

I Inhaltsverzeichnis

I	INHALTSVERZEICHNIS	I
II	ABKÜRZUNGS- UND FORMELZEICHEN	IV
III	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	XI
1	EINLEITUNG	1
2	ANALYSE- UND BEWERTUNGSKRITERIEN IM WERKZEUG- UND FORMENBAU.....	5
2.1	ANFORDERUNGEN AN DEN WERKZEUG- UND FORMENBAU	11
2.2	PROZESSQUALITÄT	12
2.2.1	<i>Haupttechnologie</i>	12
2.2.2	<i>Fehlertechnologie</i>	15
2.2.3	<i>Prozessfähigkeit</i>	16
2.3	PROZESSDURCHLAUFZEIT	17
2.3.1	<i>Abtragate</i>	17
2.3.2	<i>Betriebsmittelrüstzeit</i>	17
2.3.3	<i>Fertigungsnebenzeit</i>	18
2.3.4	<i>Komplexität der Prozesskette</i>	18
2.4	PROZESSKOSTEN	18
2.4.1	<i>Stückkosten</i>	19
3	FERTIGUNGSVERFAHREN IM WERKZEUG- UND FORMENBAU	21
3.1	FRÄSEN	23
3.1.1	<i>Prozessqualität</i>	24
3.1.2	<i>Prozessdurchlaufzeit</i>	25
3.1.3	<i>Prozesskosten</i>	28
3.2	FUNKENEROSIVES SENKEN	29
3.2.1	<i>Prozessqualität</i>	31
3.2.2	<i>Prozessdurchlaufzeit</i>	32
3.2.3	<i>Prozesskosten</i>	33
3.3	LASERSTRAHLABTRAGEN	34
3.3.1	<i>Eigenschaften von Laserstrahlung</i>	37
3.3.1.1	Entstehung von Laserstrahlung	38
3.3.1.2	Propagation von Laserstrahlung	39
3.3.1.3	Fokussierung von Laserstrahlung	41
3.3.1.4	Laserstrahl-Materialwechselwirkung	42
3.3.2	<i>Anlagentechnik zum Laserstrahlabtragen</i>	54

3.3.2.1	Eigenschaften und Aufbau von Laserstrahlquellen zum Abtrag.....	55
3.3.2.2	Konzepte zur Strahlführung und -formung.....	60
3.3.2.3	Belichtungsstrategien und Eingriffsgrößen.....	64
3.3.2.4	Prozessqualität.....	70
3.3.2.5	Prozessdurchlaufzeit.....	71
3.3.2.6	Prozesskosten.....	72
3.4	STATUS QUO UND ABGRENZUNG DER FERTIGUNGSVERFAHREN IM WERKZEUG- UND FORMENBAU ...	73
4	ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE	77
5	PRIORISIERUNG UND QUANTIFIZIERUNG DER ZIELGRÖßEN FÜR DEN LASERSTRAHLABTRAG.....	81
6	UNTERSUCHUNG DER PROZESSQUALITÄT.....	86
6.1	HAUPT- UND FEHLERTECHNOLOGIE DES LASERSTRAHLABTRAGENS	86
6.1.1	<i>Definition experimenteller Untersuchungen zur Analyse der Maßgenauigkeit.....</i>	<i>87</i>
6.1.2	<i>Messung der Maßgenauigkeit</i>	<i>88</i>
6.1.3	<i>Analyse der Maßgenauigkeit.....</i>	<i>91</i>
6.1.4	<i>Optimierung der Maßgenauigkeit</i>	<i>93</i>
6.2	PROZESSFÄHIGKEIT DES LASERSTRAHLABTRAGENS.....	94
6.2.1	<i>Definition der experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Prozessfähigkeit.....</i>	<i>95</i>
6.2.2	<i>Messung der generierten Abtraggeometrien.....</i>	<i>103</i>
6.2.3	<i>Analyse der Laserstrahlabtragsysteme</i>	<i>108</i>
6.2.3.1	Erhebung der stochastischen Pulskraterdurchmesser	109
6.2.3.2	Analyse des Pulskraterprofils.....	113
6.2.3.3	Analyse der Pulskratertiefe.....	115
6.2.3.4	Analyse der Stabilität und Genauigkeit der Pulsfolgefrequenz	116
6.2.3.5	Dynamischer Positionierfehler der Strahlführung	120
6.2.3.6	Analyse des Schleppverzugs der Strahlführung	123
6.2.4	<i>Optimierung der Prozessfähigkeit.....</i>	<i>130</i>
6.2.4.1	Modell zur axialen Maßgenauigkeit	132
6.2.4.2	Prozessparameter zur Optimierung der axialen Maßgenauigkeit	138
6.2.4.3	Modell zur lateralen Maßgenauigkeit.....	140
6.2.4.4	Prozessparameter zur Optimierung der lateralen Maßgenauigkeit	149
7	UNTERSUCHUNG DER PROZESSDURCHLAUFZEIT.....	152
7.1	DEFINITION DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNG ZUR PROZESSDURCHLAUFZEIT	152
7.2	MESSUNG DER PROZESSDURCHLAUFZEIT	155
7.3	ANALYSE DER PROZESSDURCHLAUFZEIT.....	156
7.4	OPTIMIERUNG DER PROZESSDURCHLAUFZEIT.....	160
7.4.1	<i>Anlagenmerkmale zur Nebenzeitoptimierung.....</i>	<i>162</i>
7.4.2	<i>Prozessparameter zur Hauptzeitoptimierung.....</i>	<i>164</i>
8	UNTERSUCHUNG DER PROZESSKOSTEN	168
8.1	DEFINITION DER RANDBEDINGUNGEN FÜR DIE PROZESSKOSTEN.....	168

8.2	ERHEBUNG DER KOSTENELEMENTE FÜR DIE STÜCKKOSTENZUSCHLAGSKALKULATION	173
8.3	ANALYSE DER STÜCKKOSTEN.....	176
8.4	OPTIMIERUNG DER STÜCKKOSTEN.....	180
9	MAßNAHMEN ZUR OPTIMIERUNG DES LASERSTRAHLABTRAGS.....	184
9.1	PROZESSQUALITÄT	184
9.1.1	<i>Aspektverhältnis</i>	184
9.1.1.1	Strahlbeugungsmaßzahl.....	185
9.1.1.2	Wellenlänge.....	185
9.1.1.3	Strahltaillenradius.....	186
9.1.1.4	Prozessrückstände	186
9.1.1.5	Fazit.....	186
9.1.2	<i>Axiale Profiltiefe</i>	186
9.1.2.1	Pulskraterform.....	187
9.1.2.2	Pulskraterdurchmesser-Stabilität	188
9.1.2.3	Pulskraterdurchmesser in Wechselwirkung mit dem inkrementellen Pulsabstand	189
9.1.3	<i>Laterale Prozessfähigkeit</i>	190
9.1.3.1	Pulskraterdurchmesser.....	191
9.1.3.2	Vorschubversatz	191
9.1.3.3	Spurabstand.....	192
9.2	PROZESSDURCHLAUFZEIT	192
9.2.1	<i>Hauptzeit</i>	192
9.2.2	<i>Nebenzeit</i>	193
9.3	PROZESSKOSTEN.....	194
9.3.1	<i>Vorbereitungs- und Werkzeugkosten</i>	195
9.3.2	<i>Jährliche Nutzungszeit</i>	195
9.3.3	<i>Bearbeitungszeit</i>	195
9.4	HERLEITUNG OPTIMIERTER TECHNISCHER ANLAGENMERKMALE	196
10	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	200
11	LITERATURVERZEICHNIS	204
12	ANHANG.....	211