.4	Laserstrahl- sublimationsabtragen.....	188			
7.2	<i>Laserstrahlbohren.....</i>	<i>191</i>			
7.2.1	Grundlagen des Laser- strahlbohrens.....	192			
7.2.2	Bohrverfahren.....	194			
7.2.3	Einflussgrößen auf den Bohrprozess.....	197			
7.2.4	Anwendungen.....	200			
7.3	<i>Beschriften.....</i>	<i>208</i>			
7.3.1	Verfahrensgrundlagen.....	208			
7.3.2	Beschriftungsverfahren.....	211			
7.3.3	Beschriftungsanlagen.....	215			
7.3.4	Lasertypen und Leistungsklassen.....	218			
7.3.5	Beschriftungsparameter.....	219			
7.3.6	Ausgewählte Beschriftungsmethoden und Applikationsbeispiele.....	223			
7.3.6.1	Anlassbeschriften.....	223			
7.3.6.2	Farbumschlag von Kunststoffen.....	225			
7.3.6.3	Abtragen von Oberflächenschichten.....	228			
7.3.6.4	Gravur.....	230			
7.4	<i>Laserstrahlschneiden.....</i>	<i>232</i>			
7.4.1	Verfahrensgrundlagen.....	233			
7.4.2	Schneidverfahren.....	236			
7.4.2.1	Sublimationsschneiden.....	236			
7.4.2.2	Schmelzschneiden.....	239			
7.4.2.3	Brennschneiden.....	243			
7.4.2.4	Spezielle Schneidverfahren.....	247			
7.4.2.4.1	Hochgeschwindigkeits- schneiden.....	247			
7.4.2.4.2	Präzisionsschneiden.....	249			
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	<b>8</b>	<b>Bearbeitung von Glaswerkstoffen .....</b>	<b>380</b>
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 Temperaturwechselbeständigkeit.....	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 Laserkennzeichnung .....	415	9.3.5	Schadstoffemissionen .....	475
8.6.2	Indirektes Laserstrahlbeschriften.....	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>	<b>10</b>	<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 Laserstrahlschweißen .....	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
<b>9</b>	<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>