

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Problemstellung.....	5
1.3 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit.....	8
2 Theoretische Grundlagen	11
2.1 Tribologische Grundbegriffe	11
2.1.1 Aufbau eines tribologischen Systems.....	12
2.1.2 Reibung.....	12
2.1.3 Verschleiß.....	14
2.2 Wälzlager.....	17
2.2.1 Bauformen	18
2.2.2 Beanspruchung im Wälzkontakt	20
2.2.3 Wälzlagerwerkstoffe	24
2.3 Schmierung von Wälzlagern.....	25
2.3.1 Wälzlagerschmierstoffe.....	26
2.3.2 Der Schmierfilmaufbau	30
2.3.3 EHD-Berechnung.....	32
2.4 Ermüdung von Wälzlagern	37
2.4.1 Ermüdungsmechanismen	39
2.4.2 Gefügeveränderungen	41
2.4.3 White Etching Crack-Schäden.....	46
2.5 Stromdurchgang in Wälzlagern.....	50
2.5.1 Ursachen für Stromdurchgang	50
2.5.2 Das elektrische Verhalten von Wälzlagern.....	52
2.5.3 Stromdurchgangsschäden.....	56
2.6 Alterung von Schmierstoffen	61
2.6.1 Reaktionsmechanismen	63
2.6.2 Antioxidantien	67
2.6.3 Detergent- und Dispersantadditive.....	69

2.7	Tribochemischer Schichtaufbau	74
2.7.1	Einsatzbereiche und Funktion schichtbildender Additive	75
2.7.2	Zinkdialkyldithiophosphate.....	80
2.7.3	ZDDP-Zerfallsprodukte und Tribofilmaufbau.....	81
3	Konzeption und Aufbau des Prüfstands.....	87
3.1	Grundlegender mechanischer Aufbau	89
3.2	Aufbau des Schmierystems.....	91
3.3	Elektrische Zusatzbelastung	93
4	Material und Methoden.....	97
4.1	Auswahl der eingesetzten Schmierstoffe	97
4.2	FTIR-Analyse des Schmierstoffs	98
4.2.1	Grundlagen der IR-Spektroskopie.....	101
4.2.2	Versuchsaufbau zur in situ Analyse	104
4.2.3	Aufnahme und Auswertung von Seriadaten	107
4.2.4	Ausgewertete Absorptionsbanden.....	112
4.2.5	Validierung der Methode	116
4.3	Analyse des Reibungszustandes	118
4.3.1	Das Viskositätsverhältnis κ	119
4.3.2	Der Schmierfilmdickenparameter λ	121
4.4	Metallografische Auswertung der Versuchslager	125
5	Untersuchung des tribochemischen Schichtaufbaus	127
5.1	In situ IR-Analyse ohne elektrische Zusatzbelastung	130
5.1.1	Tribochemisches Einlaufverhalten	130
5.1.2	Chemische Reaktionen bei Mischreibungsbetrieb.....	133
5.1.3	Neutralisationsreaktionen überbasischer Detergentien	137
5.2	Das Spannungsverhalten bei elektrischer Zusatzbelastung	139
5.2.1	Das Spannungsverhalten bei konstanter Drehzahl.....	142
5.2.2	Das Spannungsverhalten bei veränderlicher Drehzahl ..	145
5.3	Abschließende Beurteilung der Versuchsergebnisse	148

6	Wälzlagerschäden bei elektrischer Zusatzbelastung	151
6.1	Ermüdungsschäden ohne weiß anätzende Bereiche.....	154
6.2	White Etching Crack-Schäden.....	158
6.2.1	Der Einfluss der Schmierstoffmenge.....	159
6.2.2	Der Einfluss des elektrischen Arbeitspunktes	163
6.2.3	Der Einfluss der Schmierstoffformulierung.....	165
6.2.4	Der Einfluss der Grenzschichtausbildung	166
7	Erkenntnisse zum WEC-Schadensmechanismus.....	171
7.1	Die chemische bzw. tribochemische Komponente	176
7.1.1	Das Lager als chemischer Reaktor	179
7.1.2	Reaktionskinetik und kritische Reaktions- bedingungen	180
7.1.3	Die Verteilung des Schmierstoffs innerhalb des Lagers.....	182
7.2	Die elektrische Komponente.....	187
7.2.1	Quellen elektrischer Potentiale	190
7.2.2	Triboelektrische Aufladung in Wälzlagern.....	191
7.2.3	Diskussion „stromfreier“ WEC-Ausfälle.....	195
7.3	Abschließende Beurteilung des WEC-Schadens- mechanismus	199
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	205
9	Summary and Outlook.....	211
10	Literaturverzeichnis.....	215