

---

**Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Technik .....	3
2.1	Grundlagen zu PVD-Beschichtungen .....	3
2.1.1	Plasma und Plasmaeigenschaften .....	3
2.1.2	Plasmanitrieren / Duplexverfahren .....	7
2.1.3	Einführung in die PVD-Technologie .....	10
2.1.4	Gestaltung von PVD-Schichten.....	21
2.1.5	Anwendungen von PVD-Hartstoffschichten .....	23
2.2	Tribologische Grundlagen.....	29
2.2.1	Einführung.....	29
2.2.2	Tribologie .....	29
2.2.3	Reibung .....	30
2.2.4	Verschleiß .....	31
2.3	Bionik/Biomimetik .....	34
2.3.1	Historische Einführung .....	34
2.3.2	Bionische Vorbilder für technische Anwendungen.....	36
2.3.3	Käferoberflächen als bionisches Vorbild .....	37
2.4	Chrombasierte PVD-Beschichtungen.....	41
2.4.1	CrAlN .....	41
2.4.2	CrCN .....	44
2.4.3	Cr <sub>2</sub> AlC .....	46
3	Schlussfolgerung, Zielsetzung und Motivation.....	48
4	Experimentelle Verfahren .....	50
4.1	Vorgehensweise und Unterteilung der Arbeit.....	50
4.2	Substratwerkstoff.....	51

4.3	Substratgeometrie und -oberfläche .....	51
4.4	Bionische Strukturen und deren Ursprung .....	52
4.5	Plasmanitrierung .....	55
4.6	PVD-Beschichtung .....	55
4.6.1	Abscheidung des Schichtsystems CrAlN .....	57
4.6.2	Abscheidung des Schichtsystems CrCN.....	57
4.6.3	Abscheidung des Schichtsystems Cr <sub>2</sub> AlC .....	58
4.7	Schichtcharakterisierung / Analysemöglichkeiten .....	59
4.7.1	REM .....	60
4.7.2	EDX.....	60
4.7.3	XRD .....	60
4.7.4	Nanoindenter .....	60
4.7.5	Ritztest .....	61
4.7.6	Tribometer.....	61
4.7.7	Optisches 3D-Profilometer und konfokales Weißlichtmikroskop ...	62
4.8	Einteilung der Versuche.....	63
4.8.1	Optimieren der ternären Schichtsysteme.....	63
4.8.2	Hauptversuche .....	66
4.8.3	Sandstrahluntersuchungen.....	68
4.8.4	Anwendung in der inkrementellen Umformtechnik .....	71
5	Prozessparameteroptimierung der ternären Schichtsysteme.....	73
5.1	Ergebnisse des Schichtsystems CrAlN .....	73
5.2	Ergebnisse des Schichtsystems CrCN .....	79
5.3	Ergebnisse des Schichtsystems Cr <sub>2</sub> AlC.....	85
6	Ergebnisse der Hauptversuche .....	92
6.1	Ritztests (Ebene I) .....	93

6.1.1	Ergebnisse der Ritztests .....	93
6.1.2	Diskussion der Ritztestergebnisse (Ritztest) .....	98
6.2	Mechanische und tribologische Untersuchungen (Ebene II) .....	100
6.2.1	Ergebnisse der Schichthärten .....	100
6.2.2	Ergebnisse der Härte-Elastizitätsmodul-Verhältnisse .....	101
6.2.3	Diskussion der mechanischen Kennwerte .....	102
6.2.4	Ergebnisse der Rauheiten ( $R_z$ ).....	104
6.2.5	Endkonturnahe Beschichtung strukturierter Oberflächen .....	107
6.2.6	Diskussion der Oberflächenbeschaffenheiten .....	109
6.2.7	Ergebnisse der Verschleißkoeffizienten .....	111
6.2.8	Ergebnisse der Reibwerte .....	117
6.2.9	Diskussion der tribologischen Eigenschaften .....	122
6.2.10	Bewertungsmodell.....	128
6.2.11	Analyse der Verschleißspuren strukturierter Proben.....	129
6.3	Sandstrahlversuche (Ebene III) .....	131
6.3.1	Ergebnisse der Sandstrahlversuche.....	131
6.3.2	Diskussion der Ergebnisse.....	135
6.4	Umformversuche (Ebene III) .....	138
6.4.1	Ergebnisse der Umformversuche.....	138
6.4.2	Diskussion der Ergebnisse.....	142
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	144
	Literaturverzeichnis .....	148
	Anhang .....	163