

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel und Aufbau der Arbeit . . . . .	1
1.2	Beitrag zur wissenschaftlichen Forschung . . . . .	3
1.3	Mathematische Notation . . . . .	3
1.4	Verwendete Hilfsmittel . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Laserstrahlschweißen</b>	<b>5</b>
2.1	Prozessmechanik und Prozesszone . . . . .	5
2.1.1	Wärmeleitungsschweißen . . . . .	5
2.1.2	Tiefschweißen . . . . .	6
2.2	Prozessemissionen . . . . .	7
2.3	Prozessmerkmale und -parameter . . . . .	7
2.3.1	Schweißlaser . . . . .	8
2.3.2	Strahloptik . . . . .	10
2.3.3	Fokuslage . . . . .	11
2.3.4	Naht- und Punktschweißen . . . . .	11
2.3.5	Fügegeometrien . . . . .	12
2.3.6	Werkstoffe . . . . .	12
2.3.7	Weitere Prozessmerkmale . . . . .	13
2.4	Einsatz des Laserstrahlschweißens . . . . .	14
2.4.1	Vor- und Nachteile des Verfahrens . . . . .	14
2.4.2	Einsatzbereiche . . . . .	14
2.5	Normen . . . . .	15
2.6	Schweißfehler . . . . .	16
2.7	Prozessüberwachung . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Spektrale Prozessanalyse</b>	<b>19</b>
3.1	Stand der Technik . . . . .	19

3.2	Theoretische Betrachtungen . . . . .	20
3.2.1	Grundlegende spektrale Charakteristiken . . . . .	20
3.2.2	Einflussgrößen . . . . .	21
3.3	Experimenteller Aufbau . . . . .	22
3.3.1	Prozessgeometrie und -parameter . . . . .	23
3.3.2	Messgeometrie und -parameter . . . . .	24
3.3.3	Wellenlängen- und Intensitätskalibrierung . . . . .	26
3.4	Ergebnisse . . . . .	33
3.4.1	Identifikation der Spektrallinien und -banden . . . . .	34
3.4.2	Schweißlaserwellenlänge: CO <sub>2</sub> vs. Nd:YAG . . . . .	37
3.4.3	Örtliche Darstellung . . . . .	38
3.4.4	Zeitliche Veränderungen . . . . .	38
3.4.5	Einfluss der Laserleistung . . . . .	42
3.4.6	Schwarzkörper Schmelzbad . . . . .	42
3.4.7	Schutzgasüberwachung . . . . .	44
3.4.8	Verunreinigungen . . . . .	46
3.5	Zusammenfassung spektrale Prozessanalyse . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Passive Prozessüberwachung</b>	<b>49</b>
4.1	Stand der Technik . . . . .	49
4.2	Problembeschreibung . . . . .	51
4.3	Experimenteller Laboraufbau . . . . .	51
4.3.1	Probenpräparation . . . . .	52
4.3.2	Beobachtungsgeometrie . . . . .	52
4.3.3	Wellenlängenselektion . . . . .	53
4.3.4	Koaxiale Prozessabbildung . . . . .	54
4.4	Vergleich Photodiode – Kamera . . . . .	55
4.4.1	Zeitliche Auflösung . . . . .	55
4.4.2	Räumliche Auflösung . . . . .	55
4.5	Prozessüberwachung im produktiven Umfeld . . . . .	58
4.5.1	Prozessgeometrie . . . . .	58
4.5.2	Prozessparameter . . . . .	58
4.5.3	Messgeometrie und -parameter . . . . .	59
4.6	Bildanalyse und Defektdetektion . . . . .	61
4.6.1	Analyseansatz . . . . .	61
4.6.2	Merkmalsgewinnung . . . . .	62
4.6.3	Klassifikation . . . . .	70
4.6.4	Datensatz . . . . .	71
4.6.5	Ergebnisse . . . . .	73

4.7	Zusammenfassung passive Prozessüberwachung . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Aktive Prozessbeobachtung</b>	<b>79</b>
5.1	Stand der Technik . . . . .	80
5.2	Problembeschreibung . . . . .	81
5.3	Experimenteller Aufbau . . . . .	82
5.3.1	Beobachtungsgeometrie . . . . .	82
5.3.2	Beleuchtungsauswahl . . . . .	82
5.3.3	Probenpräparation . . . . .	85
5.4	Ergebnisse der Bildaufnahme . . . . .	86
5.4.1	Schmelzbadphase . . . . .	87
5.4.2	Erstarrungsphase . . . . .	87
5.4.3	Schmelzbadausdehnung . . . . .	92
5.4.4	Oberflächengeometrie . . . . .	93
5.5	Bildanalyse . . . . .	94
5.5.1	Kantendetektion . . . . .	95
5.5.2	Divergenzbasierte Kantendetektion . . . . .	95
5.5.3	Vergleich der Divergenzmaße . . . . .	105
5.5.4	Analyse der Schweißbilder . . . . .	118
5.6	Zusammenfassung aktive Prozessbeobachtung . . . . .	126
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>129</b>
	<b>Anhang</b>	<b>133</b>
<b>A</b>	<b>Beobachtung der Oberflächentopographie</b>	<b>135</b>
A.1	Lambert-Strahler . . . . .	135
A.2	Lambert-Reflektor . . . . .	137
A.3	Spiegelnde Reflexion . . . . .	138
<b>B</b>	<b>Physikalischer Hintergrund der Strahlungsprozesse</b>	<b>141</b>
B.1	Strahlung und Materie . . . . .	141
B.1.1	Emission . . . . .	141
B.1.2	Absorption, Reflexion und Transmission . . . . .	142
B.1.3	Linienpektrum . . . . .	142
B.1.4	Bandenspektrum . . . . .	143
B.1.5	Kontinuierliche Spektren . . . . .	144
B.2	Kirchhoffsches Strahlungsgesetz . . . . .	144
B.3	Thermische Strahlung . . . . .	146
B.3.1	Schwarzkörperstrahlung . . . . .	146

B.3.2	Plancksches Strahlungsgesetz . . . . .	147
B.3.3	Wiensches Verschiebungsgesetz . . . . .	148
B.3.4	Stefan-Boltzmann-Gesetz . . . . .	149
B.3.5	Graue Körper . . . . .	151
B.3.6	Reale Körper . . . . .	151
B.4	Inverser Bremsstrahlungsprozess . . . . .	153
B.5	Laserstrahlung . . . . .	154
B.5.1	Stimulierte Emission . . . . .	154
B.5.2	Besetzungsinversion . . . . .	155
B.5.3	Pumpen . . . . .	155
B.5.4	Resonator . . . . .	155
B.5.5	Geschichtlicher Abriss . . . . .	156
<b>C</b>	<b>Spektrenserien</b>	<b>159</b>
<b>D</b>	<b>Klassifikation und Merkmalsextraktion</b>	<b>165</b>
D.1	Klassifikationsprinzip . . . . .	165
D.2	Merkmalsextraktion . . . . .	166
D.2.1	Skalenniveau . . . . .	166
D.2.2	Verwendete Merkmale . . . . .	167
D.3	Merkmalsaufbereitung . . . . .	172
D.3.1	Distanzen im Merkmalsraum . . . . .	172
D.3.2	Merkmalssskalierung . . . . .	172
D.3.3	Merkmalsreduktion . . . . .	174
D.4	Klassifikatoren . . . . .	175
D.4.1	Statistische Klassifikation . . . . .	175
D.4.2	Lineare Klassifizierung . . . . .	176
D.4.3	Nichtlineare Klassifikatoren . . . . .	179
D.4.4	k-NN-Klassifikatoren . . . . .	181
D.4.5	Schwellwertbasierter Klassifikator . . . . .	182
D.5	Training . . . . .	182
D.6	Beurteilung eines Klassifikators . . . . .	183
<b>E</b>	<b>Kantendetektion</b>	<b>185</b>
E.1	Canny-Filter . . . . .	186
E.1.1	Glättung . . . . .	187
E.1.2	Gradientenfilter . . . . .	187
E.1.3	Verdünnung . . . . .	187
E.1.4	Selektion . . . . .	187

E.2	Glättung . . . . .	188
<b>F</b>	<b>Mathematischer Hintergrund zur statistischen Bildanalyse</b>	<b>191</b>
F.1	Wahrscheinlichkeitstheorie . . . . .	191
F.1.1	Wahrscheinlichkeitsraum . . . . .	191
F.1.2	Wahrscheinlichkeitsfunktion . . . . .	192
F.1.3	Verteilungsfunktion . . . . .	192
F.1.4	Statistische Tests . . . . .	193
F.2	Informationstheorie . . . . .	193
F.2.1	Shannon-Entropie . . . . .	193
F.2.2	Rényi-Entropie . . . . .	194
F.2.3	Kreuzentropie . . . . .	195
F.3	Histogramm . . . . .	195
F.4	Abstands- und Ähnlichkeitsmaße . . . . .	196
F.4.1	Divergenzklassen . . . . .	197
F.4.2	Divergenzen und Distanzmaße . . . . .	200
F.4.3	Beschleunigung des Verfahrens . . . . .	206
<b>G</b>	<b>Approximation des Kantenwinkels</b>	<b>209</b>
<b>H</b>	<b>Analysen Kantendetektionsqualität</b>	<b>213</b>
<b>I</b>	<b>Werkstoffzusammensetzungen und Elementeigenschaften</b>	<b>221</b>
<b>J</b>	<b>Physikalische Konstanten</b>	<b>223</b>
<b>K</b>	<b>Nebenrechnungen und Herleitungen</b>	<b>225</b>
K.1	Integration des Planckschen Strahlungsgesetzes . . . . .	225
K.1.1	Raumwinkel . . . . .	226
K.1.2	Wellenlänge . . . . .	226
K.2	Differenzierung des Planckschen Strahlungsgesetzes . . . . .	229
K.2.1	Wellenlänge . . . . .	229
K.2.2	Temperatur . . . . .	230
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>233</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>235</b>
	<b>Abkürzungen und Symbole</b>	<b>239</b>
	<b>Sach- und Personenverzeichnis</b>	<b>243</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>247</b>
Eigene Veröffentlichungen . . . . .	260
Betreute studentische Arbeiten . . . . .	260