

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Vision einer effizienten und umweltverträglichen Werkzeugmaschine .....	3
1.2	Vom Modell zum System .....	4
1.3	Einflüsse der Gesetzgebung auf die technologischen Entwicklungen .....	5
1.4	Exemplarische Ergebnisse der Forschungsarbeiten .....	6
	Quellenverzeichnis .....	13
<b>2</b>	<b>Aufbau und Belastung tribologischer Systeme .....</b>	<b>17</b>
2.1	Tribologische Grundlagen .....	17
2.2	Tribosysteme in der Werkzeugmaschine .....	19
2.2.1	Getriebe .....	19
2.2.2	Linearführungen .....	21
2.2.3	Kugelgewindetrieb .....	21
2.2.4	Wälzlager .....	23
2.2.5	Hydraulische Verdrängereinheit .....	24
2.2.6	Zerspanung .....	25
2.2.7	Kaltumformung .....	27
2.3	Konventionelle Tribosysteme und der Ansatz des SFB 442 .....	28
	Quellenverzeichnis .....	28
<b>3</b>	<b>Entwicklung umweltverträglicher Schmierstoffe .....</b>	<b>31</b>
3.1	Schmierstoffsynthese .....	31
3.1.1	Grundgedanke der aktuellen Diskussion um die Entwicklung biogener Schmierfluide .....	34
3.1.2	Die verwendeten Edukte .....	35
3.1.3	Mögliche Reaktionen von Oleochemikalien .....	35
3.1.4	Selektion von Reaktionssystem und Katalysatoren .....	38
3.1.5	Prozessbegleitende Analytik .....	40
3.1.6	Prozessoptimierung und Scale-Up .....	43

3.1.7	Ökobilanzanalyse der synthetisierten Schmierstoffe .....	45
3.1.8	Neue Verfahrensweisen zur Oxidation und weiteren Funktionalisierung von Oleochemikalien in überkritischem Kohlendioxid .....	47
3.1.9	Zusammenfassung und Fazit .....	58
3.2	Synthesebegleitende ökotoxikologische und toxikologische Risikobewertung .....	59
3.2.1	Biologische Testverfahren .....	60
3.2.2	Chemische Analytik .....	64
3.2.3	Untersuchungen zur synthesebegleitenden Prozessoptimierung .....	66
3.2.4	Zusammenfassende Bewertung der entwickelten Schmierstoffe .....	76
	Quellenverzeichnis .....	77
<b>4</b>	<b>Entwicklung neuer PVD-Beschichtungen .....</b>	<b>83</b>
4.1	Einleitung .....	83
4.2	Methodik der Schichtentwicklung .....	84
4.2.1	Anforderungen an die Entwicklung von Dünnschichtsystemen für Bauteile .....	85
4.2.2	Anforderungen an die Entwicklung von Dünnschichtsystemen für Werkzeuge .....	86
4.3	Grundlagen der PVD-Technologie .....	87
4.3.1	Entwicklungen in der PVD-Technologie .....	87
4.3.2	Grundlagen der PVD-Technologie .....	88
4.4	Prüfverfahren .....	90
4.4.1	Schichteigenschaften .....	91
4.4.2	Verbundeigenschaften .....	92
4.4.3	Systemeigenschaften .....	92
4.4.4	Anwendungsnahe Prüfung .....	95
4.4.5	Plasmadiagnostik .....	95
4.5	PVD-Schichten für umweltfreundliche Tribosysteme .....	96
4.5.1	Gradiertes Zirkoniumkarbid $ZrC_g$ .....	96
4.5.2	Das Niedertemperaturschichtsystem $CrAlN$ .....	105
4.5.3	$(Ti,Al)N$ und $(Ti,Al)N/Al_2O_3$ für Zerspanaufgaben .....	114
4.5.4	Das Hochtemperaturschichtsystem $TiHfCrN$ .....	122
4.6	Zusammenfassung und Fazit .....	131
	Literaturverzeichnis .....	133
<b>5</b>	<b>Grundlagenuntersuchungen .....</b>	<b>137</b>
5.1	Grundlagenuntersuchungen für den schmierstoffoptimierten Betrieb .....	137
5.2	Gebrauchsbedingte Veränderungen der Schmierstoffeigen- schaften und Bewertung der Umweltverträglichkeit .....	154

5.2.1	Veränderung der rheologischen Eigenschaften .....	154
5.2.2	Toxikologische und ökotoxikologische Charakterisierung .....	161
	Quellenverzeichnis .....	170
<b>6</b>	<b>Bauteiluntersuchungen .....</b>	<b>173</b>
6.1	Umweltverträgliche Tribosysteme in Getrieben .....	173
6.1.1	Tragfähigkeitsuntersuchungen .....	173
6.1.2	Grundlagenuntersuchungen .....	180
6.1.3	Theoretische Arbeiten .....	187
6.2	Wälzlager, Linearführungen und Kugelgewindetriebe für den schmierstoffoptimierten Betrieb .....	190
6.2.1	Spindellageruntersuchungen .....	191
6.2.2	Tribometerversuche .....	192
6.2.3	Theoretische Untersuchungen der Lastbedingungen und Schichthaftung .....	194
6.2.4	Analyse der Betriebseigenschaften beschichteter Spindellager .....	196
6.2.5	Linearführungs- und Kugelgewindetriebsuntersuchungen .....	201
6.2.6	Untersuchung von Linearführungssystemen .....	203
6.2.7	Untersuchung von Kugelgewindetrieben .....	205
6.3	Tribologische Untersuchungen an beschichteten Wälzla- gern unter Berücksichtigung der Schmierfilmeigenschaften .....	209
6.3.1	Verschleißkritische Untersuchungen .....	209
6.3.2	Ermüdungskritische Untersuchungen .....	214
6.3.3	Einfluss der Schichtstruktur auf die Wirkungsweise der PVD-Beschichtungen im Wälzlagereinsatz .....	216
6.3.4	Einfluss von Partikeln auf den Wälzlagerbetrieb .....	220
6.3.5	Riffelbildungsuntersuchungen .....	221
6.3.6	Schmierfilmbildung umweltverträglicher Ester .....	222
6.3.7	Reibwertuntersuchungen .....	224
6.3.8	Zusammenfassung und Ausblick .....	225
6.4	Hydraulische Verdrängereinheit .....	226
6.4.1	Aufbau der Versuchspumpe .....	226
6.4.2	Tribosystem Kolben/Buchse .....	228
6.4.3	Optimierung des Tribosystems Kolben/Buchse .....	229
6.4.4	Prüfstandsversuche des Tribosystems Kolben/Buchse .....	231
6.4.5	Zusammenfassung .....	235
6.5	Umweltverträgliche Zerspantung mit geometrisch bestimmter Schneide .....	236
6.5.1	Einleitung .....	236
6.5.2	Esteröle als Kühlschmierstoffe in der Zerspantechnik .....	236
6.5.3	Hochleistungs-PVD-Schichtsysteme für das Boh- ren, Drehen und Fräsen .....	238

6.5.4	Untersuchungen zu den Ursachen, die zur Entschichtung beschichteter Werkzeuge führen .....	239
6.5.5	Analyse des Verschleißverhaltens nanostrukturierter Hartstoffschichten auf PCBN-Werkzeugen .....	245
6.5.6	Zusammenfassung und Fazit .....	253
6.6	Umweltfreundliche Tribosysteme in der Umformtechnik .....	253
6.6.1	Einleitung .....	253
6.6.2	Vorstellung der Ergebnisse .....	254
6.6.3	Erforschung umweltverträglicher Additive für Umformschmierstoffe .....	265
6.6.4	Zusammenfassung und Fazit .....	272
	Quellenverzeichnis .....	273
<b>7</b>	<b>Untersuchung komplexer Baugruppen einer Werkzeugmaschine .....</b>	<b>277</b>
7.1	Prozesskette Schmierstoffsynthese .....	277
7.1.1	Rückkopplungsoptimierung der Schmierstoffsynthese .....	278
7.1.2	Zusammenfassung .....	281
7.2	Alterungsprüfstand .....	282
7.2.1	Zielsetzung und Versuchsträger .....	282
7.2.2	Prüfstands Aufbau und Vorgehen .....	284
7.2.3	Vorversuche .....	286
7.2.4	Versuchsergebnisse .....	287
7.2.5	Ökotoxikologische Charakterisierung der gebrauchsbedingten Veränderungen der Schmier- stoffeigenschaften .....	292
7.2.6	Wälzlagereinsatz in einer Axialkolbenpumpe .....	294
7.2.7	Zusammenfassung und Fazit .....	298
7.3	Prozesskette Getriebe .....	298
7.3.1	Tragfähigkeitsuntersuchungen an einem Industriegetriebe .....	298
7.3.2	Effizienzuntersuchungen am Getriebe .....	306
7.3.3	Untersuchung des neuartigen Getriebe-Esters HISM/HIGTS .....	309
7.4	Abbildung einer umweltverträglichen Prozesskette zur Fertigung von Zahnrädern .....	312
7.4.1	Aufbau und Arbeitspakete der Prozesskette .....	313
7.4.2	Tribologische Untersuchungen beim Feinschneiden der Zahnradrohlinge .....	314
7.4.3	Spanende Bearbeitung feingeschnittener Zahnräder .....	319
7.4.4	Ökotoxikologische Charakterisierung der gebrauchsbedingten Veränderungen der Schmier- stoffeigenschaften .....	323
7.4.5	Zusammenfassung und Fazit .....	325
7.5	Zusammenführung der erarbeiteten SFB-Ergebnisse in einem Bearbeitungszentrum .....	326

7.5.1	Vorschubantriebssysteme .....	328
7.5.2	Hauptspindelsysteme .....	333
7.5.3	Bohren und Fräsen unter Einsatz von Esteröl als Kühlschmierstoff auf einem Bearbeitungszentrum .....	337
7.5.4	Ökotoxikologische Charakterisierung der gebrauchsbedingten Veränderungen der Schmierstoffeigenschaften .....	341
7.5.5	Zusammenfassung und Fazit .....	342
	Quellenverzeichnis .....	343
<b>8</b>	<b>Erfassung tribologischer Zusammenhänge und Erkenntnisse in einer Datenbank .....</b>	<b>347</b>
	Quellenverzeichnis .....	364
<b>9</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>365</b>
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>369</b>