

TAE

79

Edition  
expertSOFT

Josef Kolerus  
Johann Wassermann

# Zustandsüberwachung von Maschinen

Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker

7., aktualisierte Auflage

Mit 257 Bildern und 7 Tabellen

expert**U**verlag®



Josef Kolerus  
Johann Wassermann

---

# **Zustandsüberwachung von Maschinen**

Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker

---

7., aktualisierte Auflage

Mit 257 Bildern und 7 Tabellen



**79** Edition  
expert *SOH*

Prof. Dr. Josef Kolerus  
Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Johann Wassermann

---

# Zustandsüberwachung von Maschinen

Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker

---

7., aktualisierte Auflage

Mit 257 Bildern und 7 Tabellen

expert  verlag®

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://www.dnb.de> abrufbar.

### **Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek lists this publication  
in the Deutsche Nationalbibliografie;  
detailed bibliographic data are available on the internet at  
<http://www.dnb.de>

**I S B N 9 7 8 - 3 - 8 1 6 9 - 3 3 7 7 - 9**

- 7., aktualisierte Auflage 2017
- 6., aktualisierte Auflage 2014
- 5., neu bearbeitete Auflage 2011
- 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2008
- 3., erweiterte Auflage 2000
- 2., überarbeitete Auflage 1995
- 1. Auflage 1986

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem lassen sich Fehler  
nie vollständig ausschließen. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen  
weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 1986 by expert verlag, Wankelstr. 13, D-71272 Renningen  
Tel.: +49 (0) 71 59 -92 65-0, Fax: +49 (0) 71 59 -92 65-20  
E-Mail: [expert@expertverlag.de](mailto:expert@expertverlag.de), Internet: [www.expertverlag.de](http://www.expertverlag.de)  
Alle Rechte vorbehalten  
Printed in Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb  
der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und  
strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die  
Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

# Autorenvorwort zur 7. Auflage

---

Von den Grundlagen bis in die Höhen moderner Technologien – das war von Anfang an und bleibt das Motto dieses Buches. Ohne einen gegebenen Rahmen zu sprengen eine doch etwas anspruchsvolle Aufgabe. Und dass diese Aufgabe gelungen scheint, zeigt wohl der Bedarf nach einer weiteren Auflage. Einer überarbeiteten Auflage, angepasst an den neuesten Stand der Technik.

Blickt man auf die Entwicklung dieses Buches, die sich immerhin über einen Zeitraum von nunmehr etwa 30 Jahren erstreckt, so spiegelt sich darin die komplette Entwicklung eines ganzen Fachgebietes wider, einer ebenso wichtigen wie faszinierenden Thematik.

Entstanden ist das Buch ursprünglich, in seiner 1. Auflage, aus einem Lehrgang an der Technischen Akademie Esslingen, veranstaltet von der Firma Brüel & Kjaer und unter fachlicher Leitung des Autors (Dr. K.). Brüel & Kjaer hat auch in der Folge das Bildmaterial und viele technische Unterlagen für die Gestaltung dieses Buches zur Verfügung gestellt, wofür an dieser Stelle der Dank der Autoren ausgesprochen werden soll.

Bis heute bildet das Material von Brüel & Kjaer das fachliche Rückgrat dieses Buches. Im Zuge der Entwicklung sind jedoch auch Beiträge anderer Hersteller und Anbieter eingeflossen. In diesem Zusammenhang seien die Firmen National Instruments, FAG Industrial Services, DB Prüftechnik, SKF, Agilent, ESC Engine Safety sowie MSS AG genannt. Diese Öffnung hat nicht nur eine Erweiterung und Diversifizierung der Themenkreise bewirkt, sie rückt das Buch auch ins Blickfeld der aktuellen Strategien im Bereich des Internets der Dinge (IoT und IIoT); dabei wird sich eine wirkungsvolle Zustandsüberwachung nicht nur als sinnvoll erweisen, sie entwickelt sich hier mehr und mehr zu einer zentralen Thematik.

Als außerordentlich befruchtend hat sich auch die Mitarbeit in diversen Normen- und Richtlinienausschüssen von DIN, VDI und ISO erwiesen – immer wieder interessanter Treffpunkt einschlägiger Fachleute und Experten.

Allen an der Entstehung dieses Buches direkt und indirekt Beteiligten sei an dieser Stelle der Dank der Autoren ausgesprochen.

München/Wien im Januar 2017

Dr. Josef Kolerus

Dr. Johann Wassermann

# Inhaltsverzeichnis

---

## Autorenvorwort

<b>1</b>	<b>Maschinenüberwachung – Ziele und Konzepte .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Mess- und Analysesysteme .....</b>	<b>11</b>
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
<b>3</b>	<b>Einführung zur Schwingungsanalyse .....</b>	<b>35</b>
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
<b>4</b>	<b>Schwingungsaufnehmer .....</b>	<b>69</b>
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	Industrieraufnehmer .....	80
4.4.6	Die Montage des Aufnehmers .....	82
4.4.6.1	Allgemeines .....	82
4.4.6.2	Montagemethoden .....	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
<b>5</b>	<b>Frequenzanalyse – Verfahren und Geräte .....</b>	<b>95</b>
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
<b>6</b>	<b>Einführung zu Fehlererkennung und Diagnose .....</b>	<b>137</b>
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
<b>7</b>	<b>Diagnose an Lagern und Getrieben.....</b>	<b>162</b>
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
<b>8</b>	<b>Cepstrumanalyse .....</b>	<b>198</b>
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
<b>9</b>	<b>Rechnergestützte Überwachung .....</b>	<b>233</b>
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
<b>10</b>	<b>Analyse von Hoch- und Auslaufvorgängen.....</b>	<b>254</b>
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	Zeitvariante Fouriertransformation (TVDFFT).....	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
<b>11</b>	<b>Fehlererkennung an Kolbenmaschinen.....</b>	<b>287</b>
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
<b>12</b>	<b>Konzepte für Überwachungssysteme.....</b>	<b>308</b>
12.1	Die Thematik.....	308
12.2	Ein Universalsystem.....	308
12.3	Ein dezentrales Überwachungssystem mit FPGA-Einsatz.....	313
12.4	Ganzheitlicher Ansatz.....	317
<b>13</b>	<b>Multivariate Verfahren.....</b>	<b>318</b>
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
<b>14</b>	<b>Der wirtschaftliche Nutzen von Diagnosesystemen .....</b>	<b>326</b>
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
<b>15</b>	<b>Strategien der Signalanalyse .....</b>	<b>342</b>
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 – Hilberttransformation ..	357
15.7.3	Die Hilberttransformation 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 .....	366
15.10.1	Analytische Formulierung .....	366
15.10.2	Grenzbetrachtungen.....	367
15.11	Anwendungen und Aspekte.....	368
15.12	Grundlagen der Zeit-Frequenz-Analyse.....	368
15.12.1	Ansätze zur Signalanalyse .....	368
15.12.2	Gefensteretes Zeitsignal.....	369
15.12.3	Kurzzeit-Fouriertransformation (STFT).....	370
15.12.4	Gabortransformation.....	371
15.12.5	Die Welt der Biorthogonaltransformationen .....	372
15.13	ANHANG .....	373
15.13.1	Lösung eines linearen Gleichungssystems.....	374
15.13.2	Fouriertransformation eines Faltungsintegrals.....	374
15.13.3	Fouriertransformation der Signumfunktion.....	375
<b>16</b>	<b>Normen und Richtlinien.....</b>	<b>376</b>
16.1	Betriebs- und Abnahmerichtlinien.....	376
16.1.1	Die Entstehung.....	376
16.1.2	Aktueller Stand.....	377
16.2	Die Normenreihen in sachlicher Gliederung.....	379
16.2.1	Normen zur Betriebsüberwachung.....	379
16.2.1.1	Wellenschwingungsmessungen .....	379
16.2.1.2	Schwingungen von nicht-rotierenden Bauteilen.....	381
16.2.2	Überwachung und Diagnose .....	382
16.2.2.1	Übergeordnete Dokumente .....	382
16.2.2.2	Schwingungsüberwachung.....	384

16.2.2.3 Normen zur Messtechnik.....	387
16.2.2.4 Gesamtkonzepte .....	387
16.2.2.5 Datenverarbeitung .....	389
16.2.2.6 Training und Zertifizierung.....	390
16.3 VDI-Richtlinien.....	392
16.4 Laufende Projekte .....	392
16.5 Stellenwert der Normung.....	393
16.6 Entwicklungsstufen einer ISO-Norm.....	394
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>395</b>
<b>Sachregister.....</b>	<b>406</b>

# 1 Maschinenüberwachung – Ziele und Konzepte

---

## 1.1 Warum Schwingungsüberwachung?

Der Betrieb von Maschinen im industriellen Umfeld erfordert eine Reihe von Maßnahmen zur Betriebsüberwachung, um einen ordnungsgemäßen Produktionsprozess aufrecht zu erhalten. Die Überwachung von Öldruck und Öltemperatur, die Kontrolle von Betriebsparametern wie Drehzahl, Leistung, Wirkungsgrad seien als allgemein bekannte Beispiele genannt.

Neben der Betriebsüberwachung sind Inspektion der Maschinen, Wartung und Reparaturarbeiten unerlässlich für die Aufrechterhaltung des Betriebes.

Zur Überwachung kritischer Maschinen werden – praktisch seit man imstande ist, Schwingungen mit elektrischen Methoden zu messen – Schwingungswächter eingesetzt. Wozu Schwingungswächter? Warum Schwingung? Was sind die Ziele solcher Überwachungssysteme?

Im Grunde genommen wird die Schwingungsüberwachung praktiziert, seit es Maschinen gibt, von Anfang an. Denn was ist die Beurteilung des Laufgeräusches durch den erfahrenen Betreuer über das Ohr als Sensor anderes, als eine Schwingungsüberwachung, ggf. Fehlerdiagnose?

Primäres Ziel aller Überwachungsmaßnahmen ist das rechtzeitige Erkennen von kritischen Betriebszuständen. Der Betrieb von Maschinen ist immer mit dem Auftreten von Schwingungen verbunden, in der Regel eine unerwünschte Begleiterscheinung. Zum Teil konstruktiv bedingt – man denke etwa an die Schwingungen in Maschinen mit oszillierenden Massen, also z. B. alle Kolbenmaschinen, wo im Kurbeltrieb Reaktionskräfte auftreten, die auch durch einen aufwändigen Massenausgleich nicht vollständig zu kompensieren sind. In den meisten Fällen jedoch sind Schwingungen eine Folge von kleinen Imperfektionen oder mechanischen Fehlern, die unerheblich sind, solange bestimmte Toleranzgrenzen nicht überschritten werden. Unwucht sei hier als typisches Beispiel zitiert. Auch durch die sorgfältigsten Maßnahmen wird eine bestimmte Restunwucht nicht zu beseitigen sein, eine Verringerung durch hohen Aufwand würde auch jenseits bestimmter Grenzen keinerlei technischen Sinn mehr ergeben.

Da mechanische Imperfektionen und kleine Fehler immer eine Quelle von Schwingungen sind, geben uns die Schwingungen einer Maschine im Betrieb ein Abbild ihres mechanischen Zustandes. Daher spielen Schwingungsmessung und Schwingungsanalyse eine tragende Rolle in der Zustandsüberwachung von Maschinen.

Da, wie gesagt, Schwingungen auch schon im ordnungsgemäßen Zustand einer Maschine auftreten, sind sie ein sehr frühzeitiger Indikator sich anbahnender Fehler, lange noch vor Leistungsabfall, Überhitzung etc. Stinken wird es erst ganz am Ende.

Aber Vorsicht! Was ist es eigentlich, was uns interessiert? Die Schwingungen selbst nur in den wenigsten Fällen. Nur dort, wo es um explizit abstandsbezogene Fragen



geht wie z. B. Spielüberbrückung oder Schmierfilmdicke, ist die Amplitude, der gemessene Schwingweg von unmittelbarer Bedeutung. Gehen wir jedoch von außen an eine Maschine heran und messen die Schwingungen an einer zugänglichen Stelle im Lagerbereich, so ist die Schwingung selbst von sekundärer Bedeutung. Was uns primär eigentlich interessiert, sind die inneren Kräfte, die zufolge der oben genannten Imperfektionen und Fehler auftreten. Sie sind es, die letztendlich für Verschleiß und Maschinenschaden verantwortlich sind. Diese Kräfte zu messen ist in der Regel nicht möglich. Also misst man die Schwingungen an geeigneter Stelle und versucht, aus dem Schwingungsbild Rückschlüsse auf die inneren Kräfte zu ziehen.

Diese Vorgangsweise – man misst Schwingungen und versucht, aus den Messergebnissen Rückschlüsse auf die inneren Kräfte zu ziehen – ist von entscheidender Bedeutung bei der Beurteilung von Schwingungen. Diese Grundaufgabe sollte daher niemals aus dem Auge verloren werden. Man wird ihr im Lauf dieses Buches, direkt oder indirekt, ständig begegnen.

Was uns hier beschäftigen soll, ist die Frage: Wie kann man von außen, ohne Störung des Betriebes, über das Schwingungsbild in die Maschine sozusagen hinein hinhören, ihren aktuellen Laufzustand beurteilen, Schwingungen feinfühlig deuten im Hinblick auf sich anbahnende Fehler? Welche Hilfsmittel für Messung, Analyse, Nachauswertung und Interpretation stehen dem Praktiker zur Verfügung? Eine weitgespannte Fragestellung – viele Lösungswege, aber auch durchaus noch ungelöste Probleme. Ein Fragenkomplex, der auch heute nicht mit Rezepten, nicht mit allgemeingültigen Richtlinien vollständig abgedeckt werden kann.

Was in diesem Buch aufgezeigt werden soll ist der Weg, auf dem man in dieses Gebiet einsteigen kann. Was dann immer folgen muss, ist eine Lernphase, während der der Instandhaltungstechniker seine Maschine hinsichtlich des Laufverhaltens kennen lernt, wie ein guter Arzt seinen Patienten.

## 1.2 Zielsetzungen

Ursprünglich hatte man mit einer Maschinenüberwachung immer eine zustandsabhängige Wartungsplanung im Auge. Heute hat sich das Anwendungsfeld beträchtlich erweitert.

Maschinenüberwachungen installiert man mit folgenden Zielsetzungen:

- Schutz vor fatalen Schäden an Maschine, Umwelt oder Menschen
- Schutz vor unerwarteten Maschinenausfällen
- Zustandsabhängige Wartungsplanung
- Sicherung der Produktion
- Qualitätskontrolle

Bei den ersten drei der genannten Zielsetzungen steht die überwachte Maschine selbst im Zentrum (Umweltschäden sind die unmittelbare Folge eines fatalen Maschinenschadens). Es sind die bisher klassischen Aufgaben der Maschinenüberwachung.

Beim vierten Punkt, Sicherung der Produktion, steht zwar wieder die produzierende Maschine im Mittelpunkt, aber mit einem anderen Hintergrund. Hier geht es um den Produktionsausfall bei einem unerwarteten Maschinenstillstand, der vor allem bei

Engpassmaschinen fatal sein kann und den man durch eine Fehlerfrüherkennung zu vermeiden sucht.

Nun schließlich zum Thema Qualitätskontrolle: Verschlechtert sich der Zustand einer Werkzeugmaschine, wirkt sich das negativ auf die Qualität des Produktes aus, lange bevor von einer Gefährdung der Maschine die Rede sein kann. Damit eröffnet sich für das Konzept eine neue Dimension, was am besten an einem einfachen Beispiel zu erklären ist:

Der Ausfall eines (billigen) Scheibenwischemotors in einem (teuren) Auto hat eine Reparatur und damit Ausfallzeit für das Gesamtfahrzeug zur Folge. Beim Neuwagen ist ein solches Ereignis nicht nur für den Besitzer, sondern auch für den Hersteller des Fahrzeugs ärgerlich und kostspielig. Um solche Vorfälle möglichst auszuschließen, kann eine vielleicht aufwändige, wenn nur leistungsfähige Produktionsüberwachung für das an und für sich billige Serienprodukt (Scheibenwischemotor) durchaus von wirtschaftlichem Interesse sein, wenn es nur hilft, spätere Ausfälle zu vermeiden.

### **1.3 Konzepte**

Bei der Planung eines Überwachungssystems muss man sich zuallererst über Zielsetzung und praktische Realisierung klar werden. Fragen, die vom Inhalt her trivial erscheinen, deren sorgfältige Beantwortung aber überaus wichtig ist [N.33]. (*Man glaubt nicht, wie oft bereits hier die Basis für Fehlinvestitionen gelegt wird.*)

Als Zielsetzungen kommen folgende, hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Aufwand durchaus unterschiedliche Konzepte in Frage:

#### ***Überwachung***

Aufgabe einer reinen Überwachung ist es, zu erkennen, ob ein Fehler vorliegt und bei automatischen Systemen, im Fehlerfall selbsttätig eine Reaktion auszulösen (Alarm, Abschalten).

#### ***Fehlerfrüherkennung***

Ein System zur Fehlerfrüherkennung zeigt Maschinenfehler bereits im Frühstadium an, wobei ein weiterer Betrieb der Maschine noch über einen absehbaren Zeitraum unbedenklich möglich ist.

#### ***Fehlerdiagnose***

Mit Hilfe verschiedener Methoden der Signalanalyse versucht man, aus den gewonnenen Messdaten eine Fehlerdiagnose abzuleiten. Erstrebenswert ist in jedem Fall eine Fehlerfrühd Diagnose, weil man sich dann rechtzeitig auf Reparaturen vorbereiten kann.

#### ***Trendanalyse***

In ein System zur Fehlerfrüherkennung oder zur Frühd Diagnose werden oft Verfahren zur Trendanalyse integriert. Zunächst bleibt die Maschine lauffähig, auch wenn ein Fehler im Frühstadium erkannt worden ist.

## **Prognose**

Aus einer Trendanalyse versucht man eine Prognose abzuleiten, welche Restlaufzeit zur Verfügung steht, bevor der Fehler ein kritisches Ausmaß annehmen wird.

Bezüglich der Realisierung unterscheidet man zwischen permanenter Überwachung und intermittierender Überwachung.

### **Permanente Überwachung**

Permanente Überwachungssysteme sind fest installierte Mess- und Auswertesysteme. Sie sind im industriellen Bereich mit sehr hohem Aufwand verbunden. Man denke nur an die Eigensicherheit eines solchen Systems, die eine definierte, unmissverständliche und akzeptable (*keine Maschinenabschaltung*) Reaktion bei einem etwaigen Fehler im Überwachungssystem fordert. Dafür ist die Überwachung jedoch kontinuierlich aktiv. Man wird daher solche Systeme zur Vermeidung fataler Schäden einsetzen, vor allem wenn nach Auftreten eines Fehlers bis zum Schaden nur kurze Reaktionszeiten zur Verfügung stehen. In der Qualitätskontrolle stehen ebenfalls permanent installierte Systeme im Vordergrund.

### **Intermittierende Überwachung**

In der Regel ist zur Fehlerfrüherkennung und zur Frühdiagnose eine intermittierende Überwachung ausreichend. Dabei werden Messungen in regelmäßigen Abständen vor Ort mit mobilen Messgeräten durchgeführt. Systematische Auswertungen erfolgen in einem zentralen Rechner.

## **1.4 Die Idee der zustandsorientierten Maschinenwartung**

Prinzipiell gibt es vom Blickpunkt der Instandhaltung drei Methoden, Maschinen zu betreiben und zu warten:

- Fahren bis zum Bruch
- Vorbeugende Maschinenwartung
- Zustandsabhängige Wartung

### **1.4.1 Fahren bis zum Bruch**

Bei dieser „Methode“ wird die Maschine solange betrieben, bis sie eines Tages zu Bruch geht. Eine solche Vorgangsweise kommt nur bei solchen Maschinen in Betracht, bei denen ein plötzlicher Ausfall keine kritischen Folgeschäden nach sich zieht und die jederzeit schnell und problemlos ersetzt werden können.

Fahren bis zum Bruch ist landläufig eigentlich eine sehr verbreitete Methode. Werden doch alle Haushaltgeräte – Staubsauger, elektrische Kaffeemühlen, Waschmaschinen, Wäschetrockner etc. – nach diesem Prinzip betrieben. Sie sind bei Ausfall jederzeit schnell ersetzbar.

Im industriellen Bereich sind die Schwierigkeiten beim unerwarteten Ausfall einer Maschine größer. Erstens sind Ersatzmaschinen in der Regel nicht ab Lager zu beschaffen, zum anderen ist meist mit unmittelbaren Folgeschäden, z. B. Produktionsausfall zu rechnen.

### 1.4.2 Vorbeugende Wartung

Die vorbeugende Wartung ist heute noch die bekannteste, im industriellen Bereich wahrscheinlich die am weitesten verbreitete Methode. Um sich vor unerwarteten Ausfällen zu schützen, führt man Wartungsarbeiten in festen Revisionsintervallen durch.

Bild 1.1 zeigt den typischen zeitlichen Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit eines bestimmten Maschinentyps als Funktion der Betriebsdauer, beginnend mit einer neuen oder gerade überholten Maschine (*Badewannenkurve*).

Erfahrungsgemäß hat man am Anfang oft mit einer etwas erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit zu rechnen, bedingt durch Material- oder Montagefehler. Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird in der Anfangsphase sehr rasch auf einen niedrigen Wert absinken, der während des regulären Wartungsintervalls konstant bleibt oder nur geringfügig ansteigt. Nach entsprechend langer Betriebsdauer wird schließlich die Ausfallwahrscheinlichkeit aufgrund von Verschleiß oder Materialermüdung stark ansteigen.

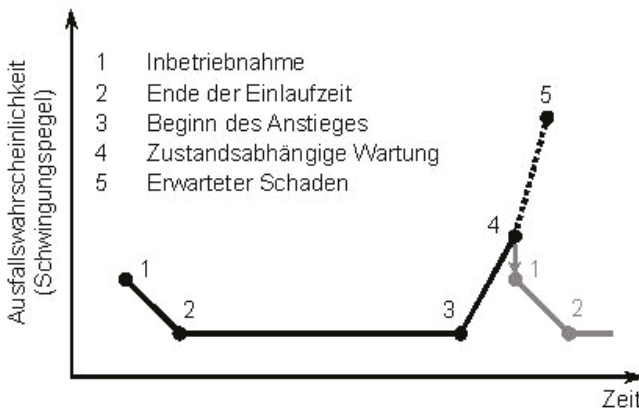


Bild 1.1: Typischer Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit einer Maschine während eines Wartungsintervalls (*Badewannenkurve*)

Soll eine vorbeugende Instandhaltung wirkungsvoll eingesetzt werden, muss der Inspektionszeitpunkt noch in den Bereich der niedrigen Ausfallwahrscheinlichkeit gelegt werden, und zwar mit gebührendem Sicherheitsabstand vom statistisch zu erwartenden Ausfallzeitpunkt. Daraus ergeben sich unmittelbar die Nachteile eines solchen Systems:

- Das Inspektionsintervall muss, vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkt aus gesehen, in jedem Fall zu kurz angesetzt werden
- Durch die Wartung kann die Ausfallwahrscheinlichkeit unmittelbar danach sogar ansteigen

Es soll an dieser Stelle bemerkt werden, dass das zugrunde gelegte Modell, die Badewannenkurve von Bild 1.1, nicht für alle Maschinentypen als typisch angesehen wird, vor allem, was die erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit am Beginn betrifft. Die Gültigkeit der Aussagen dieses und der folgenden Abschnitte wird dadurch jedoch prinzipiell nicht berührt.

### **1.4.3 Zustandsabhängige Wartung**

Bei der zustandsabhängigen Wartung werden während des Betriebes laufend Messdaten gesammelt und ausgewertet, die Rückschlüsse auf den mechanischen Zustand der Maschine gestatten. Verfolgt man den Trend der Messdaten über der Betriebszeit, können Veränderungen (in der Regel eine Verschlechterung) im mechanischen Zustand der Maschine erkannt werden. Eine Revision wird erst dann angesetzt, wenn die Messungen anzeigen, dass sich der Maschinenzustand zu verschlechtern beginnt (Punkt 4 in Bild 1.1).

Als besonders treffsicherer und empfindlicher Indikator für den mechanischen Laufzustand einer Maschine haben sich die mechanischen Schwingungen erwiesen, denn:

- Jede Maschine mit bewegten Massen erzeugt Schwingungen
- Schwingungen werden vorwiegend durch kleine Fehler und Imperfektionen verursacht
- Ein Ansteigen des Schwingungspegels bei gleich bleibendem Betriebs- und Lastzustand deutet auf eine Zustandsverschlechterung hin
- Durch gezielte Schwingungsmessungen ist man imstande, bestimmte Fehler bereits im Frühstadium zu erkennen, in dem ein Fortführen des Betriebes durchaus noch zulässig ist.

Durch Schwingungsanalysen ist vielfach bereits im Frühstadium, also noch während des Betriebes, eine Fehlerdiagnose möglich.

## **1.5 Breitbandige Schwingungsüberwachung**

Am Anfang aller dieser Techniken standen zunächst breitbandige Mess- und Beurteilungsverfahren. Sie zeichnen sich aus durch einfache Messverfahren, die Aussagen sind in der Regel jedoch ziemlich grob, geben jedoch gute Aussagen über den dynamischen Gesamtzustand einer Maschine. Möglichkeiten zur Frühdiagnose gibt es auf Basis der breitbandigen Verfahren kaum.

Die Beurteilung von Maschinenschwingungen nach solchen breitbandigen Verfahren ist nach wie vor sehr weit verbreitet. Man erhält als Messergebnis durchwegs Einzahlenwerte, deren Beurteilung weitgehend anhand von Erfahrungswerten erfolgt.

Breitbandige Verfahren sind hinsichtlich Messtechnik und Beurteilung in nationalen und internationalen Normen festgelegt [N.2] – [N.13]. Die Beurteilung erfolgt nach diesen Normen und erfordert in der Regel keine besondere fachliche Qualifikation. Die Messergebnisse sind zufolge der standardisierten Messbedingungen untereinander vergleichbar. Die wichtigsten dieser Normen sollen ihrer Bedeutung wegen in diesem Abschnitt kurz skizziert werden.

Breitbandige Verfahren sind zum einen Basis einer Betriebsüberwachung, sind aber auch als Grundlage für eine Maschinenabnahme ausgewiesen.

### 1.5.1 Schwingungen an nicht-rotierenden Bauteilen<sup>1</sup>

Die Normenreihe DIN ISO 10816 befasst sich mit der breitbandigen Messung und Beurteilung von Schwingungen nicht rotierender Bauteile [N.8] – [N.13]. Festgelegt sind sowohl Messwertgewinnung wie auch Beurteilung.

#### 1.5.1.1 Messwertgewinnung

Die Schwingungsmessungen erfolgen außen an der Maschine, es sind bestimmte Aufnehmerpositionen festgelegt, siehe Bild 1.2. Bandbreite und Frequenzgang der Messeinrichtung sind zwecks Vergleichbarkeit der Messergebnisse genormt [N.1].

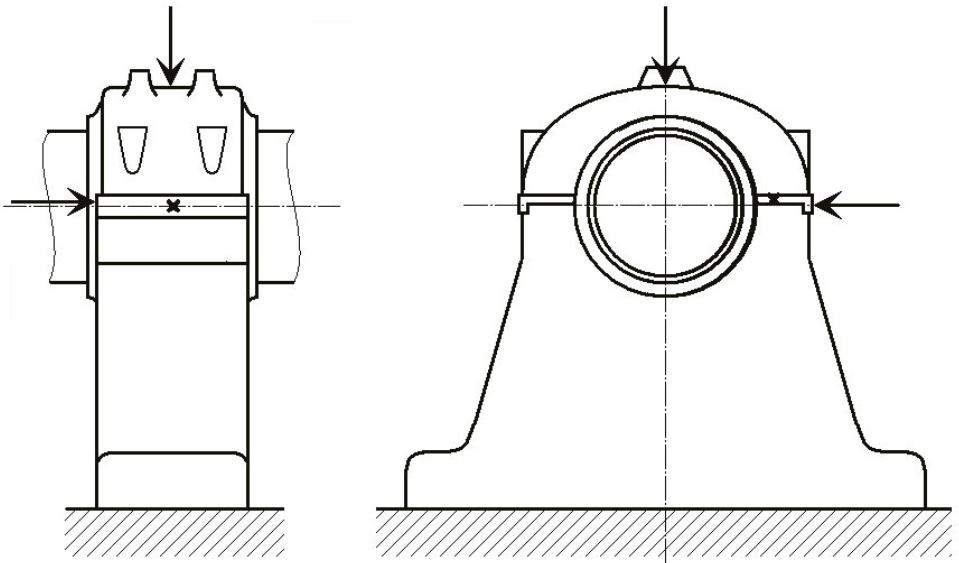


Bild 1.2: Messstellenauswahl für die Messung an nicht-rotierenden Teilen nach DIN ISO 10816 (Auszug)

#### 1.5.1.2 Beurteilung von Schwingungen nicht-rotierender Bauteile

Die Beurteilung der Schwingungen nach DIN ISO 10816 erfolgt anhand von Grenzkurven, wie sie in Bild 1.3 schematisch dargestellt sind. Das Frequenz–Amplitudenfeld wird durch die Grenzkurven in vier Zonen A bis D mit folgenden Beurteilungskriterien unterteilt:

<sup>1</sup> Als die Beurteilung dieser Schwingungen noch durch die Richtlinie VDI 2056 geregelt war, wurde oft von *Lagerschwingungsmessung* gesprochen

- Zone A – gut
- Zone B – brauchbar
- Zone C – noch zulässig
- Zone D – unzulässig

Darüber hinaus sind, ausgehend vom Grundzustand (Schwingungen der ordnungsgemäßen Maschine) maximal zulässige Änderungen angegeben.

Vektorielle Messungen, also die Messung von Einzelkomponenten nach Betrag und Phase, sind in diesen Dokumenten kurz beschrieben, im Übrigen wird diesbezüglich auf die Normen zur Schwingungsdiagnose verwiesen.

Die Norm ist in mehreren Blättern erschienen, in der die Grenzkurven spezifiziert nach verschiedenen Maschinengruppen quantifiziert sind.

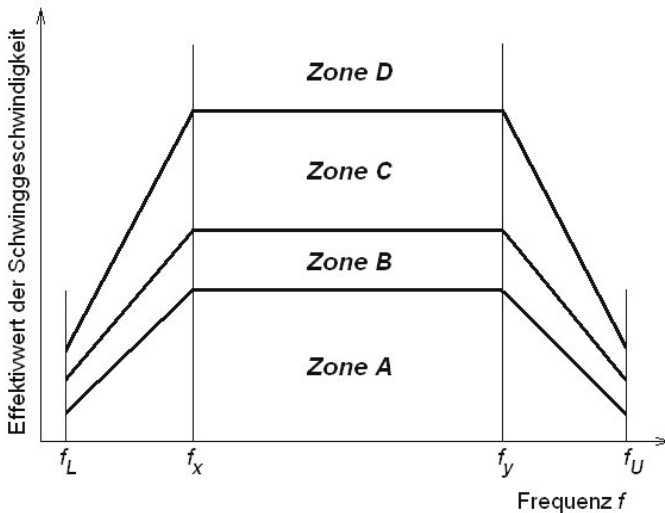


Bild 1.3: Grenzkurven zur Beurteilung von Schwingungen nach DIN ISO 10816

## 1.5.2 Messung und Bewertung von Wellenschwingungen

Parallel zur Messung an nicht-rotierenden Maschinenteilen wurde die Normenreihe DIN ISO 7919 zur Wellenschwingungsmessung herausgegeben [N.2] – [N.6]. Sie basiert auf der Erfassung der kinetischen Wellenbahn. Auch hier sind Messeinrichtung und Beurteilung in ähnlicher Weise spezifiziert.

### 1.5.2.1 Wellenschwingungsmessung

Zur Wellenschwingungsmessung wird die kinetische Wellenbahn vorzugsweise durch zwei in zueinander senkrechten Richtungen angebrachte berührungslose Aufnehmer gemessen, siehe Bild 1.4 und Bild 1.5. Die Welle wird somit quasi Bestandteil des Aufnehmers, Fertigungstoleranzen und technologische Eigenschaften, insbesondere Materialinhomogenitäten des Wellenwerkstoffes, haben störenden Einfluss auf das Messergebnis.

Es wird zur Messung die Bewegung der Welle entweder relativ zum Gehäuse (Lagerschale) oder absolut erfasst, die so genannte *kinetische Wellenbahn*. Als Kenngröße zur Beurteilung der Wellenschwingung wird entweder der Maximalwert  $s_{(p-p)max}$  des Spitze-Spitze-Schwingweges oder der Maximalwert  $s_{max}$  des Schwingungsaus-  
schlages vom zeitintegralen Mittelwert<sup>2</sup> verwendet, siehe Bild 1.5.

Die Installation einer Wellenschwingungs-Messeinrichtung wird im Allgemeinen sehr aufwändig sein.

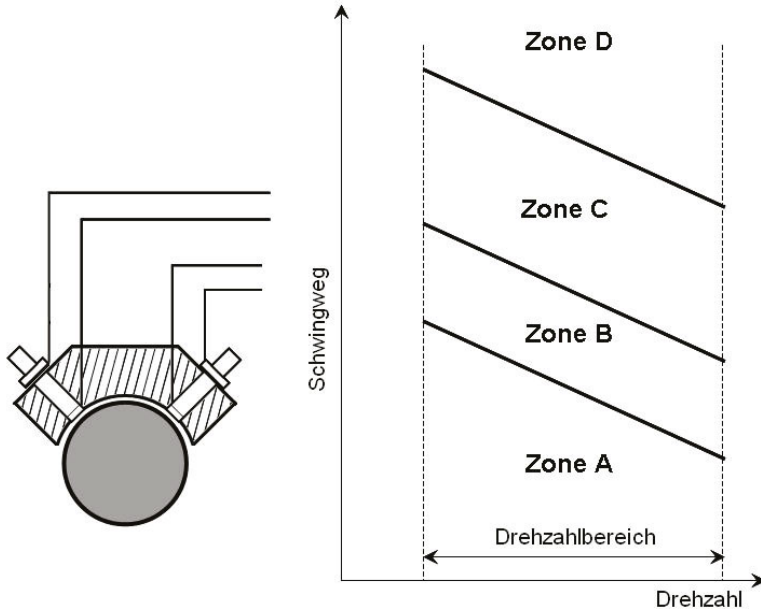


Bild 1.4: Messung (*links*) und Beurteilung (*rechts*) von Wellenschwingungen nach DIN ISO 7919

### 1.5.2.2 Beurteilung von Wellenschwingungen

Die Beurteilung der Wellenschwingungen erfolgt auch hier über ein Kennlinienfeld, rechts in Bild 1.4. Die Zonen A bis D haben die gleichen Bewertungen wie bei Schwingungen an nicht-rotierenden Bauteilen, nämlich

- Zone A – gut
- Zone B – brauchbar
- Zone C – noch zulässig
- Zone D – unzulässig

<sup>2</sup> Nomenklatur entsprechend DIN ISO 7919



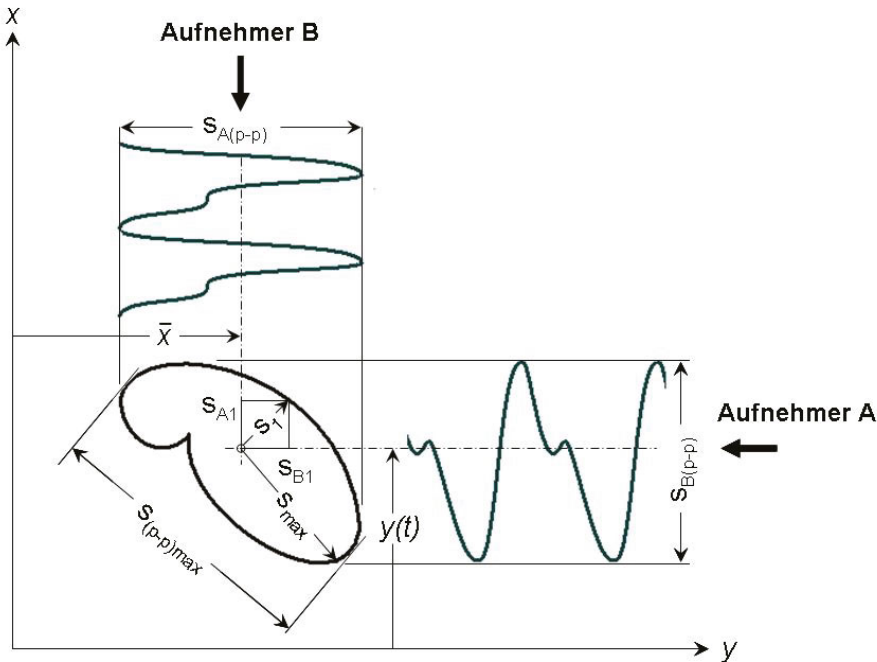


Bild 1.5: Messwertbildung zur Wellenschwingungsmessung nach DIN ISO 7919

Auch für Wellenschwingungen sind zusätzlich maximal zulässige Änderungen angegeben.

Vektorielle Messungen, also die Messung von Einzelkomponenten nach Betrag und Phase, sind in diesen Dokumenten kurz beschrieben, im Übrigen wird diesbezüglich auf die Normen zur Schwingungsdiagnose verwiesen.

### 1.5.3 Gegenüberstellung

Grundsätzlich wären zur Beurteilung von Schwingungen beide Bewertungen parallel durchzuführen, wobei das jeweils schärfere Kriterium zum Tragen kommt. Im Allgemeinen wird jedoch bei den meisten Maschinenarten eines der beiden überwiegen. So dass man sich auf eine Messtechnik beschränken wird. Speziell für die Überwachung von Turbomaschinen kommt überwiegend die Beurteilung von Wellenschwingungen zur Anwendung.

Zusammenfassende Hinweise über die richtige Auswahl findet man in der Richtlinie VDI 3841 [N.67].

## 2 Mess- und Analysesysteme

---

### 2.1 Human Resources

Ganz am Beginn in der Geschichte der Maschinenüberwachung und Diagnose stand die Beurteilung des Schwingungsverhaltens bzw. des Laufzustandes durch das geschulte Ohr des erfahrenen Beobachters. Im Grunde genommen sind die meisten Verfahren der Frequenzanalyse vom Ansatz her auch als messtechnische oder mathematische Nachbildung solcher perzeptiver Eigenschaften zu interpretieren.

Dass auch heute noch die gehörmäßige Beurteilung eine große Rolle spielt, lehrt die Erfahrung und zeigt ein aktuelles Angebot eines bekannten Instandhalters, Bild 2.1.



Bild 2.1: Horchgerät SOUND.CHECK (FAG)

### 2.2 Serielle Analysatoren

Die in Bild 2.2 dargestellten Geräte – serieller Analysator mit durchstimmbarem Analogfilter, Schallpegelmesser mit Aufnehmer-Vorverstärker, analoges Vielkanal-Bandgerät – waren lange Zeit Rückgrat eines leistungsfähigen Analysesystems zur Maschinendiagnose, sind aber heute in dieser Form nicht mehr gebräuchlich und im Angebot der Messgerätehersteller wohl kaum mehr zu finden. Dass sie dennoch an

dieser Stelle platziert werden, hat nicht nur historischen Charakter<sup>3</sup>. Das analoge Filter, Kern des seriellen Analysators, stellt hinsichtlich seiner Funktionalität ein Analogon zu einem mechanischen Einmassenschwinger dar. Durch diese Analogie werden wesentliche Eigenschaften aber auch Grenzen eines Filters für den klassischen Maschinenbauer deutlich griffiger. Wenn man also später im Lauf des Textes bei so manchen Erklärungen ein analoges Filter im Hintergrund sieht oder sehen will, so ist der Grund in dieser Analogie zu suchen. Die in späteren Abschnitten rein digital basierten Abhandlungen des gleichen Themas werden damit ihrerseits auch besser verständlich und plausibel.

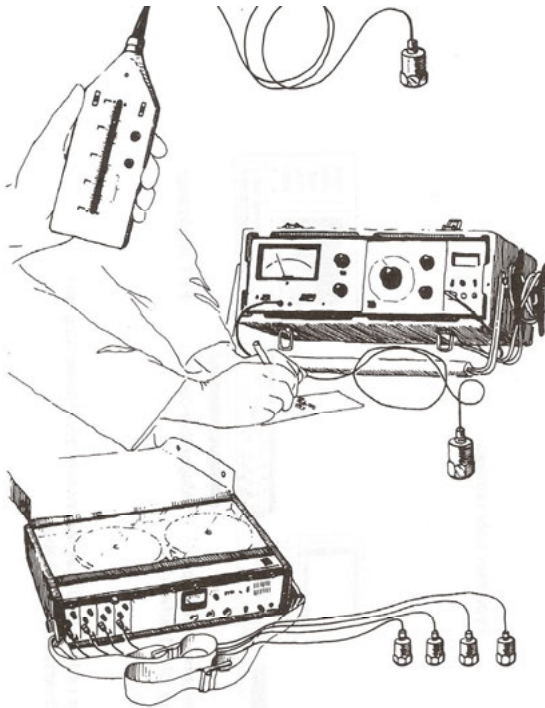


Bild 2.2: Historische Geräte zur Schwingungsanalyse

Die Analogie zwischen elektrischem Filter und mechanischem Schwinger ist allerdings nicht nur von rein theoretischer Natur, es wurden und werden auch Frequenzanalysatoren auf mechanischer Basis nach diesem Prinzip aufgebaut. Im nächsten Abschnitt zwei Beispiele.

---

<sup>3</sup> Um ein gewachsenes (also nicht schon immer da gewesenes) Ding zu verstehen muss man zweierlei untersuchen: Die *Funktionalität* und seine *Geschichte*. Zitat Prof. Gerhard Haszprunar, LMU München

## 2.3 Mechanische Frequenzanalyse

Ein einfaches Messgerät für Drehzahlen und Frequenzen auf Basis eines mechanischen Schwingers ist in Bild 2.3 zu sehen. An das schwingende Objekt angehalten, wird die Länge des auskragenden Stahl drahtes (Pfeile in Bild 2.3) über eine Drehscheibe bis zur (sichtbaren) Resonanz verstellt, die Frequenz oder Drehzahl ist an der Skalenscheibe ablesbar.

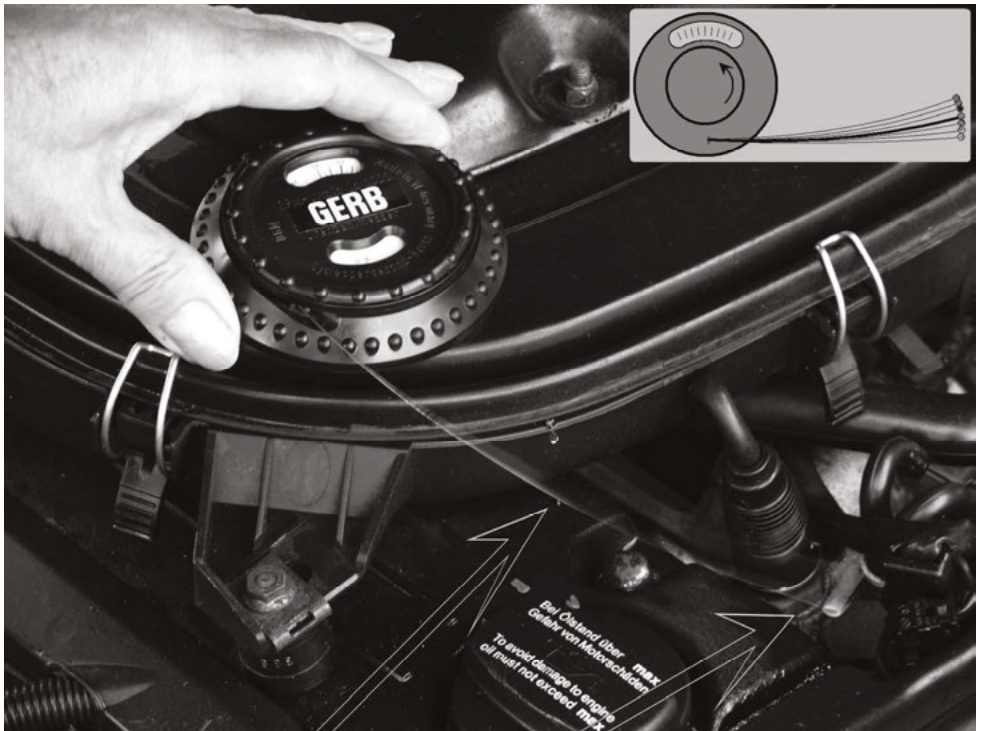


Bild 2.3: Mechanisches Filter zur Frequenzanalyse (Sirometer)

Ein mechanischer Echtzeit-Frequenzanalysator ist der heute durchaus noch gebräuchliche Zungenfrequenzmesser nach Bild 2.4. Er besteht aus einem Kamm, dessen elastische Zungen präzise auf eng benachbarte Eigenfrequenzen abgestimmt sind, siehe oben im Bild. Die Ansicht von der Stirnseite durch die Frontplatte des Messgerätes – unten im Bild – zeigt die Schwingungsfrequenz bei der Zunge mit den größten Ausschlägen.

Analysatoren dieser Art werden für enge Frequenzbereiche und zum Einsatz in rauer Umgebung eingesetzt. Am häufigsten findet man sie in Kraftwerken zur Überwachung der Netzfrequenz.

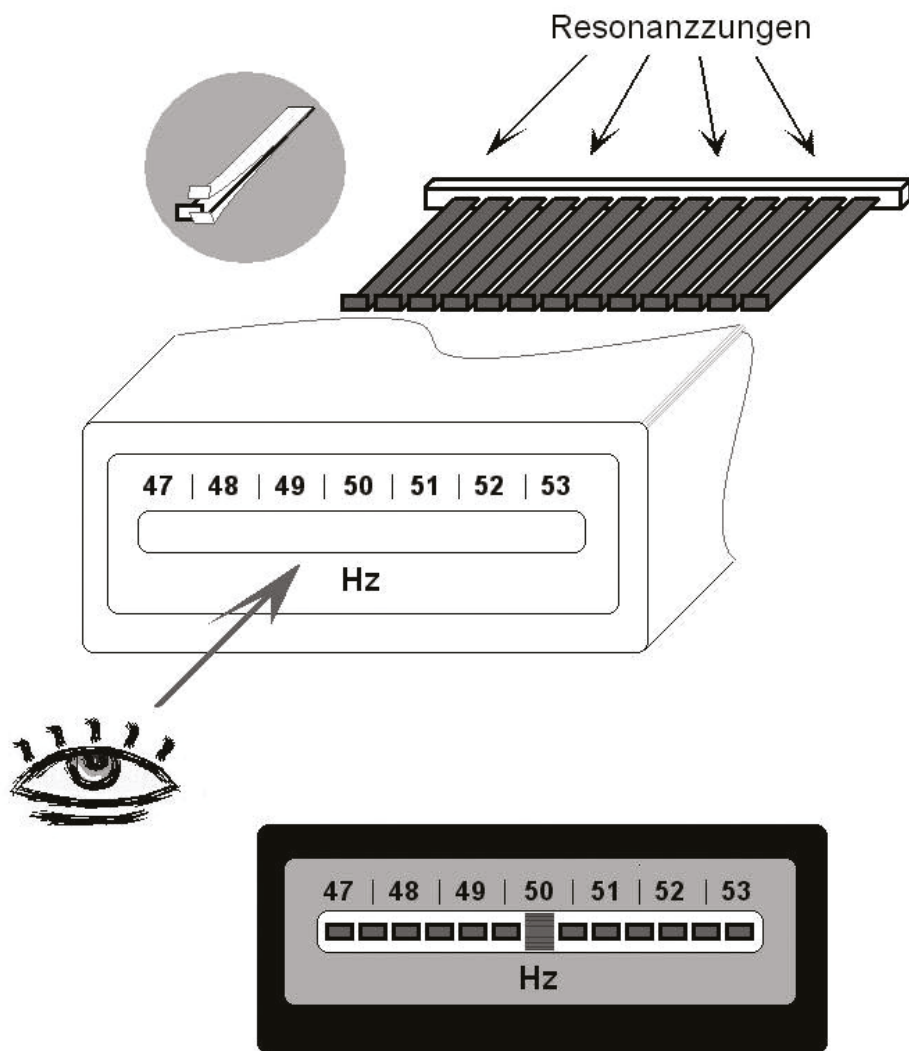


Bild 2.4: Zungenfrequenzmesser zur Überwachung der Netzfrequenz

## 2.4 Digitale Filter

Filter werden heute auf digitalem Weg realisiert. Beim so genannten *FIR*-Filter<sup>4</sup> wird zum Beispiel das digitalisierte Eingangssignal mit der Impulsantwort des entworfenen Filters gefaltet. (*Analogie zum mechanischen Schwinger.*)

In der Maschinendiagnose spielen digitale Filter wegen ihrer speziellen Eigenschaften eher eine Nebenrolle. Hauptsächlich werden sie für Terz/Oktav-Analysatoren eingesetzt. Analysatoren dieses Typs eignen sich eher für Überwachungszwecke. Darauf wird in den entsprechenden Abschnitten noch näher eingegangen.

Viele FFT-Analysatoren sind zusätzlich mit digitalen Filtern zur  $n$  tel-Oktavanalyse auf Basis digitaler Filter ausgerüstet.

Sollen einzelne Frequenzkomponenten mit fester Frequenz für sich untersucht werden, setzt man oft digitale Filter zum Extrahieren dieser Komponenten ein. So kann eine Maschine gezielt auf Unwucht, Ausrichtungsfehler oder Wälzlagerfehler überwacht werden.

Ein Beispiel für die Realisierung eines digitalen Filters mit moderner, anwendernaher Software wird in Abschnitt 2.10.3 vorgestellt.

## 2.5 Frequenzanalysatoren

FFT-Analysatoren bilden das Rückgrat praktisch jedes Systems zur Schwingungsanalyse. Sie werden als leistungsfähige eigenständige Geräte angeboten, ein Beispiel zeigt Bild 2.5.



Bild 2.5: Tragbarer FFT-Analysator – 4-Kanal Kompaktgerät

<sup>4</sup> Finite Impulse Response – endlich lange Impulsantwort