

**Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung .....	1
1.1	Motivation und Zielsetzung .....	1
1.2	Erklärung der Vorgehensweise.....	5
2	Wissenschaftliche Grundlagen und technischer Kenntnisstand .....	13
2.1	Oberflächentechniken.....	13
2.1.1	Bearbeitungsverfahren zur Vor- und Nachbehandlung von Bauteiloberflächen .....	14
2.1.1.1	Mechanische Bearbeitungsverfahren.....	15
2.1.1.2	Thermo- bzw. plasmachemische Bearbeitungsverfahren .....	25
2.1.2	Physikalische Gasphasenabscheidung.....	34
2.1.2.1	DC-Kathodenzerstäubung .....	36
2.1.2.2	DC-Magnetron-Kathodenzerstäubung.....	41
2.2	PVD-Schichtsysteme.....	42
2.2.1	Schichtarchitekturen.....	42
2.2.1.1	Ein-Komponenten-Schichtsystem .....	43
2.2.1.2	Mehr-Komponenten-Schichtsystem .....	43
2.2.1.3	Gradiertes Schichtsystem .....	44
2.2.1.4	Nanokomposit-Schichtsystem .....	45
2.2.1.5	Hart/Weich-Kombination und Mehrlagen-Schichtsystem.....	46
2.2.1.6	Gradiertes Mehrlagen-Schichtsystem .....	48
2.2.1.7	Nanoskaliges Mehrlagen-Schichtsystem.....	49
2.2.1.8	Superlattice-Schichtsystem.....	50
2.2.2	Titanbasierte PVD-Einzellagen .....	51
2.2.2.1	TiN- und TiC-Schichten.....	51
2.2.2.2	Ternäre und quaternäre titanbasierte Schichten.....	52

2.2.2.3	TiAlN-Schichten.....	53
2.2.3	Titanbasierte PVD-Mehrlagen-Schichtsysteme .....	55
2.2.3.1	Ti/TiN-Schichtsysteme .....	56
2.2.3.2	TiN/TiAlN-Schichtsysteme.....	57
2.2.3.3	Ti/TiAlN-Schichtsysteme .....	58
2.3	Grundlagen der Eigenspannungsentwicklung und -messung .....	60
2.3.1	Definition und Entstehung von Eigenspannungen .....	60
2.3.2	Röntgenographische Eigenspannungsanalyse.....	63
2.3.3	Ermittlung der Eindringtiefe .....	67
2.4	Wechselwirkungen zwischen Schicht und Substrat .....	70
2.5	Tribologische Grundlagen.....	72
2.5.1	Reibung .....	74
2.5.2	Verschleiß .....	76
2.6	PVD-Dünnschichtsysteme in der Umformtechnik .....	78
3	Experimentelles.....	81
3.1	Substratmaterialien .....	81
3.2	Probenvorbehandlungen .....	82
3.2.1	Metallographische Vorbehandlungen.....	83
3.2.2	Substratplasmanitrierung .....	84
3.2.3	Kugelstrahlen.....	85
3.2.4	Laser-Schock-Verfahren .....	86
3.2.5	Plasmagestütztes Trockenätzverfahren .....	86
3.2.6	Definierter Materialabtrag mittels Elektropolieren .....	88
3.3	Schichtapplikation .....	89
3.3.1	TiAlN-Einzellage .....	92
3.3.2	Ti/TiAlN-Mehrlagen-Schichtsystem.....	94

---

3.4	Probennachbehandlungen .....	96
3.4.1	Nassstrahlen.....	96
3.4.2	Aero-Läppen .....	96
3.4.3	Trockenpolieren .....	97
3.5	Untersuchungsmethoden.....	98
3.5.1	Morphologie- und Topographieuntersuchung .....	98
3.5.2	Strukturanalyse .....	99
3.5.3	Eigenspannungsanalyse.....	100
3.5.4	Untersuchung der mechanischen Eigenschaften .....	101
3.5.5	Untersuchung der tribologischen Eigenschaften .....	103
3.5.6	Untersuchung des Ermüdungsverhaltens.....	104
4	Untersuchung der Substratvorbehandlungen.....	107
4.1	Substrateigenschaften im Ausgangszustand.....	107
4.2	Einfluss der Vorbehandlungsprozesse auf die Eigenspannungen und Topographie des Substrats.....	111
4.3	Untersuchung ausgewählter Stahlsubstrate mit ungleichen Eigen- spannungszuständen .....	117
4.3.1	Untersuchung des tribo-mechanischen Verhaltens .....	117
4.3.2	Strukturelle Eigenschaften.....	123
4.3.3	Erstellung von Eigenspannungstiefenprofilen .....	125
5	Schicht/Substrat-Wechselwirkungen .....	127
5.1	Strukturelle Eigenschaften der Schichtsysteme .....	127
5.2	Eigenspannungsentwicklung in den Verbundsystemen .....	136
5.3	Einfluss der Substratvorbehandlungen auf die tribo-mechanischen Schichteigenschaften .....	141
5.3.1	Härte und Elastizitätsmodul.....	142
5.3.2	Schichthaftung.....	143

5.3.3	Reibung und Verschleiß.....	148
5.4	Einfluss der Substratvorbehandlungen auf das Ermüdungsverhalten.....	155
5.5	Fazit .....	156
6	Einfluss unterschiedlicher Schichtarchitekturen .....	161
6.1	Aufbau und Struktur der unterschiedlichen Schichtsysteme.....	161
6.2	Einfluss des Schichtdesigns auf die Schichteigenstressungen .....	167
6.3	Einfluss des Schichtdesigns auf die tribo-mechanischen Schichteigenschaften .....	170
6.3.1	Härte und Elastizitätsmodul .....	171
6.3.2	Schichthaftung.....	175
6.3.3	Reibung und Verschleiß.....	180
6.4	Einfluss des Schichtdesigns auf das Ermüdungsverhalten .....	185
6.5	Fazit .....	190
7	Untersuchung der Schichtnachbehandlungsprozesse.....	193
7.1	Verwendete Abrasivmedien .....	193
7.2	Strukturelle Veränderungen der nachbehandelten Schichtsysteme ....	196
7.3	Einfluss der Schichtnachbehandlungen auf die Schichteigenstressungen .....	201
7.4	Einfluss der Schichtnachbehandlungen auf die tribo-mechanischen Schichteigenschaften .....	203
7.4.1	Härte und Elastizitätsmodul .....	204
7.4.2	Schichthaftung.....	208
7.4.3	Reibung und Verschleiß.....	211
7.5	Einfluss der Schichtnachbehandlungen auf das Ermüdungsverhalten .....	216
7.6	Fazit .....	218
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	221
A.	Anhang .....	257