

# Inhaltsverzeichnis

## Content

<b>0</b>	<b>Zeichen, Einheiten und Benennungen .....</b>	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>5</b>
2.1	Hauptspindeln und Lagertechnologie für Werkzeugmaschinen.....	5
2.2	Tribologisches System Spindellager .....	7
2.2.1	Grundlagen des Spindellagers.....	7
2.2.2	Kinematik und Betriebsverhalten des Spindellagers .....	10
2.2.3	Reibung im Spindellager.....	12
2.2.4	Kontaktbedingungen, Schadensmechanismen und Ausfallursachen .....	13
2.3	Schmierungs-technologie für Werkzeugmaschinenhauptspindeln.....	16
2.3.1	Schmierungsanforderungen.....	16
2.3.2	Schmierstoffe.....	16
2.3.3	Schmierungsarten und -systeme.....	17
2.3.4	Einsatzgrenzen der Schmierungsprinzipien .....	20
2.4	PVD-Beschichtungen für Spindellager .....	22
2.4.1	Prozesstechnologie für Dünnschichten .....	22
2.4.2	Schadensmechanismen und -formen bei Beschichtungen.....	23
2.4.3	Herausforderungen der Lagerbeschichtung.....	24
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung.....</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Grundlagen der experimentellen Untersuchung .....</b>	<b>29</b>
4.1	Messtechnischer Aufbau zur Untersuchung des Schmierungs-zustands.....	29
4.1.1	Identifikation des Schmierungs-zustands .....	29
4.1.2	Verfahren zur Untersuchung des Schmierungs-zustands.....	32
4.1.3	Auslegung und messtechnischer Aufbau .....	35
4.2	Prüfstandstechnische Aufbauten.....	37
4.2.1	Aufbau der Einzellagerprüfstände und des Tribometers.....	37
4.2.2	Aufbau der Prüfspindel .....	39
4.3	Vorstellung der verwendeten Schmierstoffe .....	40
4.4	Vorstellung der Prüfkörper und der Prüfstandsprogramme .....	41
4.4.1	Versuchsprogramm der Prüfspindel.....	41
4.4.2	Versuchsprogramm zur Analyse des Schmierungs-zustands.....	42
4.4.3	Versuchsprogramm der Grundlagenuntersuchungen an Triboscheiben.....	43
4.4.4	Versuchsprogramm der Spindellager .....	43
<b>5</b>	<b>Belastungs- und Schmierungs-zustände von Spindellagern.....</b>	<b>47</b>
5.1	Bestimmung des Belastungs-zustands von Spindellagern .....	47
5.1.1	Lagerlasten bei Schnittparametern im Bereich der Herstellerangaben.....	47
5.1.2	Lagerlasten bei Schnittparametern oberhalb der Herstellerangaben.....	48
5.1.3	Auswertung der Lagerlasten während der Zerspanung.....	49
5.1.4	Kinematische Bedingungen unter kombinierter Last .....	49
5.2	Analyse der Einflussparameter auf den Schmierungs-zustand.....	50
5.2.1	Plausibilität der ermittelten Messwerte .....	50

5.2.2	Verhalten bei varianten Betriebsbedingungen.....	51
5.2.3	Verhalten bei konstanten Betriebsbedingungen.....	53
5.2.4	Verhalten bei Mangelschmierung.....	54
5.3	Fazit des Betriebsverhaltens hinsichtlich des Schmierzustands.....	55
<b>6</b>	<b>Tribologisches Verhalten beschichteter Spindellager bei EHD- und Mangelschmierung.....</b>	<b>57</b>
6.1	Simulative Betrachtung zentraler Einflussfaktoren auf die Spannungsverläufe im Wälzkontakt.....	57
6.1.1	Eigenschaften des Beschichtungswerkstoffs und Schichtstärke.....	58
6.1.2	Bohrbewegung.....	60
6.1.3	Mikrokontaktgeometrie.....	61
6.1.4	Fazit der Simulationen.....	62
6.2	Hartstoffschichten zur Reibungs- und Verschleißreduktion.....	62
6.2.1	Amorphe Kohlenstoffbeschichtung a-C:H:W.....	64
6.2.2	Chromaluminiumnitrid-Beschichtung (Cr <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> )N.....	65
6.2.3	Vergleich der Schichteigenschaften.....	65
6.2.4	Benetzungsverhalten von Schmierstoffen auf PVD-beschichteten Oberflächen.....	66
6.3	Experimentelle Qualifizierung am Analogiebauteil Triboscheibe.....	69
6.3.1	Grundlagenuntersuchungen an Triboscheiben.....	70
6.3.2	Fazit der Grundlagenuntersuchungen an Triboscheiben.....	74
6.4	Experimentelle Qualifizierung im Spindellager.....	75
6.4.1	Einfluss der Beschichtung auf das Lager.....	75
6.4.2	Schichtanpassung und Untersuchungen der a-C:H:W <sub>DC</sub> -Beschichtung.....	77
6.4.3	Untersuchungen der a-C:H:W <sub>Puls</sub> -Beschichtung.....	83
6.4.4	Untersuchungen der CrAlN-Beschichtung.....	87
6.4.5	Notlaufeigenschaften beschichteter Spindellager.....	90
6.4.6	Einsatz beschichteter Spindellager im Feld.....	92
6.5	Fazit der Untersuchungen.....	94
<b>7</b>	<b>Vermeidung von Überschmierzuständen mittels Direktschmierung.....</b>	<b>97</b>
7.1	Berechnungsgrundlagen der Schmierstoffzufuhr.....	97
7.1.1	Berechnung eines Kapillarsystems mit stationärer Strömung.....	98
7.1.2	Berechnung eines Kapillarsystems mit instationärer Strömung.....	100
7.2	Aufbau und Untersuchung der Direktschmierungssysteme.....	102
7.2.1	Druckloses Direktschmierungssystem.....	102
7.2.2	Druckbeaufschlagtes Direktschmierungssystem.....	105
7.3	Aufbau und Untersuchung direktgeschmierter Werkzeugmaschinen-spindeln.....	110
7.3.1	Einsatz eines drucklosen Direktschmierungssystems.....	110
7.3.2	Einsatz eines druckbeaufschlagten Direktschmierungssystems.....	114
7.3.3	Vergleich von Direktschmierung und Öl-Luft-Schmierung.....	116
7.4	Einfluss der Direktschmierung auf die Bearbeitungseigenschaften.....	117
7.5	Fazit der Untersuchungen.....	121
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>123</b>
<b>9</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>129</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>143</b>