

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen	IV
Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Technik und Forschung	7
2.1 Grundlagen zu Kugelgewindetrieben	7
2.1.1 Kinematik des Kugelgewindetriebs	10
2.1.2 Verschleiß- und Schadensmechanismen im Kugelgewindetrieb	17
2.1.3 CM-Anwendungen für Kugelgewindetriebe	21
2.1.4 Schlussfolgerung zu CM-Systemen für Kugelgewindetriebe	24
2.2 Grundlagen zu Acoustic Emission	25
2.2.1 Messung von Acoustic Emission	26
2.2.2 Anwendungen der Acoustic Emission Messung	29
2.2.3 Schlussfolgerung für die Auswertung von AE am KGT	32
2.3 Unsupervised Learning für Condition-Monitoring	36
2.3.1 Unüberwachte Merkmalsextraktion	38
2.3.2 Grundlagen der Clusterbildung	41
2.3.3 Schlussfolgerung zum Einsatz von Unsupervised Learning im CM	46
2.4 Fazit für die Zielsetzung und Vorgehensweise der eigenen Arbeit	48
3 Eigener Ansatz	50
3.1 Vorgehensweise	52
3.2 Systemgrenzen und -definitionen	54
4 Anforderungsanalyse	58
4.1 Anforderungen an die Messkette	58

4.2	Anforderungen an die digitale Signalverarbeitung	59
4.3	Anforderungen an das Condition-Monitoring-System	60
5	Versuchsträger für die Untersuchung mit Acoustic Emission	63
5.1	Verwendete Acoustic Emission Messkette	63
5.2	1-Achs-Axiallager-Prüfstand	66
5.3	2-Achs-KGT-RZA-Prüfstand	67
5.4	5-Achs-Prüfstand	70
5.5	Aufbau und Integration der Messtechnik am Kugelgewindetrieb	71
6	Vorversuche zur Überwachung des Wälzkontakts	77
6.1	Untersuchung von Acoustic Emission Sensorelementen	77
6.2	Untersuchung am Beispiel des Axialwälzlagers	80
7	Entwicklung des Unsupervised Condition-Monitoring-Systems	86
7.1	Teilsystem Sensierung	89
7.2	Teilsystem Vorverarbeitung	90
7.3	Teilsystem Segmentierung	91
7.4	Teilsystem Merkmalsextraktion	96
7.4.1	Gegenüberstellung von Merkmalen einschließlich Rekonstruktionfehler	97
7.4.2	Auto-Konfiguration von Autoencodern für die Anomaliedetektion	103
7.5	Teilsystem Clusterbildung	115
7.6	Teilsystem Cluster-Tracking	121
8	Validierung des Unsupervised Condition-Monitoring-Systems	132
8.1	Unsupervised Architekturvarianten	134
8.2	Untersuchung des Kugelgewindetriebs mit Acoustic Emission	137
8.3	Unsupervised Condition-Monitoring in den Validierungsexperimenten	149
8.3.1	Visualisierung des Cluster-Tracking-Prozesses im CM-System	151
8.3.2	Szenario 1 – Geschwindigkeitsstufen	155
8.3.3	Szenario 3 – Mangelschmierung	162
8.3.4	Szenario 4 – Partikeleinbringung	167
8.3.5	Szenario 6 – Vorspannungsstufen bei verschiedenen Drehzahlen	172

8.3.6	Detektionsgüte der Architekturvarianten für unterschiedliche Szenarien	179
8.4	Verbesserung der Segmentierung durch domänenbasierte Konfiguration	185
8.5	Übertragbarkeit der Anomalieerkennung auf andere Problemstellungen	188
8.5.1	Übertragbarkeit des CM-Systems am Beispiel Axiallager	189
8.5.2	Übertragbarkeit des CM-Systems am Beispiel Motorstrom und Temperatur	192
9	Bewertung	195
9.1	Bewertung von Acoustic Emission zur Diagnose von Wälzkontakten	195
9.2	Bewertung der Unsupervised Strategie	197
9.2.1	Bewertung der Autoencoder für Anomalie- und Zustandserkennung	201
9.2.2	Bewertung des Cluster-Boundary-Trackings	202
9.3	Beantwortung der Forschungsfragen	203
10	Zusammenfassung	206
	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	XXIII
	Tabellenverzeichnis	XXX
	Anhang	XXXI
	Veröffentlichungen des Autors	I