

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Stand der Technik und Wissenschaft	3
2.1	Wälzlager und ihre Lebensdauer	3
2.1.1	Normung von Wälzlagern	4
2.1.2	Lebensdauer von Wälzlagern	5
2.2	Instandhaltungsstrategien	6
2.3	Zustandsüberwachung von Wälzlagern	8
2.4	Ausfallhäufigkeiten von Wälzlagern	10
2.5	Wälzlagerschäden (Ursachen und Schadensbild)	12
2.6	Körperschallanregung durch Wälzlagerschäden	15
2.7	Schwingungsmessung	16
2.8	Körperschallanalyse	18
2.8.1	Fourier-Transformation	19
2.8.2	Hüllkurvenanalyse	20
2.8.3	Anwendung der Körperschallanalyse	21
2.9	Motorstromanalyse	23
2.10	Datenbasierte Zustandsüberwachung mittels maschinellem Lernen und Klassifikatoren	25
2.10.1	Datenerfassung	27
2.10.2	Datenvorverarbeitung	27
2.10.3	Merkmalsbestimmung	29
2.10.4	Klassifikation	30
2.10.5	Ergebnisbewertung	31
2.11	Datenbasis für die Zustandsüberwachung	33
2.11.1	Prüfstände für die Wälzlagerüberwachung	33
2.11.2	Wälzlagerschäden in experimenteller Anwendung	36
2.11.3	Datenbasis für die Entwicklung von Verfahren für die Wälzlagerüberwachung	37
3	Analyse und weiteres Vorgehen	41
3.1	Analyse des Standes der Technik und Wissenschaft	41

3.2	Handlungsbedarf	44
3.3	Ziele und Vorgehensweise	45
4	Methode zur Beschreibung von Wälzlagerschäden	48
4.1	Kategorisierungssystematik	48
4.2	Beschreibung der Kriterien	51
5	Experimentelle Untersuchungen	55
5.1	Prüflager	55
5.2	Erzeugung von künstlichen Wälzlagerschäden	57
5.3	Erzeugung von realen Wälzlagerschäden	59
5.3.1	Lagerschädigungsvorrichtung	59
5.3.2	Lebensdauerversuche	61
5.3.3	Erzeugte Wälzlagerschäden	62
5.4	Belastungsprüfstand	66
5.4.1	Entwicklung des Belastungsprüfstandes	66
5.4.2	Lagermodul	67
5.4.3	Antriebs- und Lastmotor	70
5.4.4	Verzahnungsmodul	71
5.4.5	Messtechnik	71
5.5	Versuchsplanung und -durchführung	73
5.5.1	Prüflagerauswahl	74
5.5.2	Betriebsbedingungen	77
5.5.3	Versuchsdurchführung	78
5.5.4	Stichprobenversuche zur Prüfung des Gültigkeitsbereichs	78
6	Schadensdiagnostik	79
6.1	Signalverhalten der Lagerschäden	79
6.1.1	Berechnung der Überrollfrequenzen	79
6.1.2	Untersuchung des Montageinflusses	81
6.1.3	Hüllkurvenanalyse der Wälzlagerschäden	82
6.1.4	Außenringschäden im Hüllkurvenspektrum	82
6.1.5	Innenringschäden im Hüllkurvenspektrum	86
6.1.6	Fazit der Hüllkurvenanalyse	90
6.1.7	Reale Schäden im Frequenzspektrum	91
6.1.8	Spektralanalyse des Stromsignals	95

6.2	Klassifikation mit einem kombinierten ML-Klassifikator	97
6.2.1	ML-Klassifikator	98
6.2.2	Merkmalsbezogene Clusterbildung der Schadenszustände	99
6.2.3	Datenbasis	101
6.2.4	Trainingsmethodik und Ergebnisbewertung	102
6.2.5	Klassifikation 1: Allgemein - Teilung der Messdatensätze in Trainings- und Testdatensatz.....	104
6.2.6	Klassifikation 2: Einsatz des Klassifikators mit einem unbekannten und unbeschädigten Lager.....	106
6.2.7	Klassifikation 3: Training mit künstlichen Schädigungen	110
6.2.8	Fazit zum ML-Klassifikator	112
6.3	Klassifikation mittels der linearen Diskriminanzanalyse.....	113
6.3.1	LDA-Klassifikator	114
6.3.2	Datenbasis und Vorgehensweise der Klassifikation.....	117
6.3.3	Klassifikation von Einzelklassen	118
6.3.4	Klassifikation von Schadensgruppen	123
6.3.5	Fazit zum LDA-Klassifikator	125
6.4	Gültigkeitsbereich der Verfahren und Ergebnisse	125
6.4.1	Vorgehensweise und Datenbasis.....	126
6.4.2	Klassifikationsergebnis.....	127
6.4.3	Interpretation zum Gültigkeitsbereich.....	129
6.5	Zusammenfassung und Fazit der Schadensdiagnostik	130
6.5.1	Zusammenfassung der Schadensdiagnostik	130
6.5.2	Handlungsempfehlungen	132
7	Datenbank für Schadensdaten	135
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
9	Literaturverzeichnis.....	141
10	Anhang	153