

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Formelzeichenverzeichnis	VIII
1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen	5
2.1. Grundlagen der PVD-Technik.....	5
2.1.1. Verfahrensprinzipien.....	5
2.1.1.1. Kathodenzerstäubung.....	7
2.1.2. Schichtbildung	11
2.1.2.1. Das Plasma	11
2.1.2.2. Ätzprozess.....	13
2.1.2.3. Schichtwachstum.....	14
2.1.3. Schichtarchitekturen.....	19
2.1.3.1. Monolayer.....	19
2.1.3.2. Multilayer	20
2.1.3.3. Nanolaminate / Nanokomposite.....	21
2.2. Nanotechnologie	26
2.2.1. Definition	27
2.2.2. Physikalische Effekte	29
2.2.3. Syntheseprozesse	33
2.2.3.1. Partikelentstehung	35
2.2.3.2. Lichtbogensynthese	37
2.2.4. Erzeugung von Nanopartikelbeams & Transport von Nanopartikeln ins Vakuum	39
2.3. Tribologie.....	44
2.3.1. Reibung.....	45
2.3.2. Schmierung	47
2.3.3. Verschleiß.....	50
2.3.4. Tribosystem Zylinderlaufbahn/Kolbenringe.....	51
3. Stand der Forschung.....	53

3.1.	Dünnschichtmaterialien und Anwendung	53
3.1.1.	Cr-N	55
3.1.2.	Ti-N.....	57
3.1.3.	Mo-N.....	59
3.1.3.1.	Mo Oxide	61
3.1.4.	Mehrkomponentige Dünnschichten	64
3.1.4.1.	Cr-Ti-N	64
3.1.4.2.	Me-Al-N.....	68
3.1.4.3.	nc-MeN/a-SiN.....	69
3.2.	Folgerungen aus dem Stand der Forschung.....	75
3.2.1.	Ausblick.....	75
3.2.2.	Hybride Synthesetechnologien/-verfahren.....	76
4.	Zielsetzung und Lösungsweg	80
4.1.	Problemstellung.....	80
4.2.	Zieldefinition und Vorgehensweise	81
5.	Versuchsdurchführung.....	85
5.1.	Herstellung.....	85
5.1.1.	Substratmaterialien und Probenvorbehandlungen	85
5.1.2.	Abscheidung von PVD-Dünnschichten	86
5.1.2.1.	Abscheidung von CrN-Dünnschichten.....	87
5.1.2.2.	Abscheidung von MoN-Dünnschichten	89
5.1.2.3.	Abscheidung von MoXN-Dünnschichten	90
5.1.3.	Synthese von Nanopartikeln.....	91
5.1.3.1.	Variation der Nanopartikelmaterialien.....	93
5.1.4.	Kopplung von Nanopartikel- und PVD-Synthese zur Herstellung von Kompositschichten	95
5.1.4.1.	Aerodynamische Linsensysteme	96
5.1.4.2.	Injektion von Nanopartikeln in die PVD-Kammer.....	97
5.1.4.3.	Abscheidung von Kompositschichten.....	97
5.2.	Mess- und Analysemethoden.....	102
5.2.1.	Oberflächencharakterisierung.....	103

III Inhaltsverzeichnis

5.2.1.1.	Topographie und Morphologie (REM)	103
5.2.1.2.	Strukturuntersuchung (TEM)	103
5.2.1.3.	Rauheitsmessung	104
5.2.2.	Chemische Analyse	104
5.2.2.1.	Elementanalyse (EDX).....	104
5.2.2.2.	Elementanalyse (WDX).....	104
5.2.2.3.	Tiefenabhängige Zusammensetzung (TOF-SIMS)	105
5.2.2.4.	Elementanalyse (AES).....	105
5.2.3.	Phasenanalyse	105
5.2.3.1.	Phasenzusammensetzung (XRD).....	105
5.2.3.2.	Eigenspannungsanalyse	108
5.2.3.3.	Bindungszustand (XPS)	110
5.2.3.4.	Chemischer-Zustand / Oxidationszustand (XAS)	111
5.2.4.	Analyse der mechanischen Eigenschaften	112
5.2.4.1.	Härte / E-Modul (Nanoindentation)	112
5.2.4.2.	Bruchzähigkeit.....	113
5.2.4.3.	Schichthaftung.....	114
5.2.5.	Tribologische Untersuchungen.....	116
5.2.5.1.	Benetzungsverhalten.....	116
5.2.5.2.	Reibung und Verschleiß (Ball-on-Disc).....	116
5.2.5.3.	Ringstauchversuch	119
5.2.6.	Online-Analyse der Nanopartikel (TEOM, SMPS, ELPI).....	119
6.	Ergebnisse zur Nanopartikelsynthese	121
6.1.	Vorgehensweise	121
6.2.	Charakterisierung von TiN-Nanopartikeln.....	121
6.3.	Einfluss der Syntheseparameter	126
6.3.1.	Stromstärke und Bogenabstand.....	126
6.3.2.	Stöchiometrie des Arbeitsgases und Gasflussrate.....	129
6.4.	Variation des Materials	135
6.4.1.	Nanopartikel aus Übergangsmetallen.....	135
6.4.2.	Nanopartikel aus Kompositmaterialien.....	140
7.	Ergebnisse zur Kopplung von Lichtbogenreaktor und PVD-Anlage	146

7.1.	Funktionstest und Auswirkungen auf die Vakuumqualität	146
7.2.	Auswirkungen der Kopplung auf den Schichtbildungsprozess.....	148
7.3.	Injektion von Nanopartikeln in die PVD-Kammer	155
8.	Ergebnisse zur Injektion von Nanopartikeln in Nitrid-basierte Dünnschichten.....	165
8.1.	Charakterisierung der Nanokompositstruktur	165
8.1.1.	Strukturelle Eigenschaften	165
8.1.1.1.	Auslagerungsversuche	187
8.1.2.	Mechanische Eigenschaften	188
8.1.3.	Tribologische Eigenschaften.....	193
8.1.4.	Zusammenfassung und Fazit	203
8.2.	Einfluss der Abscheidebedingungen	205
8.2.1.	Substrattemperatur	205
8.2.2.	Kammerdruck	211
8.2.3.	Kathodenleistung	215
8.2.4.	Bias-Spannung / Art der Leistungsversorgung	221
8.2.5.	Booster-Spannung / Ionisation	229
8.2.6.	Zusammenfassung: Einfluss Abscheidebedingungen.....	233
8.3.	Einfluss des Eindüsungsetups.....	235
8.3.1.	Kathodensetup / Plasmainteraktion	235
8.3.2.	Substratrotation.....	241
8.3.3.	Variation des Linsensystems & Injektionsabstand	244
8.3.4.	Zusammenfassung: Eindüsungsetup.....	252
8.4.	Einfluss der Nanopartikelmenge & -größe	253
8.4.1.	Aerosolverdünnung.....	253
8.4.2.	NP-Primärpartikelgröße	256
8.4.3.	NP-Agglomeratgröße	258
8.4.4.	Zusammenfassung: Einfluss Nanopartikelmenge & -größe	262
8.5.	Tribologische Eigenschaften.....	263
8.6.	Zusammenfassung und Fazit	265
9.	Ergebnisse zur Entwicklung von MoXN-Dünnschichten	267

V Inhaltsverzeichnis

9.1.	Optimierung der Abscheideparameter	267
9.1.1.	Niedriger Stickstoffpartialdruck	267
9.1.2.	Hoher Stickstoffpartialdruck.....	274
9.1.3.	Gegenüberstellung der tribo-mechanischen Eigenschaften.....	288
9.2.	Einfluss von Legierungselementen	293
9.2.1.	Variation der Legierungselemente.....	293
9.2.2.	Variation des Legierungselementgehaltes.....	304
10.	Ergebnisse zur Synthese von mehrphasigen MoN-basierenden Kompositschichten	322
10.1.	Einfluss der Materialien.....	322
10.1.1.	Variation der PVD-Schicht	322
10.1.2.	Einfluss des Nanopartikelmaterials.....	327
10.2.	Mehrphasige Nanokompositschichten	337
10.2.1.	Mehrphasige Nanopartikel.....	337
10.2.2.	Mehrphasige Dünnschicht	343
10.3.	Zusammenfassung und Fazit.....	349
11.	Zusammenfassung und Ausblick	351
12.	Literaturverzeichnis	358
13.	Lebenslauf.....	400
14.	Publikationsliste	401