



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Nomenklatur und Abkürzungsverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
2 Thermisch-induzierte Eigenspannungen	5
2.1 Definition und Einteilung	5
2.2 Entstehung und Eigenschaften thermisch-induzierter Eigenspannungen	6
2.3 Eigenspannungsbedingter Verzug	6
2.4 Eigenspannungen beim Schweißprozess	7
2.4.1 Einflussfaktoren auf die Eigenspannungen	7
2.4.2 Strategien zur Vermeidung von Eigenspannungen beim Schweißen	7
2.5 Messtechnische Verfahren zur Qualifizierung und Quantifizierung	9
3 Laseradditive Fertigung	13
3.1 Definition und Abgrenzung	13
3.2 Technologieprinzip	13
3.3 Anlagentechnik	14
3.4 Prozess	16
3.4.1 Wirkprinzip	16
3.4.2 Einflussgrößen	17
3.5 Prozesskette	21
3.6 Qualitätsrelevante Ergebnisgrößen	22
3.7 Industrielle Anwendung	23
4 Thermisch-induzierte Eigenspannungen in der laseradditiven Fertigung	25
4.1 Relevanz der Eigenspannungen für den laseradditiven Fertigungsprozess	25
4.2 Spannungsinduzierende Mechanismen	26
4.2.1 Temperatur-Gradienten-Mechanismus	26
4.2.2 Abkühlungsbedingtes Schrumpfen	26
4.2.3 Mechanismus der Eigenspannungsbildung im Prozess	27
4.3 Ansatz zur analytischen Beschreibung	29
4.4 Ansätze zur numerischen Beschreibung	31
4.5 Strategien zur Reduktion von Eigenspannungen	35
4.5.1 Prozessparameter	35
4.5.2 Belichtungsstrategie	36
4.5.3 Mehrfachbelichtung	38
4.5.4 Externe Energiezuführung zur Verringerung des Temperaturgradienten	39
4.5.5 Verzugskompensation	39
4.5.6 Thermische Relaxation	40
4.5.7 Zusammenfassung	40
5 Methodik zur Identifikation von Einflussfaktoren	43
5.1 Methodischer Ansatz	43
5.2 Identifikation potentieller Einflussfaktoren	44
5.3 Versuchsrandbedingungen	50
5.3.1 Versuchsanlage	50



5.3.2	Versuchswerkstoff Ti-6Al-4V	51
5.3.3	Laseradditive Verarbeitung des Versuchswerkstoffs	51
6	Modellentwicklung	55
6.1	Numerisches Modell	55
6.1.1	Systembeschreibung	56
6.1.2	Parametrische Geometrie und Vernetzung	56
6.1.3	Optische Energieeinbringung	58
6.1.4	Thermisches Modell	59
6.1.5	Elasto-plastisches Strukturmodell	61
6.1.6	Materialmodell.....	62
6.1.7	Numerische Berechnung der Referenzparameter	68
6.2	Empirisches Modell	70
6.2.1	Messmethodik.....	71
6.2.2	Quantifizierung.....	72
6.2.3	Validierung	75
6.2.4	Referenzdefinition	77
6.3	Virtuelle Prozessauslegung	77
6.3.1	Randbedingungen	77
6.3.2	Entwicklung zur virtuellen Prozessauslegung	78
6.4	Definition der Prozessgrenzen	79
7	Analyse der Einflussfaktoren	87
7.1	Versuchsplanung der Einzelversuche	87
7.1.1	Versuchsplanung vektorbasierte Faktoren.....	88
7.1.2	Versuchsplanung flächenbasierte Faktoren	88
7.1.3	Versuchsplanung volumenbasierte Faktoren.....	91
7.2	Numerische Einzelversuche.....	91
7.2.1	Methodik der Analyse	91
7.2.2	Vektorbasierte Faktoren	92
7.2.3	Volumenbasierte Faktoren.....	94
7.3	Empirische Einzelversuche	95
7.3.1	Vektorbasierte Faktoren	95
7.3.2	Flächenbasierte Faktoren.....	95
7.3.3	Volumenbasierte Faktoren.....	98
7.3.4	Diskussion	99
7.4	Analyse der Wechselwirkungen.....	101
7.4.1	Faktorielle Versuchsplanung	101
7.4.2	Ergebnisse der faktoriellen Versuchsreihe	102
7.5	Bewertung der Ergebnisse	104
8	Validierung in der industriellen Prozesskette	107
8.1	Randbedingungen.....	107
8.2	Virtuelle Prozessauslegung für die industrielle Fertigung	108
8.3	Industrielle Anwendungsbeispiele	109
8.3.1	Dentale Restauration.....	110
8.3.2	Osseoinduktive Hüftendoprothese.....	111
8.3.3	Bionisch-optimierte Leichtbaukomponente für die Luftfahrt.....	112
8.3.4	Bewertung.....	114



9 Zusammenfassung und Ausblick	117
Literaturverzeichnis	121
A Anhang	131
A.1 Zusammenfassung Werkstoffkennwerte Ti-6Al-4V	131
A.2 Optische Konstanten	132
A.3 Rechnerkonfiguration zur numerischen Lösung	133