

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Maschinenüberwachung – Ziele und Konzepte	1
1.1	Warum Schwingungsüberwachung?	1
1.2	Zielsetzungen	2
1.3	Konzepte	3
1.4	Die Idee der zustandsorientierten Maschinenwartung	4
1.4.1	Fahren bis zum Bruch	4
1.4.2	Vorbeugende Wartung	5
1.4.3	Zustandsabhängige Wartung	6
1.5	Breitbandige Schwingungsüberwachung	6
1.5.1	Schwingungen an nicht-rotierenden Bauteilen	7
1.5.1.1	Messwertgewinnung	7
1.5.1.2	Beurteilung von Schwingungen nicht-rotierender Bauteile	7
1.5.2	Messung und Bewertung von Wellenschwingungen	8
1.5.2.1	Wellenschwingungsmessung	8
1.5.2.2	Beurteilung von Wellenschwingungen	9
1.5.3	Gegenüberstellung	10
2	Mess- und Analysesysteme	11
2.1	Human Resources	11
2.2	Serielle Analysatoren	11
2.3	Mechanische Frequenzanalyse	13
2.4	Digitale Filter	15
2.5	Frequenzanalysatoren	15
2.6	Rechnerbasierte Systeme	16
2.7	Datensammler	16
2.8	Industriegeräte	17
2.9	Virtuelle Instrumente (VI)	17
2.9.1	Das Prinzip	17
2.9.2	Grafische Programmierung	18
2.9.3	Parallelsysteme	19
2.10	Embedded Systeme	22

2.10.1	Prozessorbasierte Systeme	22
2.10.2	Application Specific Integrated Circuit (ASIC)	22
2.10.3	Field Programmable Gate Array (FPGA)	23
2.11	Programmable Automation Controller	29
2.11.1	Das Grundprinzip	29
2.11.2	Beispiel CompactRIO	30
2.11.3	Beispiel: schnelle Regelkreise	32
2.11.4	Die Programmierung	33
2.12	Monitorsysteme	33
3	Einführung zur Schwingungsanalyse	35
3.1	Maschinenschwingungen	35
3.2	Frequenzanalyse	37
3.2.1	Bedeutung der Frequenzanalyse	37
3.2.2	Durchführung der Frequenzanalyse	41
3.2.2.1	Filter	41
3.2.2.2	Die Fouriertransformation	42
3.3	Signaltypen	43
3.3.1	Einteilung	43
3.3.2	Die Spektren	44
3.4	Filter	48
3.4.1	Filtercharakteristik	48
3.4.2	Bandbreite und Messzeit	50
3.5	Mittelung – der Detektor	53
3.6	Zeitbereichsmittelung	57
3.7	Darstellung und Auswertung von Spektren	57
3.7.1	Amplitudenskalierung – Beurteilungskriterien	62
3.7.2	Frequenzskalierung – Spektrenvergleich und Diagnose	64
3.8	Die Wahl der richtigen Bandbreite	67
4	Schwingungsaufnehmer	69
4.1	Allgemeines	69
4.2	Wirbelstromaufnehmer	70
4.3	Elektrodynamische Geschwindigkeitsaufnehmer	71
4.4	Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer	73
4.4.1	Eigenschaften	73
4.4.2	Der piezoelektrische Effekt	73

4.4.3	Konstruktionsprinzipien	74
4.4.4	Messbereiche	76
4.4.5	Industrieaufnehmer	80
4.4.6	Die Montage des Aufnehmers	82
4.4.6.1	Allgemeines	82
4.4.6.2	Montagermethoden	84
4.4.7	Störgrößen	89
4.4.8	Kalibrierung	93
4.4.9	Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Vorverstärker	93
4.4.10	TEDS (Transducer Electronic Data Sheet)	93
5	Frequenzanalyse – Verfahren und Geräte	95
5.1	Frequenzanalysatoren	95
5.2	Parameter der Frequenzanalyse	95
5.3	Funktionsgruppen des FFT Analysators	97
5.3.1	Signalabtastung und Fouriertransformation	97
5.3.1.1	Aliasing	98
5.3.1.2	Leakage – Zeitbewertung	101
5.3.1.3	Normierung des Zeitfensters	106
5.3.1.4	Die Auswirkung der Zeitbewertung im Frequenzbereich	107
5.3.1.5	Der Picket-Fence Effekt	110
5.3.1.6	Breitbandkorrektur – Berechnung von Breitbandpegeln	112
5.3.1.7	Gaußfenster	113
5.3.2	Triggerung	116
5.3.3	Übersteuerung	119
5.3.4	Mittelung	122
5.3.4.1	Lineare Mittelung	122
5.3.4.2	Exponentielle Mittelung	122
5.3.4.3	Overlap	125
5.3.5	Analyse mit gleitendem Zeitfenster	125
5.3.5.1	Das Verfahren	125
5.3.5.2	Mittelung mit gleitendem Zeitfenster	125
5.3.6	Frequenzlupe (ZOOM)	128
5.3.6.1	Rekursive Zoom-Analyse	129
5.3.6.2	Frequenzlupenanalyse nach dem Überlagerungsprinzip	130
5.3.6.3	Gegenüberstellung	130

5.4	Wie arbeitet man mit dem FFT-Analysator?	132
5.5	Technische Parameter	133
5.5.1	Übertragungsverhalten des Antialiasingfilters	133
5.5.2	Digitale Auflösung	134
5.5.3	Konvertierungsgeschwindigkeit des ADC	134
5.5.4	Verfügbare Speichertiefe	135
5.5.5	Rechenzeit für den FFT-Algorithmus	135
5.6	Modellbasierte Frequenzanalyse	136
6	Einführung zu Fehlererkennung und Diagnose	137
6.1	Grundsätzliche Methoden	137
6.1.1	Vergleich mit festen Grenzwerten	137
6.1.2	Trendanalyse	140
6.2	Fehler und ihr spektrales Erscheinungsbild.....	143
6.2.1	Fehler an Rotoren und Wellen	143
6.2.2	Lagerfehler	147
6.2.2.1	Gleitlager	147
6.2.2.2	Wälzlager.....	151
6.2.3	Magnetisch induzierte Schwingungen.....	152
6.2.4	Zahnradgetriebe.....	156
6.3	Diagnosekarte	156
7	Diagnose an Lagern und Getrieben	162
7.1	Fehler in Wälzlagern	162
7.1.1	Erscheinungsbild der Fehler.....	162
7.1.2	Methoden der Fehleranalyse bei Wälzlagern	163
7.1.2.1	Aufnehmer-Resonanztechniken	163
7.1.2.2	Messung der Spitzenhaltigkeit.....	164
7.1.2.3	Der Wälzlagerfehler in der Frequenzanalyse.....	166
7.1.2.4	Hüllkurvenanalyse	167
7.1.2.5	Stress Wave Energy (SWE)	174
7.1.2.6	Spectral Emitted Energy (SEE-Verfahren)	174
7.1.2.7	Bearing Condition Online Monitoring System (BeCOMS).....	174
7.1.2.8	Ursachenanalyse – Root Cause Failure Analysis (RCFA).....	175
7.2	Fehler an Zahnrädern.....	176
7.2.1	Der Mechanismus der Zahneingriffsschwingung.....	176
7.2.2	Zur Analyse von Zahneingriffsschwingungen.....	176

7.2.3	Das Erscheinungsbild von Verzahnungsfehlern im Spektrum.....	176
7.2.3.1	Zahneingriffsschwingungen und Geisterkomponenten.....	176
7.2.3.2	Modulationsschwingungen – Seitenbandanalyse	184
7.2.3.3	Ein Beispiel – Zeitbereichsmittelung.....	191
7.2.3.4	Bandbreite	197
8	Cepstrumanalyse	198
8.1	Was ist Cepstrumanalyse?.....	198
8.1.1	Allgemeine Definition	198
8.1.2	Varianten des Cepstrums.....	199
8.1.2.1	Das Leistungscepstrum	199
8.1.2.2	Das komplexe Cepstrum	200
8.2	Anwendungen des Leistungscepstrums.....	200
8.2.1	Detektion von periodischen Strukturen im Spektrum	200
8.2.2	Trennung der Einflüsse von Quelle und Übertragungsweg	202
8.2.3	Fallstudien.....	203
8.2.4	Das Cepstrum von Zoom-Spektren.....	222
8.2.5	Editieren des Spektrums	226
8.2.6	Weitere Anwendungen der Cepstrumanalyse	226
8.2.7	Das Leistungscepstrum – Zusammenfassung	226
8.3	Das komplexe Cepstrum	228
8.3.1	Definition und Eigenschaften.....	228
8.3.2	Anwendungen des komplexen Cepstrums	230
8.4	Ausblicke	232
9	Rechnergestützte Überwachung.....	233
9.1	Grundlagen	233
9.1.1	Messgrößen und Beurteilungsgrößen	233
9.2	Automatischer Spektrenvergleich.....	234
9.2.1	Probleme beim Vergleich digitalisierter Spektren	234
9.2.2	Maskenspektren	234
9.2.2.1	Berechnung von Masken	234
9.2.2.2	Beispiele	238
9.2.3	Order Tracking	247
9.3	Trendanalyse	247
10	Analyse von Hoch- und Auslaufvorgängen	254
10.1	Die Thematik	254

10.2	Auswertung von Einzelkomponenten – kritische Drehzahlen.....	255
10.3	Auswertung spektraler Messungen	257
10.3.1	Kaskadendiagramm (Wasserfalldarstellung).....	257
10.3.2	Spektrogramm.....	259
10.3.3	Das Campbelldiagramm.....	259
10.4	Zeit-Frequenz-Analyse (JTFA)	261
10.4.1	Kurzzeit-Fouriertransformation (STFT)	262
10.4.2	Gaborentwicklung und Gabortransformation.....	264
10.4.3	Wavelet-Transformation (WT).....	267
10.4.4	Gegenüberstellung Gabor- und Wavelet-Transformation.....	267
10.5	Grundprinzipien der Ordnungsanalyse.....	267
10.5.1	Mitlauffilter.....	268
10.5.2	Synchrone Abtastung.....	269
10.6	Verfahren der digitalen Ordnungsanalyse	277
10.6.1	Frequenzanalyse.....	278
10.6.1.1	FFT	278
10.6.1.2	Zeit-Frequenz-Analyse.....	278
10.6.2	Order Tracking	279
10.6.2.1	Resampling	279
10.6.2.2	Zeitvariate Fouriertransformation (TVDFT)	280
10.6.2.3	Vold-Kalman Filter	281
10.6.2.4	Drehzahlmessung	282
10.6.2.5	Gabor Order-Tracking (GOT).....	283
10.6.2.6	Order Tracking – State of Arts	283
10.7	Ordnungsanalyse in Überwachung und Diagnose	284
10.7.1	Profilüberwachung	284
10.7.2	Vergleich spektraler Daten.....	286
10.7.3	Überwachung von Einzelkomponenten.....	286
11	Fehlererkennung an Kolbenmaschinen	287
11.1	Die Problematik	287
11.2	Zeitsignale und Spektren	291
11.3	Die Analyse	291
11.3.1	Erfassung der Einzelspektren	291
11.3.2	Darstellung der Spektren	291
11.3.3	Beispiele	294

11.4	Bearing Condition Online Monitoring System (BeCOMS)	306
12	Konzepte für Überwachungssysteme.....	308
12.1	Die Thematik	308
12.2	Ein Universalsystem.....	308
12.3	Ein dezentrales Überwachungssystem mit FPGA-Einsatz	313
12.4	Ganzheitlicher Ansatz	317
13	Multivariate Verfahren.....	318
13.1	Allgemeines.....	318
13.2	Begriffe.....	318
13.3	Klassierungsverfahren.....	319
13.3.1	Wahrscheinlichkeitsbasierte Beurteilung.....	319
13.3.2	Neuronale Netze	320
13.3.3	Selbstorganisierende Netze (Self Organizing Map SOM)	321
13.3.4	Klassifikationsbäume	322
13.3.5	Random Forest Statistik (RF).....	323
13.3.6	Logistische Regression (LR)	323
13.3.7	Stützvektormaschine (Support Vector Machine SVM)	324
13.4	Health Index	325
13.5	Normative Repräsentation.....	325
14	Der wirtschaftliche Nutzen von Diagnosesystemen.....	326
14.1	Allgemeines.....	326
14.2	Grundlagen der Nutzwertanalyse	327
14.3	Nutzwertanalyse und Kosten-Nutzen-Analyse	336
14.3.1	Nutzwertanalyse.....	336
14.3.2	Kosten-Nutzen-Analyse	336
14.3.3	Objektive Gewichtung – paarweiser Vergleich	338
14.4	Schlussfolgerung.....	339
15	Strategien der Signalanalyse	342
15.1	Der Grundgedanke.....	342
15.2	Die Fouriertransformation.....	342
15.2.1	Ansätze	342
15.2.2	Allgemeine Eigenschaften der Fouriertransformation	344
15.2.3	Linearität der Fouriertransformation	345
15.2.4	Spektren reeller Zeitsignale	345
15.3	Diskrete Fouriertransformation (DFT) und FFT	346

15.3.1	Zusammenhänge	346
15.3.2	Konsequenzen	348
15.4	Überlagerte Prozesse.....	350
15.5	Faltung und Entfaltung	350
15.5.1	Lineare Systeme – Entfaltung	350
15.5.2	Die Entfaltung.....	352
15.5.3	Konsequenzen	353
15.6	Das Cepstrum – die vollendete Entfaltung	353
15.6.1	Das komplexe Cepstrum.....	353
15.6.2	Das Leistungscepstrum.....	354
15.7	Demodulation	356
15.7.1	Zeitbereich und Frequenzbereich	356
15.7.2	Fouriertransformation kausaler Zeitsignale – Hilbertransformation ..	357
15.7.3	Die Hilbertransformation im Zeitbereich	359
15.8	Das analytische Zeitsignal.....	362
15.9	Analyse modulierter Signale.....	364
15.9.1	Amplitudenmodulation.....	364
15.9.2	Amplituden- und Frequenzmodulation	364
15.9.3	Hüllkurvendetektion.....	364
15.10	Amplitudenmodulation	365
15.10.1	Analytische Formulierung	365
15.10.2	Grenzbetrachtungen.....	366
15.11	Anwendungen und Aspekte	367
15.12	Grundlagen der Zeit-Frequenz-Analyse.....	367
15.12.1	Ansätze zur Signalanalyse	367
15.12.2	Gefensteretes Zeitsignal.....	368
15.12.3	Kurzzeit-Fouriertransformation (STFT)	369
15.12.4	Gabortransformation.....	370
15.12.5	Die Welt der Biorthogonaltransformationen	371
15.13	ANHANG	372
15.13.1	Lösung eines linearen Gleichungssystems.....	373
15.13.2	Fouriertransformation eines Faltungsintegrals.....	373
15.13.3	Fouriertransformation der Signumfunktion	374
16	Normen und Richtlinien	375
16.1	Betriebs- und Abnahmerichtlinien.....	375

16.1.1	Die Entstehung.....	375
16.1.2	Aktueller Stand.....	376
16.2	Die Normenreihen in sachlicher Gliederung.....	378
16.2.1	Normen zur Betriebsüberwachung.....	378
16.2.1.1	Wellenschwingungen	378
16.2.1.2	Schwingungen von nicht-rotierenden Bauteilen	380
16.2.2	Überwachung und Diagnose.....	381
16.2.2.1	Übergeordnete Dokumente.....	381
16.2.2.2	Schwingungsüberwachung	383
16.2.2.3	Normen zur Messtechnik:	386
16.2.2.4	Gesamtkonzepte	386
16.2.2.5	Datenverarbeitung	388
16.2.2.6	Training und Zertifizierung	389
16.3	VDI-Richtlinien.....	390
16.4	Laufende Projekte	391
16.5	Stellenwert	392
16.6	Entwicklungsstufen einer ISO-Norm.....	393
Literaturverzeichnis	394
Sachregister	404