

# Tribologische Untersuchungen von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten für den Einsatz in reibkraftschlüssigen Antrieben

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kenntnisstand .....</b>	<b>5</b>
2.1	Grundlegende Aspekte der Tribologie .....	5
2.1.1	Übersicht.....	5
2.1.2	Reibung .....	6
2.1.3	Verschleiß.....	9
2.1.4	Prüftechnik.....	13
2.2	Ultraschallantriebe.....	18
2.2.1	Allgemeines .....	18
2.2.2	Funktionsweise .....	19
2.2.2.1	Wanderwellenmotor.....	19
2.2.2.2	Micro-Push-Motor .....	23
2.2.3	Anwendungsfelder.....	25
2.2.4	Besondere mechanische Bedingungen.....	26
2.2.4.1	Kontaktmodelle.....	26
2.2.4.2	Beanspruchungskollektiv und tribologische Parameter.....	28
2.2.4.3	Beispiel Wanderwellenmotor.....	30
2.3	Hochfrequenz-Tribologie .....	31
2.3.1	Reibwerte.....	31
2.3.2	Hochfrequenz-Reibung .....	32
2.3.3	Hochfrequenz-Verschleiß.....	37
2.3.3.1	Verschleißmechanismen .....	37
2.3.3.2	Erkenntnisse aus Verschleißprüfungen.....	40
2.4	Reibwerkstoffe für Ultraschallantriebe .....	43
2.4.1	Hart/weich-Paarungen .....	44
2.4.2	Hart/hart-Paarungen.....	47
2.4.3	Werkstofftechnische Verbesserungen von Polymerwerkstoffen.....	50

2.5	Folgerungen .....	52
2.5.1	Fragestellungen zum hochfrequenten Reibungsverhalten .....	52
2.5.2	Fragestellungen zum Hochfrequenz-Verschleißverhalten .....	54
2.5.2.1	Charakterisierung von Hochfrequenz-Verschleiß .....	54
2.5.2.2	Verschleiß-Hypothesen .....	55
2.5.3	Fragestellungen zu den Reibwerkstoffen .....	57
2.5.4	Werkstoffauswahl .....	57
2.5.4.1	Stahl/Polymer-Paarungen .....	57
2.5.4.2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	59
2.5.5	Anforderungsprofil für ein Hochfrequenz-Tribometer .....	60
<b>3</b>	<b>Prüftechnik .....</b>	<b>62</b>
3.1	Aufbau des Hochfrequenz-Tribometers .....	62
3.2	Eigenschaften des Hochfrequenz-Tribometers .....	65
3.2.1	Prüfkörper-Geometrie und Flächenpressungen .....	65
3.2.2	Schwingungsanregung und unerwünschte Eigenschwingungen .....	67
3.2.3	Schwingungsberechnung der Hochfrequenz-Anregeeinheit .....	69
3.2.4	Geschwindigkeiten .....	71
3.2.5	Meßtechnik .....	72
3.3	Prüfbedingungen .....	75
3.4	Prüfkörperbearbeitung .....	76
3.5	Auswertung der Prüfungen .....	77
<b>4</b>	<b>Reibungsuntersuchungen .....</b>	<b>79</b>
4.1	Hochfrequente Reib- und Normalkräfte unterschiedlicher Werkstoffpaarungen .....	79
4.2	Analyse der hochfrequenten Reib- und Normalkräfte .....	83
4.3	Hochfrequenz-Reibwerte .....	87
4.4	Kontaktmechanik und hochfrequente Reibung .....	94
4.4.1	Topographie und vollständiges Gleiten .....	94
4.4.2	Kontaktmechanisches Modell hochfrequenter Reibung .....	98
4.5	Geschwindigkeitsabhängigkeit des Hochfrequenz-Reibwertes .....	104
4.6	Zusammenfassung .....	107

<b>5</b>	<b>Verschleißuntersuchungen .....</b>	<b>109</b>
5.1	Vorgehensweise .....	109
5.2	Verschleißverhalten von Stahl/Polymer-Paarungen .....	110
5.2.1	100Cr6/PA6 .....	110
5.2.2	100Cr6/PTFE .....	111
5.2.3	100Cr6/PTFE + 10wt% KF .....	112
5.2.4	100Cr6/PI .....	115
5.2.5	100Cr6/PI + 30wt% PTFE .....	116
5.2.6	100Cr6/PI + 20wt% KF .....	118
5.2.7	100Cr6/PI + 20wt% KF + 20wt% PTFE .....	120
5.2.8	Charakterisierung der Verschleißerscheinungsformen .....	122
5.2.9	Bewertung der Verschleißmechanismen und -Hypothesen .....	125
5.2.10	Verschleißerscheinungsformen eines Wanderwellenmotors .....	128
5.2.11	Zusammenfassung .....	131
5.3	Verschleißverhalten der Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Paarung .....	133
5.3.1	Zusammenfassung .....	139
<b>6</b>	<b>Parameterstudien .....</b>	<b>140</b>
6.1	Zeitliches Verschleißverhalten .....	140
6.2	Einfluß der Schwingungsamplitude auf das Verschleißverhalten .....	144
<b>7</b>	<b>Folgerungen .....</b>	<b>148</b>
7.1	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Anwendungen .....	148
7.2	Werkstoffauswahl für hochfrequente Tribosysteme .....	150
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>156</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>161</b>

<b>Anhang .....</b>	<b>A 1</b>
10.1 Liste von Reibwerkstoffen.....	A 1
10.2 Bestimmung des Übergangs vom partiellen Gleiten zum vollständigem Gleiten	A 2
10.3 Schwingungsberechnung des Anregesystems .....	A 3
10.4 Software-Beschreibung .....	A 7