

# Zustandsüberwachung von Maschinen

Dr. Josef Kolerus

Mit 169 Bildern



Kontakt & Studium  
Band 187

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Wilfried J. Bartz  
Technische Akademie Esslingen  
Weiterbildungszentrum  
Dipl.-Ing. FH Elmar Wippler, expert verlag

**expert**  **verlag**

# Inhaltsverzeichnis

---

## Vorwort

<b>1.</b>	<b>Schwingungsüberwachungssysteme</b>	<b>1</b>
1.1.	Überwachungsstrategien	1
1.1.1.	Permanente Überwachung	2
1.1.2.	Intermittierende Überwachung	3
1.2.	Überwachungssysteme – ein Überblick	3
1.3.	Strukturen von Überwachungssystemen	5
1.3.1.	Randbedingungen	5
1.3.2.	Meßsysteme	5
<b>2.</b>	<b>Einführung zur Schwingungsanalyse</b>	<b>13</b>
2.1.	Maschinenschwingungen	13
2.2.	Frequenzanalyse	15
2.2.1.	Bedeutung der Frequenzanalyse	15
2.2.2.	Durchführung der Frequenzanalyse	21
2.2.2.1.	Filter	21
2.2.2.2.	Die Fouriertransformation	22
2.3.	Signaltypen	23
2.3.1.	Einteilung	23
2.3.2.	Die Spektren	25
2.4.	Filter	29
2.4.1.	Filtercharakteristik	29
2.4.2.	Bandbreite und Meßzeit	31
2.5.	Mittelung – der Detektor	34
2.6.	Zeitbereichsmittelung	41
2.7.	Darstellung und Auswertung von Spektren	44
2.7.1.	Amplitudenskalierung – Beurteilungskriterien	44
2.7.2.	Frequenzskalierung – Spektrenvergleich und Diagnose	46
2.8.	Die Wahl der richtigen Bandbreite	50
<b>3.</b>	<b>Schwingungsaufnehmer</b>	<b>51</b>
3.1.	Allgemeines	51
3.2.	Wirbelstromaufnehmer	52
3.3.	Elektrodynamische Geschwindigkeitsaufnehmer	54
3.4.	Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer	55
3.4.1.	Eigenschaften	55
3.4.2.	Der piezoelektrische Effekt	56

3.4.3.	Konstruktionsprinzipien	57
3.4.4.	Meßbereiche	59
3.4.5.	Industrieraufnehmer	63
3.4.6.	Montage des Aufnehmers	64
3.4.6.1.	Allgemeines	64
3.4.6.2.	Montagemethoden	69
3.4.7.	Störgrößen	71
3.4.8.	Kalibrierung	76
<b>4.</b>	<b>Frequenzanalyse – Verfahren und Geräte</b>	<b>77</b>
4.1.	Frequenzanalysatoren	77
4.2.	Parameter der Frequenzanalyse	77
4.3.	Der serielle Frequenzanalysator	79
4.4.	Der FFT-Analysator	79
4.4.1.	Signalabtastung und Fouriertransformation	80
4.4.1.1.	Aliasing	81
4.4.1.2.	Leakage – Zeitbewertung	83
4.4.1.3.	Der „Picket Fence“ Effekt	88
4.4.1.4.	Die Triggerung	94
4.4.2.	Die Mittelung	95
4.4.3.	Analyse mit gleitendem Zeitfenster	100
4.4.4.	Frequenzlupe (Zoom)	102
4.4.5.	Wie arbeitet man mit dem FFT-Analysator	107
<b>5.</b>	<b>Einführung zur Fehlererkennung und Diagnose</b>	<b>109</b>
5.1.	Grundsätzliche Methoden	109
5.1.1.	Vergleich mit festen Grenzwerten	109
5.1.2.	Trendanalyse	112
5.2.	Fehler und ihr spektrales Erscheinungsbild	115
5.2.1.	Fehler an Rotoren und Wellen	115
5.2.2.	Lagerfehler	118
5.2.3.	Magnetisch induzierte Schwingungen	124
5.2.4.	Zahnradgetriebe	125
5.3.	Fehlertabelle	134
<b>6.</b>	<b>Diagnose an Lagern und Getrieben</b>	<b>135</b>
6.1.	Fehler in Wälzlagern	135
6.1.1.	Erscheinungsbild der Fehler	135
6.1.2.	Methoden der Fehleranalyse an Wälzlagern	136
6.1.2.1.	Aufnehmer-Resonanztechniken	136
6.1.2.2.	Messung der Spitzenhaltigkeit	138
6.1.2.3.	Der Wälzlagerfehler in der Frequenzanalyse	140
6.1.2.4.	Hüllkurvenanalyse	141
6.2.	Fehler an Zahnradern	147

6.2.1.	Der Mechanismus der Zahneingriffsschwingung	147
6.2.2.	Das Erscheinungsbild von Verzahnungsfehlern im Spektrum	147
6.2.2.1.	Zahneingriffsschwingungen und Geisterkomponenten	147
6.2.2.2.	Modulationsschwingungen – Seitenbandanalyse	153
6.2.2.3.	Ein Beispiel – Zeitbereichsmittelung	159;
<b>7.</b>	<b>Cepstrumanalyse</b>	<b>169</b>
7.1.	Was ist Cepstrumanalyse	169
7.1.1.	Allgemeine Definition	169
7.1.2.	Formen des Cepstrums	170
7.1.2.1.	Das Leistungscepstrum	170
7.1.2.2.	Das komplexe Cepstrum	170
7.2.	Anwendungen des Leistungscepstrums	171
7.2.1.	Detektion von periodischen Strukturen im Spektrum	171
7.2.2.	Trennung der Einflüsse von Quelle und Übertragungsweg	172
7.2.3.	Fallstudien	173
7.2.4.	Das Cepstrum von Zoom-Spektren	192
7.2.5.	Editieren des Spektrums	194
7.2.6.	Cepstrumanalyse bei Turbomaschinen	196
7.2.7.	Das Leistungscepstrum – Zusammenfassung	196
7.2.7.1.	Fehlererkennung	196
7.2.7.2.	Fehlerdiagnose	198
7.2.7.3.	Prognose	198
7.3.	Das komplexe Cepstrum	198
7.3.1.	Definition und Eigenschaften	198
7.3.2.	Anwendungen des komplexen Cepstrums	200
7.4.	Ausblicke	202
<b>8.</b>	<b>Rechnergestützte Überwachung und Trendanalyse</b>	<b>203</b>
8.1.	Grundlagen	203
8.1.1.	Meß- und Ausgangsgrößen	203
8.1.2.	Probleme beim Vergleich digitalisierter Spektren	206
8.2.	Maskenspektren	207
8.2.1.	Berechnung von Masken	207
8.2.2.	Beispiele	209
8.3.	Trendanalyse	214
<b>9.</b>	<b>Analyse von Hoch- und Auslaufvorgängen</b>	<b>223</b>
9.1.	Auswertung von Einzelkomponenten – kritische Drehzahlen	224
9.2.	Auswertung spektraler Messungen	225
9.3.	Mitlaufanalyse – Nachlaufanalyse – Ordnungsanalyse	228
<b>10.</b>	<b>Fehlererkennung an Kolbenmaschinen</b>	<b>237</b>
10.1.	Die Problematik	237

10.2.	Die Instrumentierung	239
10.3.	Zeitsignale und Spektren	240
10.4.	Die Analyse	242
10.4.1.	Erfassung der Einzelspektren	242
10.4.2.	Darstellung der Spektren	242
10.4.3.	Beispiele	246

<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>259</b>
-----------------------------	--	------------

<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>261</b>
-----------------------------	--	------------