

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xix
Tabellenverzeichnis.....	xxvii
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Strukturierte Stahloberflächen	3
2.1.1 Stahlwerkstoffe im Werkzeugbau	4
2.1.2 Abtragende Fertigungsverfahren für die Erzeugung von Mikrostrukturen.....	4
2.1.3 Abtragende Laser-Mikromaterialbearbeitung	5
2.2 Strahl-Materie-Wechselwirkung ultrakurzer Laserpulse.....	7
2.2.1 Energieeinkopplung ultrakurzer Laserpulse	8
2.2.2 Erwärmung des Kristallgitters	10
2.2.3 Intensitätsabhängige Phasenübergänge	11
2.2.4 Abkühlung umliegender Materialrandbereiche	13
2.3 Kenngrößen und Energiebilanz.....	14
2.3.1 Kenngrößen der UKP-Ablation mit Gaußstrahl	15
2.3.2 Kenngrößen des UKP-Abtrags mit Flat-Top-Strahlprofil	16
2.3.3 Energiebilanz der UKP-Ablation	17
2.4 Multipulseffekte bei der UKP-Laserstrukturierung.....	18
2.4.1 Inkubation	19
2.4.2 Wärmeakkumulation.....	23
2.5 Modellierung des UKP-Lasermaterialabtrags	25
2.5.1 Modellierungsansätze.....	26
2.5.2 Analytische Berechnung des Strukturquerschnitts	27
2.5.3 Berücksichtigung von Multipulseffekten	29
2.6 Digitale holografische Strahlformung.....	30
2.6.1 Grundlagen und Ansätze der diffraktiven Strahlformung.....	30
2.6.2 Auftreten und Reduktion des Effekts von Speckle	34
3 Motivation und Zielsetzung.....	37
4 Versuchseinrichtungen, Werkstoffe und Methoden	39
4.1 Verwendete Systemtechnik.....	39
4.1.1 Systemtechnik für die Lasermaterialbearbeitung und holografische Strahlformung	39

4.1.2	Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Reflektivität	41
4.1.3	Mikroskopie	43
4.1.4	Mikrohärtemessgerät	43
4.2	Untersuchte Stahlwerkstoffe	44
4.2.1	Chemische Zusammensetzung.....	44
4.2.2	Mechanische und metallurgische Eigenschaften	45
4.2.3	Topografische Eigenschaften.....	46
4.2.4	Optische Eigenschaften	47
4.2.5	Thermophysikalische Eigenschaften	49
4.3	Experimentelle Methoden	49
4.3.1	Ermittlung der Phasenfunktion des SLM.....	50
4.3.2	Berechnung der Phasenmasken für die Strahlformung.....	50
4.3.3	Bewertung der Strahlformung.....	52
4.3.4	Simulation der Intensitätsverteilung.....	53
4.3.5	Erzeugung von Strukturen.....	55
4.3.6	Analyse des Materialabtrags	56
4.3.7	Bestimmung der Abtragschwellen und der Inkubation	58
5	Qualität und Effizienz der diffraktiven Strahlformung eines Flat-Top-Profiles	59
5.1	Einflüsse des LCoS-SLM auf die Beugungseffizienz des Flüssigkristallmodulators	59
5.1.1	Räumliche Abhängigkeit der Phasenfunktion	59
5.1.2	Übersprechendes Spannungssignal benachbarter Pixel	60
5.1.3	Erwärmung des Flüssigkristalls	62
5.2	Qualität und Lichteffizienz eines Flat-Top-Profiles.....	63
5.2.1	Speckle-Reduktion durch zeitliche Mittelung.....	64
5.2.2	Speckle-Reduktion durch zusätzliche Phasenbedingung	67
5.2.3	Reduktion der Strahlgleichförmigkeit durch Rückkopplung....	71
6	Prozessuntersuchungen von Multipulseffekten beim Mikro-Materialabtrag	73
6.1	Inkubation bei Erzeugung von Kraterstrukturen	73
6.1.1	Grenzen der untersuchten Fluenzen und Pulszahlen	73
6.1.2	Pulszahlabhängigkeit der Abtragsschwellfluenz und der effektiven Energieeindringtiefe	76
6.1.3	Einfluss der Stahllegierung	81
6.1.4	Einfluss des Spotradius	84
6.2	Ursachen der Inkubation	86
6.2.1	Abnahme der Reflektivität.....	87
6.2.2	Änderung der Energieeindringtiefe	94
6.2.3	Bewertung der Stärke beider Einflüsse auf die Inkubation.....	96

6.3	Modellierung der Erzeugung von 2,5D-Strukturen	99
6.3.1	Inhalte und Randbedingungen des Modells	99
6.3.2	Verifizierung des Modells für den sequenziellen Abtrag von 2,5D-Strukturen	101
6.3.3	Einfluss von Multipulseffekten auf den sequenziellen Abtrag von 2,5D-Strukturen	104
6.4	Erzeugung von 2,5D-Strukturen mit Flat-Top-Profil	106
6.4.1	Speckle-behaftetes Flat-Top-Profil	106
6.4.2	Homogenisiertes speckle-freies Flat-Top-Profil	113
6.5	Ansatz zur modellbasierten Steigerung der Abtragseffizienz des Mikro-Materialabtrags.....	118
6.5.1	Vorgehensweise der Modellierung des Abtrags.....	118
6.5.2	Potenzial zur Effizienzsteigerung der Laserstrukturierung mit angepasster Intensitätsverteilung	121
7	Zusammenfassung.....	127
8	Summary	129
A	Anhang.....	131
A.1	Thermophysikalische und optische Werkstoffparameter metallischer Elemente und von 1.4301.....	131
A.2	Temperaturanstieg durch Wärmeakkumulation ΔT	132
A.3	Wahl der räumlichen Auflösung der Fensterfunktion für die Simulation der Intensitätsverteilung	133
A.4	Parameter der Punktspreizfunktion zur Modellierung des Pixel- Übersprechens des LCoS-SLM	134
A.5	Qualität mit sehr hoher Fluenz $F \gg F_{th}$ erzeugter Kraterstrukturen	136
A.6	Ortsabhängiger Einfallswinkel des Laserstrahls auf der Substratoberfläche	136
	Literaturverzeichnis.....	139