

# Inhalt

Einleitung .....	13
Abschnitt A Überblick .....	16
0 Zustandsüberwachung und Instandhaltungsmanagement .....	17
0.1 Motivation und Konzepte .....	17
0.2 Instandhaltung .....	18
0.3 Der erfolgreiche Einstieg ins Instandhaltungsmanagement .....	25
0.4 Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen .....	27
0.5 Konzepte einer Zustandsüberwachung .....	31
0.6 Strategien der Instandhaltung .....	34
0.7 Erscheinungsbilder von Schwingungen .....	46
0.8 Konzepte und Strategien der Schwingungsüberwachung .....	55
0.9 Breitbandige Beurteilung von Schwingungen .....	56
0.10 Zeitbereichsanalyse .....	59
0.11 Frequenzanalyse .....	75
0.12 Ordnungsanalyse .....	80
0.13 Zeitbereichsmittelung .....	85
0.14 Korrelation und Kreuzleistung .....	85
0.15 Cepstrumanalyse .....	89
0.16 Tribologie .....	90
0.17 Zeit-Frequenz-Analyse .....	91
0.18 Globalkonzepte .....	93
0.19 Grundlegende Verfahren der Diagnostik .....	93
0.20 Ursachenanalyse .....	94
0.21 Prognostik .....	96
0.22 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen .....	101
0.23 Qualitätssicherung .....	104
0.24 Instandhaltungsmanagement .....	105
0.25 Kostenmanagement .....	105
0.26 Product Lifecycle Management (PLM) .....	107
0.27 Assetmanagement .....	107
0.28 Datenmanagement .....	108
Abschnitt B Schwingungen .....	111
1 Schwingungsgrundlagen – die Physik im Hintergrund .....	112
1.1 Grundlegende Bewegungsformen .....	113
1.2 Messgrößen .....	130
1.3 Einheiten .....	135

1.4	Zeitbereich und Frequenzbereich .....	138
1.5	Vektoren und Zeiger .....	144
1.6	Phase .....	152
1.7	Eigenfrequenz, Resonanz und kritische Drehzahlen .....	154
1.8	Erregerkraft und Systemantwort .....	158
1.9	Mechanismen der Schwingungserregung .....	162
1.10	Übertragungsfunktion .....	165
1.11	Schwebungen .....	167
1.12	Parametererregte Schwingungen .....	168
1.13	Nichtlineare Systeme, Instabilitäten .....	168
1.14	Mechanismen der Schwingungsentstehung .....	172
Abschnitt C Messung und Analyse .....		174
2	Datenerfassung – der Einstieg in die Praxis .....	175
2.1	Instrumentierung .....	178
2.2	Signalqualität .....	190
2.3	Aufnehmer .....	192
2.4	Aufnehmermontage, Aufnehmer-Eigenfrequenz .....	216
2.5	Maximalfrequenz und Messzeit .....	221
2.6	Konventionen für berührungslose Wegaufnehmer .....	224
2.7	Triggerung .....	225
2.8	Versuchsplanung – Entwicklung eines Programms .....	229
2.9	Testprozeduren .....	239
2.10	Datenformate .....	243
2.11	Computerdatenbank – Upload und Download .....	254
2.12	Erkennen schlechter Datenqualität .....	256
2.13	Zusammenstellung einer Messroute .....	261
3	Signalverarbeitung .....	263
3.1	Effektivwert- und Spitzenwertdetektor .....	263
3.2	Analog-Digital-Umsetzung .....	264
3.3	Analoge Aufnahme, Abtastung (Sampling) .....	264
3.4	FFT-Berechnung .....	266
3.5	FFT-Anwendung .....	268
3.6	Zeitfenster (Rechteck, Hanning, Flat) .....	269
3.7	Filter (Tiefpass, Hochpass, Bandpass) .....	275
3.8	Aliasing – Antialiasingfilter .....	278
3.9	Bandbreite und Auflösung .....	280
3.10	Rauschminderung .....	281
3.11	Mittelung (linear, zeitsynchron, exponentiell) .....	282
3.12	Dynamikbereich .....	284
3.13	Signal-Rausch-Abstand .....	285
3.14	Spektrenfelder .....	285

4	Zustandsüberwachung .....	287
4.1	Computerdatenbank – Einrichtung und Pflege .....	288
4.2	Bewertung und Priorisierung von Anlagen .....	291
4.3	Aufbau eines Zustandsüberwachungsprogramms .....	305
4.4	Warn- und Alarminstellungen .....	312
4.5	Bestimmung von Basiswerten, Trendanalyse .....	312
4.6	Messrouten- und Aufgabenplanung .....	314
4.7	Alternative und ergänzende Techniken .....	316
4.8	Erkennen von Fehlerzuständen .....	323
Abschnitt D Fehleranalyse .....		326
5	Fehleranalyse .....	327
5.1	Spektralanalyse, Harmonische und Seitenbänder .....	327
5.2	Signalanalyse im Zeitbereich .....	332
5.3	Phasenanalyse .....	334
5.4	Analyse von Transienten .....	338
5.5	Orbitanalyse .....	343
5.6	Analyse der Wellenmittellinie .....	346
5.7	Hüllkurvenanalyse .....	347
5.8	Unwucht .....	349
5.9	Ausrichtfehler .....	359
5.10	Mechanisches Spiel .....	365
5.11	Anstreifen, Instabilitäten .....	366
5.12	Lagerschäden (Gleitlager und Wälzlager) .....	368
5.13	Fehleranalyse an Elektromaschinen .....	397
5.14	Durchflusserregte Schwingungen in Gasen und Flüssigkeiten .....	407
5.15	Fehler an Zahnradgetrieben .....	409
5.16	Resonanz und kritische Drehzahlen .....	422
5.17	Turbomaschinen .....	426
5.18	Drehschwingungen .....	433
5.19	An- und Auslaufvorgänge (Instationäre Zustände) .....	434
5.20	Belastungen messen und bewerten .....	435
5.21	Allgemeine Fehlererkennung .....	440
Abschnitt E Handlungsempfehlungen .....		442
6	Korrekturmaßnahmen .....	443
6.1	Ausrichten von Wellen und Maschinenkomponenten .....	444
6.2	Betriebswuchten .....	473
6.3	Austausch von Maschinenkomponenten .....	484
6.4	Durchflusskontrolle .....	486
6.5	Dämpfung und Isolierung .....	489
6.6	Resonanzkontrolle und Schwingungstilgung .....	499
6.7	Grundlegende Wartungsarbeiten .....	506

6.8	Weitere präventive Maßnahmen .....	510
6.9	Zusammenfassung .....	514
7	Anlagenkenntnisse .....	515
7.1	Elektromotoren und andere Antriebsmaschinen .....	515
7.2	Pumpen und Lüfter .....	521
7.3	Turbomaschinen .....	526
7.4	Verdichter (Kompressoren) .....	546
7.5	Kolbenmaschinen .....	549
7.6	Walzwerke, Papiermaschinen und andere Prozesanlagen .....	561
7.7	Werkzeugmaschinen .....	566
7.8	Strukturen und Rohrleitungssysteme .....	575
7.9	Getriebe .....	577
7.10	Wälzlager .....	584
7.11	Gleitlager .....	590
7.12	Verzahnungen .....	594
7.13	Kupplungen und Riementriebe .....	603
8	Abnahmeprüfungen .....	607
8.1	Versuchsablauf .....	610
8.2	Spezifikationen und Normen .....	613
8.3	Berichterstattung .....	615
8.4	Zusammenfassung .....	615
9	Anlagenprüfung und Diagnostik .....	616
9.1	Anschlagversuch .....	622
9.2	Test mit Schwingerregern (Shaker) .....	626
9.3	Ermitteln von Übertragungsfunktionen .....	629
9.4	Bewertung der Dämpfung .....	634
9.5	Kohärenz, Phasenfunktion .....	637
9.6	Betriebsschwingformanalyse (BSA) .....	639
9.7	Modalanalyse .....	641
9.8	Torsionsschwingungen .....	647
Abschnitt F Normen und Standards .....		651
10	Referenzstandards .....	652
10.1	DIN- und DIN ISO-Normen .....	653
Abschnitt G Dokumentation .....		675
11	Berichte und Dokumentation .....	676
11.1	Berichte und Dokumentationen zur Schwingungsüberwachung .....	678
11.2	Berichte und Dokumentationen zur Schwingungsdiagnose .....	681

11.3	Berichte und Dokumentationen im Instandhaltungsmanagement .....	682
11.4	Zusammenfassung .....	682
Abschnitt H Schweregrad von Fehlern .....		683
12	Schweregrad eines Fehlers .....	684
12.1	Spektralanalyse zum Ableiten von Diagnoseprioritäten .....	686
12.2	Zeitbereichs-, Orbit- und Resonanzanalysen .....	690
12.3	Pegel (Gesamt-, Schmalband- und Komponentenpegel) .....	691
12.4	Schmierstoffanalyse .....	696
12.5	Klassifikation nach Kritikalitäten .....	707
Abschnitt I Rotordynamik .....		727
13	Rotor- und Lagerdynamik .....	728
13.1	Rotorcharakteristik .....	728
13.2	Lagercharakteristik .....	778
Abschnitt J Fehlerpriorität und Performance .....		797
14	Fehlermode- und -auswirkungsanalyse (FMEA) .....	798
14.1	Verfahren und Bezeichnungen .....	798
14.2	Strategien der FMEA .....	799
14.3	Die Entstehung der FMEA .....	799
14.4	Methodik der FMEA .....	800
14.5	FMEA in der Anwendung .....	802
15	Fehlermode- und Symptomanalyse (FMSA) .....	814
15.1	Ermitteln des Diagnosebedarfs .....	815
15.2	Die Systematik der FMSA .....	816
15.3	Bewertungen .....	819
15.4	Zustandsbeschreibung .....	821
15.5	Maschinenhistorie .....	823
15.6	Diagnose- und Prognosekonzepte .....	823
15.7	Vertrauensniveau und Unsicherheiten im Diagnoseprozess .....	831
15.8	KPI-basiertes Condition Monitoring .....	838
15.9	Dokumentation .....	839
15.10	Einschlägige Normung .....	842
Abschnitt K Multivariate Systeme .....		843
16	Multivariate Analyse .....	844
16.1	Die Performance eines Systems .....	844
16.2	Multivariate Strategien .....	845

16.3	Multivariate Bewertung .....	856
16.4	Zusammenfassung .....	858
Abschnitt L Wirtschaftlichkeit .....		860
17	Anlagenmanagement und Zertifizierung .....	861
17.1	Die Grundidee – historische Entwicklung .....	861
17.2	Nutzwert .....	861
17.3	LCC und RAMS .....	864
17.4	Anlagenwirtschaft .....	874
17.5	Zertifizierung .....	876
Register .....		881
Abbildungsverzeichnis .....		886
Tabellenverzeichnis .....		901