



Inhaltsverzeichnis

Jens Bliedtner, Hartmut Müller, Andrea Barz

Lasermaterialbearbeitung

Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele

ISBN (Buch): 978-3-446-42168-4

ISBN (E-Book): 978-3-446-42929-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-42168-4>

sowie im Buchhandel.

Inhalt

| | | | | |
|--|-----------|------------|---|------------|
| Vorwort | 5 | 3 | Laserstrahlungsquellen | 46 |
| Inhalt | 7 | 3.1 | <i>Gaslaser</i> | 46 |
| 1 Einleitung | 13 | 3.1.1 | CO ₂ -Laser..... | 46 |
| 2 Grundlagen der Lasertechnik | 19 | 3.1.1.1 | Geströimte Systeme..... | 48 |
| 2.1 <i>Licht als elektromagnetische Welle</i> | 19 | 3.1.1.2 | Quasistationäre Systeme | 50 |
| 2.2 <i>Emission und Absorption</i> | 21 | 3.1.1.3 | Stationäre Systeme (Sealed-Off)..... | 51 |
| 2.3 <i>Grundanordnung eines Lasers</i> | 23 | 3.1.2 | Excimerlaser..... | 53 |
| 2.3.1 Erzeugung einer Besetzungs- inversion | 25 | 3.2 | <i>Halbleiterlaser</i> | 56 |
| 2.3.2 Linienbreite und Linienform | 27 | 3.3 | <i>Festkörperlaser</i> | 61 |
| 2.3.3 Strahlungsverstärkung..... | 28 | 3.3.1 | Stablaser | 63 |
| 2.4 <i>Optische Resonatoren</i> | 29 | 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 | 4 | Laserstrahleigenschaften und -parameter | 80 |
| 2.4.3.1 Transversale Moden..... | 33 | 4.1 | <i>Wellenlänge und Bandbreite</i> | 81 |
| 2.4.3.2 Axiale Moden | 35 | 4.2 | <i>Laserleistung, Energie und Impulsparameter</i> | 84 |
| 2.4.4 Die Güte des Resonators..... | 36 | 4.3 | <i>Polarisation</i> | 93 |
| 2.4.5 Zeitliche und räumliche Kohärenz | 37 | 4.4 | <i>Strahlausbreitung und -geometrie</i> | 95 |
| 2.4.6 Kopplung von Eigenschwin- gungen (Modenkopplung)..... | 38 | 4.5 | <i>Intensität und Intensitätsverteilung</i> | 96 |
| 2.5 <i>Betriebsarten des Lasers</i> | 39 | 4.6 | <i>Fokussieren von Laserstrahlung</i> | 97 |
| 2.5.1 Kontinuierlicher Betrieb..... | 39 | 4.7 | <i>Strahlqualität</i> | 100 |
| 2.5.2 Impulsbetrieb..... | 40 | 4.8 | <i>Laserstrahlstabilität</i> | 108 |
| 2.5.2.1 Elektrische Anregung..... | 40 | 5 | Wechselwirkungsprozesse | 110 |
| 2.5.2.2 Güteschaltung | 40 | 5.1 | <i>Reflexion, Absorption, Transmission</i> | 112 |
| 2.5.2.3 Methoden der Modenkopplung.. | 43 | 5.2 | <i>Thermische Wechselwirkungsvorgänge</i> | 121 |
| 2.5.2.4 Pulscompressionen | 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> | 128 |

| | | | | | |
|-----------|--|------------|--|--|--|
| 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 | | | |
| 6 | Lasermaterialbearbeitungsanlagen..... | 140 | | | |
| 6.1 | <i>Grundaufbau von Lasermaterial- bearbeitungsanlagen.....</i> | 140 | | | |
| 6.2 | <i>Strahlführung und Strahlformung.....</i> | 141 | | | |
| 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> | 163 | | | |
| 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> | 170 | | | |
| 7 | Verfahren der Lasermaterial- bearbeitung..... | 173 | | | |
| 7.1 | <i>Abtragen und Strukturieren.....</i> | 173 | | | |
| 7.1.1 | Grundverfahren des Abtragens..... | 173 | | | |
| 7.1.2 | Ausgewählte Verfahren des Abtragens und Strukturierens..... | 179 | | | |
| 7.1.2.1 | Laserstrahlentschichten..... | 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> | 191 | | | |
| 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> | 208 | | | |
| 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> | 232 | | | |
| 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 Laserstrahl-lötens | 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 Laminare Manufacturing | 373 |
| 7.5.4.5.3 | Automatisiertes Laserauftragschweißen | 300 | 8 | Bearbeitung von Glaswerkstoffen..... | 380 |
| 7.5.4.5.4 | Handgeführtes und teilautomatisiertes Laserstrahlchweißen | 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> | 10 | Lasersicherheit | 488 |
| 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 |
| 9 | Bearbeitung von Kunst- und Verbundwerkstoffen..... | 445 | 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> |
| | | | | Literaturverzeichnis..... | 496 |
| | | | | Sachwortverzeichnis | 516 |