

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnisxi

1 Einleitung 1

 1.1 Motivation.....1

 1.2 Hintergrund und Ausgangssituation 3

 1.3 Kernfragen und Zielsetzung..... 5

 1.4 Einsatz eines Ringschmiersystems – die Grundidee.....8

 1.5 Aufbau der Arbeit.....11

2 Grundlagen und Stand der Technik15

 2.1 Die Schmierung von Wälzlagern15

 2.1.1 Aufgaben und Potenziale der Schmierung.....15

 2.1.2 Schmierstoffe17

 2.1.2.1 Mineralische Grundöle.....18

 2.1.2.2 Synthetische Grundöle18

 2.1.2.3 Additive19

 2.1.3 Fettschmierung 21

 2.1.3.1 Überblick 21

 2.1.3.2 Wesentliche Eigenschaften 22

 2.1.3.3 Fettgebrauchsdauer 23

 2.1.3.4 Schmierverfahren bei Fettschmierung 23

 2.1.4 Ölschmierung..... 25

 2.1.4.1 Wesentliche Eigenschaften und Einsatzbereiche 25

 2.1.4.2 Ölwechselfrist 26

 2.1.4.3 Schmierverfahren bei Ölschmierung..... 26

 2.1.5 Betriebsinduzierte Schmierstoffveränderungen 30

 2.1.5.1 Überblick 30

 2.1.5.2 Thermisch-oxidative Alterung 32

 2.2 Die Schmierstoffversorgung von Gleitlagern und Wälzlagern
 mittels loser Ölförderringe..... 34

 2.2.1 Einsatz in Gleitlagerungen 34

 2.2.1.1 Experimentelle Ansätze 34

 2.2.1.2 Analytische Ansätze 38

 2.2.1.3 Normative Regelung.....40

 2.2.2 Einsatz in Wälzlagerungen41

3 Fazit und Handlungsbedarf..... 45

- 4 Prüfstand und Prüflagerung 49**
 - 4.1 Konstruktiver Aufbau der Prüfeinrichtung 49
 - 4.1.1 Mechanischer Aufbau des Prüfstands 49
 - 4.1.2 Mechanischer Aufbau der Prüflagerung 51
 - 4.1.2.1 Rahmenbedingungen.....52
 - 4.1.2.2 Aufbau und Funktionsweise.....52
 - 4.1.3 Temperiereinrichtung55
 - 4.2 Technische Daten der Prüfeinrichtung 56
 - 4.3 Strategien zur Erfassung der Messgrößen57
 - 4.3.1 Mechanische Messgrößen 58
 - 4.3.1.1 Drehzahl der Hauptwelle n_w 58
 - 4.3.1.2 Motordrehmoment 58
 - 4.3.1.3 Drehzahl des Ölförderrings..... 59
 - 4.3.1.4 Radiallast 61
 - 4.3.2 Geometrische Messgrößen 62
 - 4.3.2.1 Ringauslenkung und daraus abgeleitete Systemgrößen 62
 - 4.3.2.2 Ölvolumenstrom 67
 - 4.3.2.3 Luftanteil im Öl 69
 - 4.3.3 Thermische Messgrößen72
 - 4.3.4 Optische Analysen..... 74
- 5 Experimentelle Untersuchungen zum Betriebsverhalten.....75**
 - 5.1 Betrachtung der zentralen Zielgrößen Ringdrehzahl und Ölvolumenstrom75
 - 5.1.1 Variation der Wellendrehzahl.....75
 - 5.1.1.1 Versuchsergebnisse 76
 - 5.1.1.2 Diskussion und Fazit..... 78
 - 5.1.2 Variation der Systemtemperatur..... 83
 - 5.1.2.1 Ergebnisse 84
 - 5.1.2.2 Diskussion und Fazit..... 86
 - 5.1.3 Variation der dynamischen axialen Anlaufelemente 87
 - 5.1.3.1 Ergebnisse 88
 - 5.1.3.2 Diskussion und Fazit..... 90
 - 5.1.4 Variation der Ringhöhe..... 94
 - 5.1.4.1 Ergebnisse 95
 - 5.1.4.2 Diskussion und Fazit..... 96
 - 5.1.5 Variation des Ölsumpfgehäuses..... 98
 - 5.1.5.1 Versuchsergebnisse 99
 - 5.1.5.2 Diskussion und Fazit..... 100
 - 5.2 Schmierstoffbeanspruchung durch Kontakt mit Luft101
 - 5.2.1 Untersuchungen zum Lufteintrag in den Schmierstoff..... 102
 - 5.2.1.1 Versuchsmethodik 103

- 5.2.1.2 Versuchsergebnisse104
 - 5.2.1.3 Diskussion und Fazit107
 - 5.2.2 Oszillierende Bewegung des Ölförderrings..... 110
 - 5.2.2.1 Versuchsmethodik..... 110
 - 5.2.2.2 Ergebnisse.....113
 - 5.2.2.3 Diskussion und Fazit114
 - 5.2.3 Schleuderöl117
 - 5.2.3.1 Versuchsmethodik.....117
 - 5.2.3.2 Versuchsergebnisse 118
 - 5.2.3.3 Diskussion und Fazit 119
- 5.3 Durchmischung des Öls im Reservoir.....121
 - 5.3.1 Versuchsmethodik 122
 - 5.3.2 Versuchsergebnisse..... 123
 - 5.3.3 Diskussion und Fazit124
- 5.4 Thermische Betriebseigenschaften der Wälzlagerung mit Ringschmiersystem 125
 - 5.4.1 Vorüberlegungen und Untersuchung zu den thermischen Randbedingungen..... 125
 - 5.4.2 Eintauchtiefe des Wälzlagers in den Ölsumpf.....130
 - 5.4.2.1 Methode zur Ermittlung der Wälzlagertemperatur bei unterschiedlichen Eintauchtiefen131
 - 5.4.2.2 Ergebnisse..... 132
 - 5.4.2.3 Diskussion und Fazit134
 - 5.4.3 Einfluss des Ölvolumenstroms auf das Wälzlager 137
 - 5.4.3.1 Versuchsmethodik.....138
 - 5.4.3.2 Versuchsergebnisse139
 - 5.4.3.3 Ermittlung der axialen Durchflussgrenze141
 - 5.4.3.4 Diskussion und Fazit142
 - 5.4.4 Vergleich mit einem fettgeschmierten Lager145
 - 5.4.4.1 Versuchsmethodik.....145
 - 5.4.4.2 Versuchsergebnisse147
 - 5.4.4.3 Diskussion und Fazit150

6 Langzeittest 155

- 6.1 Versuchsmethodik 155
 - 6.1.1 Ölproben.....156
 - 6.1.2 Parameter zur Ermittlung des Ölzustands..... 157
- 6.2 Analyseergebnisse158
 - 6.2.1 Verschleißmetalle158
 - 6.2.2 Additive.....160
 - 6.2.3 Viskosität und Viskositätsindex160
 - 6.2.4 Oxidation und Neutralisationszahl.....162

- 6.3 Diskussion der Analyseergebnisse 163
 - 6.3.1 Verschleißmetalle 163
 - 6.3.1.1 Kupfer, Zinn und Zink 163
 - 6.3.1.2 Eisen und Chrom.....164
 - 6.3.2 Additive 165
 - 6.3.3 Viskosität 166
 - 6.3.4 Thermisch-oxidative Alterung 166
- 6.4 Diskussion eines erreichbaren Ölwechselintervalls 168
 - 6.4.1 Ölwechselintervall unter Testbedingungen.....168
 - 6.4.2 Szenarien zur theoretisch erreichbaren Öllebensdauer169
 - 6.4.3 Vergleich mit einem Wälzlager mit Fettschmierung..... 171
- 6.5 Fazit..... 172
- 7 Konzept einer „Smart Bearing Unit“ unter Einsatz eines radialen Anlaufelements 175**
 - 7.1 Motivation 175
 - 7.2 Konzept zur Beeinflussung der Betriebseigenschaften des Ringschmiersystems durch ein verstellbares Anlaufelement..... 176
 - 7.2.1 Randbedingungen..... 176
 - 7.2.2 Wirkprinzipien..... 177
 - 7.2.3 Theoretische Analyse der Wirkung des Anlaufelements auf die Betriebseigenschaften des Ringschmiersystems 178
 - 7.2.3.1 Physikalisches Modell 178
 - 7.2.3.2 Mathematische Beschreibung..... 179
 - 7.2.3.3 Rechnerische Analyse der Einflüsse und Effekte 180
 - 7.2.4 Fazit zu den theoretischen Betrachtungen 183
 - 7.2.5 Konstruktive Umsetzung in der Prüflagerung..... 183
 - 7.3 Experimentelle Verifizierung und Untersuchung des Konzepts eines radialen Anlaufelements 184
 - 7.3.1 Versuchsmethodik..... 184
 - 7.3.2 Versuchsergebnisse unter Einsatz dynamischer axialer Anlaufelemente..... 186
 - 7.3.2.1 Variation der Lage des radialen Anlaufelements bei Standard-Systemtemperatur..... 186
 - 7.3.2.2 Variation der Systemtemperatur 190
 - 7.3.3 Diskussion 194
 - 7.3.3.1 Ringdrehzahl..... 194
 - 7.3.3.2 Ölvolumenstrom 197
 - 7.3.3.3 Temperatureinfluss 199
 - 7.3.3.4 Fazit 202

- 7.4 Konzeptionelle Ansätze und Betrachtungen..... 202
 - 7.4.1 Adaptive Positionierung..... 203
 - 7.4.2 Genutete Kontaktfläche 203
 - 7.4.3 Gefedertes radiales Anlaufelement 204
 - 7.4.4 Weitere Potenziale..... 204
 - 7.4.5 Fazit..... 206
- 8 Zusammenfassung und Ausblick..... 207**
- 9 Summary and Outlook..... 211**
- A Anhang..... 215**
 - A.1 Systematischer Fehler der gemessenen Ringauslenkung..... 215
 - A.2 Schallkeule des Ultraschallsensors 217
 - A.3 Mittelpunktbeschleunigung des Ölförderrings..... 217
 - A.4 Axialer Öldurchfluss 218
 - A.5 Mischungsverhältnis aus den Referenzölen FVA 2 und FVA 4 für
 $\nu = 80 \text{ mm}^2/\text{s}$ 219
 - A.6 Ringdrehzahl..... 220
 - A.7 Ölvolumenstrom 220
 - A.8 Ringoszillation 221
 - A.9 Ergebnisse unter Einsatz des radialen Anlaufelements 221
 - A.10 Statische axiale Anlaufelemente unter Variation der Lage des
radialen Anlaufelements..... 222
- Literaturverzeichnis.....225**