

Inhalt

1 Einleitung	1
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
2 Aufbau und Belastung tribologischer Systeme	17
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
3 Entwicklung umweltverträglicher Schmierstoffe	31
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
4	Entwicklung neuer PVD-Beschichtungen	83
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	Anwendungsnaher 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 ₂ O ₃ für Zerspanaufgaben	114
4.5.4	Das Hochtemperaturschichtsystem TiHfCrN	122
4.6	Zusammenfassung und Fazit	131
	Literaturverzeichnis	133
5	Grundlagenuntersuchungen	137
5.1	Grundlagenuntersuchungen für den schmierstoffoptimierten Betrieb	137
5.2	Gebrauchsbedingte Veränderungen der Schmierstoffeigenschaften und Bewertung der Umweltverträglichkeit	154

5.2.1	Veränderung der rheologischen Eigenschaften	154
5.2.2	Toxikologische und ökotoxikologische Charakterisierung	161
	Quellenverzeichnis	170
6	Bauteiluntersuchungen	173
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 Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide	236
6.5.1	Einleitung	236
6.5.2	Esteröle als Kühlsmierstoffe in der Zerspanetechnik	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
7	Untersuchung komplexer Baugruppen einer Werkzeugmaschine	277
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	Prüfstandsaufbau und Vorgehen	284
7.2.3	Vorversuche	286
7.2.4	Versuchsergebnisse	287
7.2.5	Ökotoxikologische Charakterisierung der gebrauchsbedingten Veränderungen der Schmierstoffeigenschaften	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 Schmierstoffeigenschaften	323
7.4.5	Zusammenfassung und Fazit	325
7.5	Zusammenführung der erarbeiteten SFB-Ergebnisse in einem Bearbeitungszentrum	326

Inhalt	xi
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
8 Erfassung tribologischer Zusammenhänge und Erkenntnisse in einer Datenbank	347
Quellenverzeichnis	364
9 Fazit	365
Sachverzeichnis	369