

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	III
Kurzfassung .....	V
Abstract .....	VII
Inhaltsverzeichnis.....	VIII
Abkürzungen und Formelzeichen.....	XIII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	4
2.1 Metalldrücken .....	4
2.1.1 Einteilung .....	4
2.1.2 Laserunterstütztes Drücken.....	5
2.1.3 Reibdrücken.....	6
2.2 Grundlagen des Thermischen Spritzens .....	10
2.2.1 Verfahrensprinzip .....	12
2.2.1.1 Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) .....	14
2.2.2 Schichtbildungsprozess .....	16
2.2.2.1 Schichthaftung.....	17
2.2.2.2 Schichtstruktur.....	21
2.2.3 Wärmedämmschichten .....	22
2.2.3.1 Zirkoniumoxid .....	24
2.2.3.2 Aluminiumoxid.....	26
2.2.3.3 Haftvermittler.....	27
2.2.4 Nachbehandlung von thermisch gespritzten Schichten.....	28
2.2.4.1 Mechanische Nachbehandlung - Polieren .....	28
2.2.4.2 Thermische Nachbehandlung - Laserumschmelzen.....	29
2.3 Grundlagen der PVD-Technik .....	34
2.3.1 Verfahrensprinzipien.....	35
2.3.1.1 Thermisches Verdampfen (Evaporation).....	36
2.3.1.2 Kathodenzerstäubung (DC-Sputtern) .....	37
2.3.2 Substratvorbehandlung.....	44

2.3.2.1	Mechanische Vorbehandlung .....	44
2.3.2.2	Plasmanitrieren .....	45
2.3.2.3	Plasmaätzen .....	49
2.3.3	Schichtbildungsprozess .....	51
2.3.3.1	Schichthaftung.....	51
2.3.3.2	Schichtwachstum.....	55
2.3.3.3	Schichtstruktur.....	58
2.3.3.4	Schichtarchitekturen.....	61
2.3.4	Hochverschleißfeste temperaturbeständige Schichten.....	65
2.3.4.1	Titanbasierte Verschleißschutzschichten .....	67
2.3.4.2	Chrombasierte Verschleißschutzschichten .....	72
2.4	Kombination von PVD-Technik und thermischem Spritzen.....	76
2.4.1	PVD-Schicht auf HVOF-Schicht .....	77
2.4.1.1	CrN- bzw. TiN-Schicht auf WC-Co-Schicht.....	77
2.4.2	PVD-Schicht auf APS-/RPS-Schicht .....	79
2.4.2.1	DLC- auf ZrO <sub>2</sub> -Schicht.....	80
2.4.2.2	DLC- bzw. MoS <sub>2</sub> -Schicht auf TiO <sub>2</sub> - bzw. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Schicht.....	80
2.4.2.3	TiN- auf Ti/TiN-Schicht .....	81
3	Problemstellung und Zielsetzung .....	83
4	Experimentelles .....	85
4.1	Vorgehensweise .....	85
4.2	Substratwerkstoffe.....	86
4.3	Thermisches Spritzen .....	87
4.3.1	Verwendete thermisch gespritzte Schichten/Spritzpulver .....	87
4.3.2	Substratvorbehandlung.....	89
4.3.3	APS-Anlagentechnik.....	89
4.3.3.1	Beschichtung von Rundproben.....	90
4.3.3.2	Beschichtung von Reibdruckwerkzeugen.....	93
4.3.4	Nachbehandlungsverfahren.....	94
4.3.4.1	Thermische Nachbehandlung.....	94

4.3.4.2	Mechanische Nachbehandlung.....	97
4.4	PVD-Technik.....	99
4.4.1	Verwendete PVD-Schichten.....	99
4.4.2	Substratvorbehandlung.....	100
4.4.2.1	Schleifen und Polieren.....	100
4.4.2.2	Substratnitrierung.....	101
4.4.3	Sputter-Anlagentechnik.....	102
4.5	Reibdruckversuche.....	104
4.6	Methoden zur Schichtcharakterisierung.....	106
4.6.1	Schichtmorphologie.....	106
4.6.1.1	Lichtmikroskopie.....	107
4.6.1.2	Rasterelektronenmikroskopie.....	108
4.6.2	Schichthärte.....	112
4.6.2.1	Vickers-Härteprüfung.....	112
4.6.2.2	Nanoindentation.....	112
4.6.3	Thermische Kennwerte.....	113
4.6.4	Oberflächentopographie.....	114
4.6.5	Verschleißbeständigkeit.....	114
4.6.6	Schichthaftung.....	117
4.6.7	Phasenanalyse.....	119
4.6.8	Eigenspannungsanalyse.....	120
5	Ergebnisse der thermisch gespritzten Schichten.....	122
5.1	Schichtmorphologie und -topographie.....	122
5.2	Schichthärte.....	124
5.3	Wärmeleitfähigkeit.....	124
5.4	Probennachbehandlung.....	125
5.4.1	Mechanische Nachbehandlung.....	125
5.4.2	Thermische Nachbehandlung.....	127
5.4.2.1	ZrO <sub>2</sub> -8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	128
5.4.2.2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	137

5.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung der Ergebnisse.....	143
5.5.1	Mechanische Nachbehandlung.....	143
5.5.2	Thermische Nachbehandlung.....	144
6	Ergebnisse der PVD-Schichten .....	146
6.1	TiAlSiN .....	146
6.1.1	Schichtentwicklung.....	146
6.1.1.1	Targetkonfiguration.....	146
6.1.1.2	Variation der Bias- und Sputtermodi.....	150
6.1.1.3	Variation der Biasspannung .....	154
6.1.1.4	Variation des Al/Ti-Verhältnisses.....	155
6.1.1.5	Zusammenfassung.....	156
6.1.2	Schichthärte.....	157
6.1.3	Schichtmorphologie und -topographie .....	158
6.1.4	Schichteigenstressspannungen .....	160
6.1.5	Schichthaftung.....	161
6.1.6	Verschleißbeständigkeit .....	163
6.2	CrAlSiN.....	167
6.2.1	Schichtentwicklung.....	167
6.2.1.1	Targetkonfiguration.....	168
6.2.1.2	Variation des Al/Cr-Verhältnisses .....	168
6.2.2	Schichthärte.....	169
6.2.3	Schichtmorphologie und -topographie.....	170
6.2.4	Schichteigenstressspannungen .....	172
6.2.5	Schichthaftung.....	172
6.2.6	Verschleißbeständigkeit .....	173
6.3	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse .....	177
7	Ergebnisse der kombinierten Schichtsysteme.....	180
7.1	Einfluss der Vorbehandlungsmethoden auf die Substrateigenschaften	180
7.2	TiAlSiN .....	182
7.2.1	Schichthaftung.....	182

7.2.1.1	Schichtdickenreduzierung .....	185
7.2.1.2	Plasmaätzprozess.....	186
7.2.1.3	Metallische Zwischenlage.....	188
7.2.2	Schichttopographie .....	190
7.2.3	Schichtmorphologie.....	192
7.3	CrAlSiN.....	195
7.3.1	Schichthaftung.....	195
7.3.1.1	Plasmaätzprozess.....	196
7.3.1.2	Metallische Zwischenlage.....	197
7.3.2	Schichttopographie .....	199
7.3.3	Schichtmorphologie.....	201
7.4	Schichthärte .....	202
7.5	Verschleißbeständigkeit.....	204
7.6	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse.....	206
7.6.1	Substratvorbehandlung.....	206
7.6.2	TiAlSiN .....	207
7.6.3	CrAlSiN .....	208
8	Anwendungsversuche im Reibdruckprozess .....	211
8.1	Beschichtung von Reibdruckwerkzeugen .....	212
8.1.1	Thermisches Spritzen.....	212
8.1.2	Mechanische Nachbehandlung.....	214
8.1.3	PVD-Beschichtung .....	214
8.2	Anwendungsversuche .....	216
8.2.1	Temperaturentwicklung.....	216
8.2.2	Materialanhaftungsverhalten .....	218
8.2.3	Werkstückqualität .....	220
8.3	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse.....	222
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	225
10	Literaturverzeichnis .....	230