

III. Inhaltsverzeichnis

I. Abstract	v
II. Kurzfassung.....	vi
III. Inhaltsverzeichnis	vii
IV. Abkürzungsverzeichnis.....	xi
V. Formelverzeichnis	xv
1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen und Stand der Forschung.....	5
2.1 Umformtechnik	5
2.1.1 Blechwerkstoffe in der Umformtechnik	7
2.1.2 Tribologie in der Umformtechnik.....	8
2.1.2.1 Reibung	11
2.1.2.2 Schmierung.....	16
2.1.2.3 Verschleiß	18
2.1.3 Blechmassivumformung	21
2.1.4 Tribologische Aspekte der Blechmassivumformung	24
2.2 Physikalische Gasphasenabscheidung.....	27
2.2.1 Verfahrensvarianten der PVD-Technologie.....	28
2.2.2 Kathodenzerstäubung	30
2.2.2.1 Gleichstromkathodenzerstäubung.....	32
2.2.2.2 Hochleistungsimpulsmagnetronputtern	35
2.2.2.3 Hybride Prozesse der Kathodenzerstäubung	40
2.3 PVD-Hartstoffschichten	42
2.3.1 Struktureller Aufbau von PVD-Hartstoffschichten	43
2.3.2 Binäre nitridische und karbidische Cr-basierte Systeme	52
2.3.3 CrAlN	56
2.3.4 CrAlCN	63
2.3.5 CrTiCN	66

2.4	PVD-Beschichtungen in der Umformtechnik	67
2.4.1	PVD-Beschichtungen in der Massivumformung.....	70
2.4.2	PVD-Beschichtungen in der Blechumformung.....	74
2.4.3	PVD-Beschichtungen in der Blechmassivumformung	75
2.5	Strukturierte Werkzeugoberflächen.....	77
2.5.1	Verfahren zur Herstellung von strukturierten Werkzeugoberflächen	80
2.5.1.1	Strukturierung durch Laserablation	80
2.5.1.2	Strukturierung durch Fräsbearbeitung.....	81
2.5.2	Strukturierte Funktionsflächen in der Umformtechnik	84
3.	Zielsetzung und methodische Vorgehensweise.....	91
3.1	Schlussfolgerung und Zielsetzung	91
3.2	Methodische Vorgehensweise.....	92
4.	Experimentelles	99
4.1	Eingesetzte Stahlwerkstoffe.....	99
4.1.1	Substratwerkstoff	99
4.1.2	Werkstückwerkstoffe.....	101
4.2	Proben- und Werkzeuggeometrien	105
4.3	Substratvorbehandlung des Schnellarbeitsstahls	107
4.3.1	Wärmebehandlung	107
4.3.2	Mechanische Präparation.....	108
4.4	Bionische Oberflächenstrukturen	109
4.4.1	Entwicklung der bionischen Strukturen	109
4.4.2	Mikrofrästechnologische Herstellung der Strukturen	112
4.5	PVD-Schichtsynthese	115
4.5.1	Vorbehandlungssequenz	115
4.5.2	Schichtsynthese mittels hybrider DC/HiPIMS-Prozesse	118
4.6	Methoden der Versuchsplanung zur Synthese von PVD-Hartstoffschichten	121
4.6.1	Vollfaktorielle Vorarbeiten zur Variation des Kohlenstoffgehalts	122
4.6.2	Reduktion der Einflussfaktoren.....	122
4.6.3	Multikriterielle Optimierung	123
4.6.4	Modellbildung und Verifizierung.....	124
4.7	Inkrementelle Blechmassivumformversuche	124
4.8	Schmierstoff für die Blechmassivumformung.....	127

5. Mess- und Analysemethoden	131
5.1 Strukturelle und chemische Untersuchungen	131
5.1.1 Rasterelektronenmikroskopie	131
5.1.2 Raman-Spektroskopie.....	132
5.1.3 Untersuchungen mittels Synchrotronstrahlung	134
5.1.3.1 Röntgenphotoelektronenspektroskopie	135
5.1.3.2 Hochauflösende Phasenanalyse mittels Röntgenbeugung	141
5.1.4 Röntgenographische Untersuchungen	145
5.2 Mechanische Untersuchungen	148
5.2.1 Härtemessungen	148
5.2.2 Nanoindentation	148
5.2.3 Ritzuntersuchungen	150
5.2.4 Indentationsuntersuchungen	151
5.3 Oberflächen- und Volumencharakterisierung	153
5.4 Tribologische Charakterisierungsmethoden.....	155
5.4.1 Gleitreibungs- und Verschleißuntersuchungen	156
5.4.2 Angepasster Ringstauchversuch	159
6. Untersuchungen zur Synthese hybrider DC/HiPIMS-PVD-Dünnschichten.....	163
6.1 Zielgrößen zur Synthese von PVD-Dünnschichtsystemen für die Blechmassivumformung	164
6.2 Untersuchungen zur Synthese von CrAlN.....	167
6.2.1 Faktorreduktion	168
6.2.2 Optimierung des Eigenschaftsprofils	184
6.2.3 Verifizierung.....	202
6.3 Untersuchungen zur Synthese von CrAlCN	204
6.3.1 Einfluss variierender Kohlenstoffquellen	204
6.3.1.1 Kohlenstoffinkorporation durch Reaktivgas	205
6.3.1.2 Kohlenstoffinkorporation durch Kathodenzerstäubung	220
6.3.1.3 Fazit zur Variation der Kohlenstoffquelle	231
6.3.2 Faktorreduktion	233
6.3.3 Optimierung des Eigenschaftsprofils	247
6.3.4 Verifizierung.....	263
6.4 Untersuchungen zur Synthese von CrTiCN	265
6.4.1 Untersuchungen zum Einfluss der Kohlenstoffinkorporation	265

6.4.2	Faktorreduktion	280
6.4.3	Optimierung des Eigenschaftsprofils	294
6.4.4	Verifizierung.....	310
6.5	Fazit zur Synthese hybrider DC/HiPIMS-PVD-Dünnschichten	311
7.	Aspekte zur Gestaltung strukturierter Werkzeugoberflächen	317
7.1	Fertigung von Mikrostrukturen.....	317
7.2	Funktionalität strukturierter Werkzeugoberflächen	327
7.3	Endkonturgetreue PVD-beschichtete Oberflächenstrukturen.....	332
7.4	Fazit zur Gestaltung strukturierter Werkzeugoberflächen	334
8.	Tribologische Untersuchung der Werkzeugoberflächen	337
8.1	Gleitreibungsverschleiß.....	337
8.2	Angepasster Ringstauchversuch zur Ermittlung der Reibung.....	348
8.3	Fazit der tribologischen Untersuchungen	359
9.	Einsatzverhalten in der Blechmassivumformung.....	363
9.1	Inkrementelle Blechmassivumformversuche	363
9.2	Standzeituntersuchungen für Blechmassivumformprozesse	371
9.3	Fazit des Einsatzverhaltens in Umformversuchen.....	375
10.	Zusammenfassung und Ausblick.....	377
	Literaturverzeichnis	385
	Anhang A	441
	Anhang B	449
	Publikationsliste	451
	Lebenslauf	463