

Inhalt

1	Die wichtigsten Ergebnisse in Kürze	1
1.1	Für den eiligen Leser	1
1.2	Komponenten, Maschinenkonzepte und Systemaspekte	1
1.2.1	Komponenten	2
1.2.2	Maschinenkonzepte	2
1.2.3	Systemaspekte	3
1.3	Werkstofftechnische Gesichtspunkte	3
1.3.1	Randschichthärten von Stählen	3
1.3.2	Randschichthärten von Gußeisen ohne Zusatzwerkstoff	4
1.3.3	Randschichthärten von Aluminiumwerkstoffen ohne Zusatzwerkstoff	4
1.3.4	Randschichtschmelzen mit Zusatzwerkstoff	5
1.3.4.1	Eisenwerkstoffe	5
1.3.4.2	Aluminiumwerkstoffe	6
1.3.4.3	Kupferwerkstoffe	6
1.3.4.4	Titanwerkstoffe	6
1.4	Wirtschaftlichkeit	6
2	Einführung in die Thematik des Handbuches	7
2.1	Einleitung	7
2.2	Lasermaterialbearbeitung mit Festkörperlasern	9
2.3	Einordnung der Oberflächenbearbeitung mit Festkörperlasern in die Systematik bestehender Oberflächenbearbeitungsverfahren	10
2.4	Präzisionsbearbeitung von Oberflächen mit Festkörperlasern	13
2.5	Zielsetzung des Verbundprojektes	14
2.6	Hinweise zum Gebrauch des Handbuches	14
3	Grundlagen der Materialbearbeitung mit dem Festkörperlaser	17
3.1	Physikalische Grundlagen	18
3.1.1	Grundlagen des Festkörperlasers	18
3.1.1.1	Laserprinzip des Nd:YAG-Lasers	18
3.1.1.2	Aufbau des Nd:YAG-Lasers	19
3.1.1.3	Zukünftige Entwicklungen	23

3.1.2	Betriebsarten, Strahldiagnose und charakteristische Strahlkenngrößen	26
3.1.2.1	Betriebsarten	26
3.1.2.1.1	cw-Betrieb	26
3.1.2.1.2	Pulsbetrieb	26
3.1.2.2	Strahldiagnose und -analyse	27
3.1.2.2.1	Bedeutung der Strahluntersuchungen	27
3.1.2.2.2	Methoden zur Strahldiagnostik	27
3.1.2.2.3	Leistungsdichteverteilung, Strahlgeometrie	28
3.1.2.2.4	Leistung	31
3.1.2.2.5	Strahllage	32
3.1.2.2.6	Polarisation	32
3.1.2.3	Charakteristische Strahlkenngrößen	32
3.1.2.3.1	Zeitliche Strahlcharakteristik	33
3.1.2.3.2	Räumliche Strahlcharakteristik	34
3.1.2.3.3	Fokussierung des Laserstrahls	35
3.1.3	Strahlführung und -formung	39
3.1.3.1	Grundlagen der Laserstrahlbeeinflussung	39
3.1.3.2	Strahlführung	40
3.1.3.2.1	Direkt, ohne optische Elemente	40
3.1.3.2.2	Reflektiv	40
3.1.3.2.3	Transmissiv	40
3.1.3.2.4	Multifaserbündel	43
3.1.3.3	Strahlformung	44
3.1.3.3.1	Strahlformung bei der Strahlführung	44
3.1.3.3.2	Statische Strahlformung	45
3.1.3.3.3	Dynamische Strahlformung	49
3.1.4	Handhabungssysteme	53
3.1.4.1	Kinematisches System	54
3.1.4.1.1	Anforderungen	54
3.1.4.1.2	Varianten	55
3.1.4.2	Steuerung	55
3.1.4.3	Anlagenkonzepte	56
3.1.4.3.1	2D-Bearbeitung	56
3.1.4.3.2	3D-Bearbeitung	56
3.1.5	Strahl-Stoff-Wechselwirkung	60
3.1.5.1	Absorption von Laserstrahlung	60
3.1.5.1.1	Optische Eigenschaften von Werkstoffen	60
3.1.5.1.2	Absorption an Werkstoffen	61

3.1.5.1.3	Absorption und Eigenschaften der Laserstrahlung	62
3.1.5.1.4	Absorption und chemische Zusammensetzung	64
3.1.5.1.5	Absorption und Veränderungen des Werkstoffes	65
3.1.5.2	Wärmeleitung	66
3.1.5.2.1	Modellvorstellung	66
3.1.5.2.2	Mathematische Grundlagen	67
3.1.5.2.3	Analytische Lösungsansätze	68
3.1.5.2.4	Numerische Lösungsansätze	69
3.1.5.3	Prozeßgasströmungen	72
3.1.5.3.1	Analyse der Prozeßgasströmungen an komplexen Werkstückgeometrien	72
3.1.5.3.2	Laserlichtschnittverfahren	73
3.1.5.3.3	Grundlagen zur Oxidation	75
3.1.6	Eigenstressungen und Verzüge bei der Rand- schichtbehandlung	76
3.1.6.1	Allgemeines	76
3.1.6.2	Ergebnisse	78
3.1.6.2.1	Zeitlicher Ablauf der Vorgänge im Werkstoff	78
3.1.6.3	Einfluß der Prozeßparameter auf den Endzustand	84
3.1.6.3.1	Eigenstressungen	84
3.1.6.3.2	Verzug	87
3.2	Werkstoffkundliche Grundlagen	91
3.2.1	Prozeßsystematik	91
3.2.1.1	Festphasenprozesse	92
3.2.1.1.1	Umwandlungshärten	92
3.2.1.1.2	Weitere Festphasenprozesse	95
3.2.1.2	Randschichtschmelzen ohne Zusatzwerkstoff	96
3.2.1.3	Randschichtschmelzen mit Zusatzwerkstoff	99
3.2.1.3.1	Legieren	101
3.2.1.3.2	Laserstrahlbeschichten	101
3.2.1.3.3	Dispergieren	102
3.2.2	Analysemethoden und Prüfverfahren	104
3.2.2.1	Probennahme und -vorbereitung	106
3.2.2.2	Bestimmung der Härte	107
3.2.2.2.1	Brinellhärte	107
3.2.2.2.2	Vickershärte	107
3.2.2.2.3	Rockwellhärte	107
3.2.2.3	Bestimmung der Oberflächenrauheit	108
3.2.2.4	Bestimmung des Verschleißes	108

3.2.2.4.1	Stift-Scheibe-Test	109
3.2.2.4.2	Amsler-Verschleißtest	109
3.2.2.5	Bestimmung des Verzuges	110
4	Anwendungsmöglichkeiten des Festkörperlasers in der Oberflächenbearbeitung	115
4.1	Werkstoffkundliche Gesichtspunkte	115
4.1.1	Eisenwerkstoffe	115
4.1.1.1	Härten von Stählen	115
4.1.1.2	Umschmelzen von Gußeisen	124
4.1.1.3	Beschichten	129
4.1.2	Aluminiumwerkstoffe	142
4.1.2.1	Einteilung von Aluminiumwerkstoffen	142
4.1.2.2	Einfluß des Oberflächenzustandes und der Pulsenergie beim Randschichtschmelzen ohne Zusatzwerkstoff	143
4.1.2.3	Einfluß der Legierungszusammensetzung beim Rand- schichtschmelzen ohne Zusatzwerkstoff	145
4.1.2.4	Umschmelzlegieren von Aluminiumwerkstoffen	147
4.1.2.5	Dispergieren von Titankarbid	153
4.1.3	Kupferwerkstoffe	155
4.1.3.1	Un- und niedriglegierte Kupferwerkstoffe	155
4.1.3.1.1	Auftragschweißen auf Kupfer	157
4.1.3.1.2	Legieren von Kupfer	160
4.1.3.1.3	Einstufige Prozeßführung	160
4.1.3.1.4	Zweistufige Prozeßführung	164
4.1.3.2	Kupfer-Zinn-Werkstoffe	166
4.1.3.2.1	Umschmelzen von Zinn-Bronze	166
4.1.3.2.2	Legieren von Zinn-Bronze	169
4.1.3.2.3	Umschmelzen von bleihaltiger Bronze	171
4.1.2.2.4	Beschichten von Blei-Bronze auf Stahl	171
4.1.3.3	Kupfer-Aluminium-Werkstoffe	171
4.1.3.3.1	Umschmelzen von Aluminium-Bronze	171
4.1.4	Titanwerkstoffe	173
4.1.4.1	Legieren	174
4.1.4.2	Einschmelzen von Hartstoffen im einstufigen Prozeß	180
4.1.4.3	Randschichtumschmelzen mit Zusatzwerkstoff im zweistufigen Prozeß	181
4.2	Fertigungstechnische Gesichtspunkte	185
4.2.1	Möglichkeiten der dynamischen Strahlformung	185

4.2.1.1	Wirkungsweise und Aufbau von Schwingspiegelsystemen	185
4.2.1.2	Varianten der Strahloszillation	188
4.2.1.2.1	Strahloszillation ohne Laserkopplung	188
4.2.1.2.2	Strahloszillation mit Laserkopplung	190
4.2.1.3	Simulation entstehender Intensitätsprofile	192
4.2.1.4	Anwendungsmöglichkeiten der Strahloszillation in der Randschichtbehandlung	194
4.2.1.4.1	Erzeugung breiter Spuren beim Festphasenhärten durch eindimensionale Laserstrahloszillation	194
4.2.1.4.2	Randschichthärten mit zweidimensionaler Strahloszillation	202
4.2.1.4.3	Erzeugung von Umschmelzspuren homogener Spur- tiefe durch Laserstrahloszillation	203
4.2.2	Oberflächenbearbeitung an schwer zugänglichen Stellen	209
4.2.2.1	Geeignete Strahlformungssysteme	209
4.2.2.1.1	Strahlformende Eigenschaften des Lichtwellenleiters	209
4.2.2.1.2	Kaleidoskop	213
4.2.2.1.3	Facettenintegrator	215
4.2.2.1.4	Axikon	216
4.2.2.2	Prozeßkontrolle	218
4.2.2.3	Besonderheiten bei der Bearbeitung von Innenkonturen	221
4.2.3	Oberflächenbehandlung mikrotechnischer, schneiden- oder spitzenförmiger Bauteilgeometrien	226
4.2.3.1	Ziel des Verfahrens	226
4.2.3.2	Verfahrensspezifika	227
4.2.3.3	Gerätetechnik	227
4.2.3.4	Diskussion der Ergebnisse	228
4.2.3.4.1	Versuche mit unterschiedlichen Bahnabständen	230
4.2.3.4.2	Abstand zwischen Bauteilkante und Härtebahn	232
4.2.3.5	Kennfelder für die Prozeßparameter	233
4.2.3.5.1	Betrachtung zur Wärmeleitung beim Laserstrahlhärten	234
4.2.3.6	Bewertung des Verfahrens	236
4.2.4	Anlagentechnische Gesichtspunkte des Laserstrahlhärtens	237
4.2.4.1	Kombination von Laser- und NC-Steuerung	237
4.2.4.2	Anbindung eines Nd:YAG-Lasers an konventionelle Werkzeugmaschinen	240
4.2.4.3	Randschichthärten von Werkzeugstählen	241
4.2.4.4	Untersuchung der Gebrauchseigenschaften von Multifaserbündeln	245
4.2.5	Apparative Gesichtspunkte der Feinbeschichtung	251

4.2.5.1	Lasersystem	251
4.2.5.2	Prozeßmedien	253
4.2.5.2.1	Pulverzufuhr	253
4.2.5.2.2	Schutzgas	255
4.2.5.2.3	Cross-Jet	256
4.2.5.3	Absaugung	257
4.2.5.3.1	Offene Absaugung	257
4.2.5.3.2	Geschlossene Kammer	257
4.2.5.4	Bewegungssystem	258
4.2.5.5	Beeinflußbarkeit der Schichteigenschaften aus- gewählter Werkstoffe durch die Verfahrensparameter	259
4.2.5.5.1	Geometrie und Aufmischung	260
4.2.5.5.2	Härte und Oberflächenbeschaffenheit	263
4.2.5.5.3	Verschleißigenschaften	267
4.2.6	Vergleich unterschiedlicher Handhabungssysteme	269
4.2.7	Umwandlungshärten komplizierter Werkstückgeometrien	274
4.2.7.1	Prozeßführung beim Härten verschiedener Werkstück- geometrien	280
4.2.7.2	Handhabung der Bauteile	280
4.2.7.3	Strahlformung und -führung	282
4.2.7.3.1	Spiegeloptiken	283
4.2.7.3.2	Linsenoptiken	285
4.2.7.4	Prozeßgasführung	288
4.2.7.5	Verfahrensparameter	291
4.2.7.5.1	Einfluß der Pulsparameter auf das Einhärteergebnis	291
4.2.7.5.2	Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit auf das Einhärteergebnis	292
4.2.7.5.3	Vergleich Modellrechnung - Experiment	294
5	Bearbeitungsbeispiele	299
5.1	Härten	299
5.2	Umschmelzen	322
5.3	Umschmelzlegieren	324
5.4	Beschichten	329
6	Vergleich Nd:YAG-Laser - CO₂-Laser - Konventionelle Verfahren	339
6.1	Werkstoffkundliche und technologische Unterschiede	339
6.1.1	Zusammenstellung alternativer Behandlungsverfahren	339

6.1.1.1	Alternativen zum Laser-Randschichthärten bzw. Randschichtschmelzen	339
6.1.1.2	Alternativen zum Laser-Randschichtschmelzen mit Zusatzwerkstoff	339
6.1.2	Alternativen zum Laserstrahl-Randschichthärten bzw. Randschichtschmelzen	340
6.1.2.1	Thermische Verfahren	340
6.1.2.1.1	Tauchhärten	340
6.1.2.1.2	Flammhärten	341
6.1.2.1.3	Induktionshärten	341
6.1.2.1.4	Werkstoffe für das Flamm- und Induktionshärten	342
6.1.2.1.5	Elektronenstrahlhärten	344
6.1.2.1.6	WIG-Umschmelzen	346
6.1.2.2	Thermisch-chemische Verfahren	347
6.1.2.2.1	Einsatzhärten	347
6.1.2.2.2	Nitrieren	348
6.1.3	Alternativen zum Laserstrahl-Randschichtschmelzen mit Zusatzwerkstoff	348
6.1.3.1	Thermisches Spritzen	348
6.1.3.2	Auftragschweißen	349
6.2	Wirtschaftlichkeit	351
6.2.1	Allgemeine Gesichtspunkte	351
6.2.2	Grundlagen der Kalkulation	355
6.2.2.1	Maschinenpreis einschließlich Nebenaggregaten	357
6.2.2.2	Nebenkosten für Aufstellung und Anschluß	357
6.2.3	Beispiele für die Berechnung der Kosten des Randschichthärtens mit Festkörperlasern	359
6.2.3.1	Randschichthärten kleiner Bauteile	359
6.2.3.2	Vergleich CO ₂ -, Nd:YAG-Laser, Diodenlaser beim Härten	360
6.2.3.3	Härten von Linearführungen mit dem Nd:YAG-Laser	361
6.2.3.4	Härten mit dem Nd:YAG-Laser und dem Roboter	362
7	Arbeitssicherheit	363
7.1	Potentielle Gefahrenquellen bei der Oberflächenbearbeitung	363
7.1.1	Laserstrahlung	363
7.1.2	Emission und Immission	366
7.1.3	Anlagenbetrieb	368
7.2	Kommentierung der anzuwendenden Bestimmungen	369
7.2.1	Laserstrahlung	369

7.2.2	Schadstoffemission	369
7.2.3	Anlagentechnik	372
7.3	Gesetze, Normen und Richtlinien	373
8	Richtlinien und Normen	375
8.1	Anwendung von Normen	375
8.2	Nationale und internationale Zusammenarbeit	378
8.3	Ergebnisse der fachbezogenen Normung	378
Liste der Verbundteilnehmer und Titel der Teilvorhaben		391
Literatur		393
Sachverzeichnis		401
Anhang	Verwendete Abkürzungen, Symbole und Einheiten	403