

## Inhaltverzeichnis

1. Einleitung .....	1
2. Stand der Technik.....	6
2.1. Thermisches Spritzen .....	6
2.1.1. Thermische Spritzverfahren .....	8
2.1.2. Lichtbogenspritzen.....	9
2.2. Superlegierungen.....	11
2.2.1. Nickelbasislegierungen .....	13
2.2.2. Selbstfließende Nickelbasislegierungen.....	14
2.2.3. Eisenbasislegierungen.....	15
2.3. Statistische Versuchsplanung.....	16
2.3.1. $2^k$ -vollfaktorielle Pläne.....	17
2.3.2. $2^{k-p}$ -teilfaktorielle Pläne .....	18
2.3.3. Central Composite Design .....	19
2.3.4. Wünschbarkeit .....	20
2.4. Spezielle Methoden zur Schichtcharakterisierung.....	21
2.4.1. Instrumentierte Eindringung (Nanoindentation) .....	21
2.4.2. Impulsanregungsmethode.....	26
2.5. Eigenspannungen.....	30
2.6. Tribologie .....	33

3. Zielsetzung und Vorgehensweise.....	39
4. Experimentelles.....	44
4.1. Beschichtungsprozess .....	44
4.1.1. Substratgeometrie und –materialien.....	44
4.1.2. Substratvorbehandlung.....	45
4.1.3. Spritzzusätze .....	46
4.1.4. Thermische Spritzanlage .....	47
4.2. Nachbearbeitung.....	48
4.2.1. Schleifen.....	49
4.2.2. Walzen.....	50
4.2.3. Schichtumschmelzen.....	51
4.3. Untersuchungsmethoden.....	53
4.3.1. Online-Messung des Flugverhaltens der Spritzpartikel.....	53
4.3.2. Topologische Untersuchungen .....	53
4.3.3. Morphologische Untersuchungen.....	55
4.3.4. Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop .....	55
4.3.5. Untersuchung der thermischen Eigenschaften .....	56
4.3.6. Untersuchung der mechanischen Eigenschaften .....	57
4.3.6.1. Biegeversuch.....	58
4.3.6.2. Nanoindentationsversuch.....	60
4.3.6.3. Resonanzmethode .....	60

4.3.7. Eigenspannungsmessungen .....	63
4.3.8. Untersuchung der tribologischen Eigenschaften .....	64
4.3.8.1. Standard-Pin-on-Disk-Versuch .....	64
4.3.8.2. 3D-Verschleißtest .....	65
4.3.8.3. Auswertung des Verschleißversuchs .....	67
4.3.8.4. In-situ Verschleißversuche im GK-REM .....	68
5. Parameterstudie .....	70
5.1. Weitere Optimierung der Spritzparameter der WSC-FeCrSi-Schichten ...	71
5.1.1. Spannung und Strom .....	71
5.1.2. Erhöhung des Drucks der beiden Spritzgase .....	76
5.2. Optimierung der Spritzparameter der NiCrBSi- und FeCrBSi-Schichten ....	81
5.2.1. Spritzparameter der FeCrBSi-Schichten .....	84
5.2.1.1. Einflüsse auf die Schichthärte .....	85
5.2.1.2. Einflüsse auf die Schichtdicke .....	87
5.2.1.3. Einflüsse auf die Porosität .....	88
5.2.1.4. Theoretische Auswertung und experimentelle Verifikation der statischen Versuchsplanung .....	92
5.2.2. Spritzparameter der NiCrBSi-Schicht .....	95
5.3. Schlussfolgerung .....	101
6. Bestimmung der mechanischen Eigenschaften .....	103
6.1. Ergebnisse des Vier-Punkt-Biegeversuchs.....	104

6.2. Ergebnisse des Nanoindentationsversuchs .....	106
6.3. Ergebnisse des Impulsanregungsversuchs .....	109
6.4. Vergleich der Ergebnisse aus den drei Messverfahren.....	112
6.5. Fazit .....	114
7. Einflussfaktoren auf die tribologischen Eigenschaften .....	115
7.1. Einfluss der Nachbearbeitung auf das Verschleißverhalten .....	115
7.1.1. Verschleißuntersuchungen an geschliffenen und gewalzten Schichten.....	116
7.1.1.1. Schichttopographie .....	116
7.1.1.2. Schichtmorphologie .....	119
7.1.1.3. Untersuchung des Verschleißverhaltens.....	121
7.1.1.4. Fazit .....	125
7.1.2. Verschleißuntersuchung der NiCrBSi-Schichten nach dem Umschmelzen .....	126
7.1.2.1. Messung des Schmelzpunkts .....	127
7.1.2.2. Schichtmorphologie nach dem Umschmelzen .....	128
7.1.2.3. Verschleißtests .....	133
7.1.2.4. Fazit .....	136
7.1.3. Schlussfolgerung.....	137
7.2. Einfluss der Hartstoffkorngröße auf die tribologischen Eigenschaften .....	138
7.2.1. Schichtmorphologie .....	139

7.2.2. Schichttopographie.....	140
7.2.3. Tribologische Eigenschaften der Schichten mit unterschiedlicher Korngröße der Hartstoffverstärkung .....	142
7.2.4. Fazit.....	146
7.3. Einfluss der Eigenspannungen auf die Verschleißbeständigkeit.....	147
7.3.1. Variation der Eigenspannungen durch Änderung der Schichtdicke .....	148
7.3.2. Einfluss der Rohrdurchmesser auf die Eigenspannungen und Verschleißbeständigkeit .. .	152
7.3.3. Untersuchung des Einflusses der Regelgeometrie auf die Eigenspannungen und Verschleißbeständigkeit mittels robotergestütztem 3D-Veschleißtest .	156
7.3.4. Fazit.....	160
8. In-situ Verschleißtest im GK-REM .....	161
8.1. In-situ Verschleißtest an den WSC-FeCrSi-Schichten .....	162
8.2. In-situ Verschleißtest an einer NiCrBSi-Schicht mit einer Keramikkugel .....	164
8.3. In-situ Verschleißtest an der FeCrBSi-Schicht mit einer Edelstahlkugel	168
8.4. Fazit .....	172
9. Zusammenfassung.....	174
Literaturverzeichnis .....	181