

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>12</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
1.1 Zielstellung . . . . .	17
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	18
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>20</b>
2.1 Kühlung und Entwärmung . . . . .	20
2.1.1 Wärmeübertragung . . . . .	20
2.1.1.1 Wärmeleitung . . . . .	21
2.1.1.2 Konvektion . . . . .	23
2.1.1.3 Wärmestrahlung . . . . .	25
2.1.2 Kühltechnologien im Bereich der Elektronikkühlung . . . . .	26
2.1.2.1 Wärmeleitung . . . . .	26
2.1.2.2 Luft- und Fluidkühlung . . . . .	27
2.1.2.3 Sprühkühlung . . . . .	29
2.1.2.4 Siedekühlung . . . . .	30
2.1.3 Einfluss der Kontaktfläche . . . . .	31
2.1.4 Zusammenfassende Betrachtung . . . . .	32
2.2 Grundlagen der Siedekühlung . . . . .	32
2.2.1 Arten des Siedeprozesses . . . . .	32
2.2.2 Blasenentstehung und Wärmeübergang . . . . .	35
2.2.3 Einflussgrößen auf den Wärmeübergang beim Sieden . . . . .	39
2.3 Modifikation von Oberflächen für die Siedekühlung . . . . .	44
2.3.1 Aufrauen . . . . .	44
2.3.2 Beschichten . . . . .	46
2.3.3 Galvanisches Abscheiden . . . . .	48
2.3.4 Direkte Strukturierung . . . . .	51
2.4 Zusammenfassende Betrachtungen . . . . .	59
<b>3 Handlungsbedarf und Planung der Vorgehensweise</b>	<b>61</b>
3.1 Handlungsbedarf . . . . .	61
3.2 Planung der Vorgehensweise . . . . .	63
<b>4 Messsystem zur thermodynamischen Charakterisierung von Oberflächen</b>	<b>65</b>

4.1	Entwicklung des Messsystems . . . . .	65
4.2	Siedemodul . . . . .	67
4.3	Arbeitsfluid . . . . .	70
4.4	Kondensator . . . . .	71
4.5	Verbindungs- und Messtechnik . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Auswahl von Oberflächenstrukturen und Festlegung der Fertigungsverfahren</b>	<b>73</b>
5.1	Vorüberlegungen . . . . .	73
5.1.1	Experimentelle Randbedingungen . . . . .	75
5.1.2	Keimstellendurchmesser . . . . .	75
5.1.3	Abreißdurchmesser . . . . .	76
5.2	Festlegung der Oberflächenstrukturen für die Siedekühlung . . . . .	77
5.3	Festlegung der Fertigungsverfahren . . . . .	82
5.3.1	Thermisches Abtragen mit Laserstrahl . . . . .	83
5.3.2	Elektrochemisches Abtragen . . . . .	87
5.3.3	Fräsen . . . . .	90
5.3.4	Strahlen . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Herstellung und geometrische Charakterisierung der Strukturen</b>	<b>94</b>
6.1	Einführung . . . . .	94
6.2	Messtechnik und Messdatenanalyse . . . . .	94
6.2.1	Messtechnik . . . . .	94
6.2.2	Messdatenanalyse der geometrischen Abmessungen . . . . .	95
6.2.3	Bestimmung der Oberflächenkenngrößen . . . . .	95
6.3	Bearbeitungsergebnisse . . . . .	99
6.3.1	Referenzplatte (P1-U) . . . . .	100
6.3.2	Thermisches Abtragen mit Laserstrahl . . . . .	101
6.3.2.1	Pinstrukturen (P2-LP) . . . . .	102
6.3.2.2	Kalotten (P3-LK) . . . . .	104
6.3.3	Elektrochemisches Abtragen . . . . .	107
6.3.3.1	Pinstrukturen (P4-EP) . . . . .	108
6.3.3.2	Kalotten (P5-EK) . . . . .	110
6.3.4	Fräsen . . . . .	112
6.3.4.1	Pinstrukturen (P6-FP) . . . . .	113
6.3.4.2	Kalotten (P7-FK) . . . . .	115
6.3.4.3	Pinstrukturen (P8-FP200) . . . . .	117

6.3.5	Strahlen . . . . .	119
6.3.5.1	Mikrostrukturierung mit grobem Strahlmittel (P9-SGV) . . . . .	119
6.3.5.2	Mikrostrukturierung mit mittlerem Strahlmittel (P10-SMV) . . . . .	120
6.3.5.3	Mikrostrukturierung mit feinem Strahlmittel (P11-SFV) . . . . .	121
6.3.6	Vergleich der Verfahren zur Mesostrukturierung . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Thermodynamische Charakterisierung der Oberflächen</b>	<b>130</b>
7.1	Experimentelle Vorgehensweise . . . . .	130
7.2	Referenzplatte (P1-U) . . . . .	131
7.3	Fehlerbetrachtung . . . . .	133
7.4	Ergebnisse der mesostrukturierten Oberflächen . . . . .	134
7.4.1	Thermisches Abtragen mit Laserstrahl . . . . .	135
7.4.1.1	Pinstrukturen (P2-LP) . . . . .	135
7.4.1.2	Kalotten (P3-LK) . . . . .	136
7.4.2	Elektrochemisches Abtragen . . . . .	137
7.4.2.1	Pinstrukturen (P4-EP) . . . . .	137
7.4.2.2	Kalotten (P5-EK) . . . . .	139
7.4.3	Fräsen . . . . .	140
7.4.3.1	Pinstrukturen (P6-FP) . . . . .	140
7.4.3.2	Kalotten (P7-FK) . . . . .	141
7.4.3.3	Pinstrukturen (P8-FP200) . . . . .	143
7.5	Ergebnisse der mikrostrukturierten Oberflächen . . . . .	144
7.5.1	Mikrostrukturierung mit grobem Strahlmittel (P9-SGV) . . . . .	144
7.5.2	Mikrostrukturierung mit mittlerem Strahlmittel (P10-SMV) . . . . .	145
7.5.3	Mikrostrukturierung mit feinem Strahlmittel (P11-SFV) . . . . .	147
<b>8</b>	<b>Vergleich und Bewertung der Oberflächenstrukturen hinsichtlich des Wärmeübergangs</b>	<b>149</b>
8.1	Vergleich ausgewählter Ergebnisse . . . . .	149
8.1.1	Vergleich der mit Laserstrahl erzeugten Strukturen . . . . .	149
8.1.2	Vergleich der elektrochemisch hergestellten Strukturen . . . . .	150
8.1.3	Vergleich der gefrästen Strukturen . . . . .	152
8.1.4	Vergleich der mittels Strahlen bearbeiteten Oberflächen . . . . .	153
8.1.5	Vergleich der Pinstrukturen . . . . .	155
8.1.6	Vergleich der Kalotten . . . . .	157
8.1.7	Vergleich der meso- und mikrostrukturierten Oberflächen . . . . .	158
8.1.8	Gegenüberstellung der wesentlichsten Messergebnisse . . . . .	160

8.2	Bewertung des Einflusses der Oberflächenstruktur . . . . .	161
8.2.1	Einfluss der Mesostrukturen . . . . .	161
8.2.2	Einfluss der Mikrostrukturen . . . . .	164
8.3	Schlussfolgerungen . . . . .	165
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>169</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	169
9.2	Ausblick . . . . .	171
	<b>Literatur</b>	<b>175</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>185</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>189</b>
<b>A</b>	<b>Technische Zeichnungen</b>	<b>191</b>
A.1	Heizplatte . . . . .	191
A.2	Verdampferplatte . . . . .	192
A.3	Siedekammer . . . . .	193
A.4	Isolierrahmen . . . . .	194
	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>195</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>196</b>