

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation für eine schmierstofffreie Kaltmassivumformung.....	1
1.2 Problemstellung der schmierstofffreien Prozessauslegung	2
1.3 Übergeordnete Zielsetzung für eine schmierstofffreie Prozessführung	2
2 Kenntnisstand	4
2.1 Tribologie	4
2.1.1 Reibung.....	5
2.1.2 Verschleiß	6
2.2 Inkrementelle Kaltmassivumformung - Rundkneten.....	8
2.3 Herstellung von makro- und mikrostrukturierten Umformwerkzeugen	9
2.4 Tribologische Dünnschichten in der schmierstofffreien Kaltumformung.....	11
2.4.1 Übersicht tribologischer Dünnschichten.....	11
2.4.2 Potenzial amorpher Kohlenstoffschichten für Umformwerkzeuge.....	12
2.4.3 Kristallmodifikationen amorpher Kohlenstoffschichten	13
2.4.4 Eigenschaften amorpher Kohlenstoffschichten	14
2.4.5 Tribologische Mechanismen von amorphen Kohlenstoffschichten	16
2.4.6 Einfluss von Eigenspannungen in amorphen Kohlenstoffschichten	17
2.5 Herstellungsverfahren amorpher Kohlenstoffschichten	18
2.5.1 Reaktives Magnetron-Sputter-Verfahren	19
2.5.2 Bildungsmechanismen von a-C:H-Schichten	21
2.6 Statistische Versuchsplanung.....	23
2.6.1 Begriffe der statistischen Versuchsplanung	23
2.6.2 Versuchspläne.....	24
2.6.3 Regressionsmodell	25
2.7 Zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstandes	27
3 Aufgabenstellung, Forschungshypothesen und Lösungsweg.....	29
3.1 Aufgabenstellung	29
3.2 Forschungshypothesen	30
3.3 Lösungsweg.....	30

4	Versuchsprogramm, angewandte Verfahren und Untersuchungsmethoden.....	32
4.1	Substratwerkstoffe und Vorbehandlung.....	32
4.1.1	Probenplanung	32
4.1.2	Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (WKN. 1.2379).....	33
4.1.3	DC-Stahlfolie (WKN. 1.0330).....	34
4.1.4	Silizium Wafer.....	35
4.1.5	Probenvorbehandlung.....	35
4.2	Verwendeter statistischer Versuchsplan	35
4.3	Verfahren zur Schichtabscheidung.....	38
4.4	Methoden zur allgemeinen Schichtcharakterisierung	40
4.4.1	Kalottenschleifverfahren	40
4.4.2	Instrumentierte Eindringprüfung.....	41
4.4.3	Bestimmung der Schichteigenspannungen.....	42
4.4.4	Bestimmung der Schichtzähigkeit	44
4.4.5	Rockwell-C-Eindringprüfung.....	45
4.4.6	Ritzprüfung	46
4.4.7	Optische Glimmentladungsspektroskopie.....	47
4.5	Methoden zur tribologischen Schichtcharakterisierung.....	47
4.5.1	Stift-Scheibe-Tribometer	47
4.5.2	Impact-Tribometer.....	49
4.5.3	Keilreib-Tribometer.....	50
4.5.4	Anwendungsprüfung - Trockenrundkneten	51
4.6	Methoden zur Oberflächen- und Verschleißcharakterisierung.....	52
4.6.1	Rasterelektronenmikroskopie.....	52
4.6.2	Konfokale Laser-Scanning Mikroskopie.....	53
4.6.3	Bildanalytik	54
5	Experimentelle Ergebnisse	55
5.1	Entwicklung eines Abscheideratenmodells anhand des Vorversuchsplans .55	
5.1.1	Ermittelte Einzellagenschichtdicken	55
5.1.2	Berechnete Abscheideraten.....	56
5.1.3	Abscheideratenmodell.....	57
5.2	Grundcharakterisierung des Hauptversuchsplans.....	58
5.2.1	Schichtdicke	58

5.2.2	Schichtmorphologie	59
5.2.3	Chemische Zusammensetzung der amorphen Schichtsysteme	61
5.2.4	Oberflächenrauheit	63
5.2.5	Eindringhärte und elastisches Eindringmodul	64
5.2.6	Schichteigenspannungen	65
5.2.7	Schichtzähigkeit	67
5.2.8	Schichthaftung	69
5.3	Tribologische Charakterisierung des Hauptversuchsplans	72
5.3.1	Schmierstofffreie Gleitreibung	72
5.3.2	Schmierstofffreier Gleitverschleiß	74
5.3.3	Schmierstofffreier Stoßverschleiß	77
5.4	Statistische Korrelationsanalysen ausgewählter Zielgrößen	81
5.4.1	Korrelationsanalysen zum Einfluss der Schichtdicke und Rauheit	81
5.4.2	Korrelationsanalysen im Rahmen der Grundcharakterisierung	82
5.4.3	Korrelationsanalysen zum tribologischen Verhalten	84
6	Regressionsanalysen und Diskussion der Ergebnisse	86
6.1	Regressionsmodelle und Diskussion des Abscheideratenmodells	86
6.2	Regressionsmodelle und Diskussion der Grundcharakterisierung	89
6.2.1	Einflüsse auf die chemische Schichtzusammensetzung	90
6.2.2	Einflüsse auf die mechanischen Schichteigenschaften	93
6.2.3	Einflüsse auf die Schichthaftung	98
6.3	Regressionsmodelle und Diskussion tribologischer Untersuchungen	103
6.3.1	Einflüsse auf die schmierstofffreie Gleitreibung	104
6.3.2	Einfluss auf den schmierstofffreien Verschleiß	107
6.4	Bewertung und Schlussfolgerungen der Regressionsmodelle	112
7	Validierung der Anwendungseignung	115
7.1	Anwendungseignung a-C:H(:W)-beschichteter Mikrotexturen	115
7.1.1	Beschichtete Mikrotextrurvarianten	115
7.1.2	Schichthaftung auf den Mikrotexturen	115
7.1.3	Keilreibversuche zur Beurteilung der Adhäsionsneigung	116
7.1.4	Impact-Versuche zur Beurteilung des Stoßverschleißes	118
7.1.5	Inkrementelle Anwendungsprüfung von Schicht-Mikrotextrurvarianten	119
7.2	Untersuchte Entwicklungsstufen von Rundknetwerkzeugen	120

7.2.1	Inkrementelle Anwendungsprüfung der Werkzeugentwicklungsstufen.....	120
7.2.2	Prozesskräfte, Werkstückqualität und Partikelanalyse	121
7.2.3	Schichtverschleißanalysen der Werkzeugentwicklungsstufen.....	124
7.2.4	Ergänzende Überlegungen	129
7.2.5	Formintegrität der Makrostrukturierung und Mikrotexturen	130
7.3	Fazit anwendungsnaher Untersuchungen	131
7.3.1	Fazit zum Textureinfluss	131
7.3.2	Fazit zu den Ergebnissen, Regressionsmodellen und Anwendungseignung.....	132
8	Zusammenfassung und Ausblick	137
8.1	Zusammenfassung	137
8.2	Ausblick.....	141
9	Literaturverzeichnis	145
10	Liste Studentischer Arbeiten.....	165
Anhang	166