

Inhaltsverzeichnis

1	Aufbau von Maschinen mit rotierenden Wellen.....	1
1.1	Einleitung.....	1
1.2	Laufunruhe bei starren und biegeelastischen Rotoren unter Unwucht; Instabilität und Selbsterregung.....	6
1.3	Zur mathematischen Behandlung	14
1.4	Zeittafel.....	15

Der starre Rotor

2	Auswuchten starrer Körper	17
2.1	Einleitung.....	17
2.2	Fliehkraftbilanz.....	19
2.3	Auswuchten ohne Testgewichtssetzungen – Kräfte messendes Wuchten in harten Lagern	23
2.4	Auswuchten in drei Läufen, Betriebswuchten – Wege messendes Wuchten in weichen Lagern	24
2.5	Wuchtmaschinen.....	28
2.6	Zur Meßtechnik	29
2.7	Zulässige Restunwuchten und Restschwingungen	31
2.8	Fragen	35

Der Lavalläufer – Wälzlagerung

3	Der dämpfungsfreie Lavalläufer in starren Lagern.....	37
3.1	Überblick	37
3.2	Der unwuchtige Lavalläufer – freie und erzwungene Schwingungen	39
3.3	Der Lavalläufer mit Schlag und Unwucht	53
3.4	Darstellung in komplexen, raumfesten Koordinaten	58
3.5	Darstellung in mitrotierenden Koordinaten	64
3.6	Zusammenfassung und Generalisierung.....	68
3.7	Fragen	73

4	Lavalläufer mit innerer und äußerer Dämpfung	75
4.1	Übersicht.....	75
4.2	Äußere Dämpfung	75
4.3	Innere Dämpfung.....	83
4.4	Innere und äußere Dämpfung	87
4.5	Mechanismen der inneren Dämpfung.....	92
4.6	Zusammenfassung, praktische Konsequenzen	98
4.7	Fragen	100
5	Der Lavalläufer in orthotrop-elastischen Lagern	101
5.1	Übersicht.....	101
5.2	Der ungedämpfte orthotrop gelagerte Läufer	102
5.2.1	Die Bewegungsdifferentialgleichungen und ihre Lösung	102
5.2.2	Gleichlauf und Gegenlauf.....	105
5.2.3	Biegebeanspruchungen der Welle bei Gleich- und Gegenlauf.....	108
5.3	Innere Dämpfung, äußere Dämpfung und die Verbesserung der Stabilität durch Lagerorthotropie.....	110
5.4	Zusammenfassung, Generalisierung.....	114
5.5	Fragen	117
6	Der Lavalläufer mit Lagerdämpfung aus Gummi-Elementen.....	119
6.1	Einleitung.....	119
6.2	Mechanisches Modell	120
6.3	Bewegungsgleichungen, Stabilität.....	121
6.4	Unwuchterzwungene Schwingungen	126
6.5	Verlustfaktor- und Steifigkeitsermittlung von O-Ringen	129
6.6	Fragen	131
7	Verhalten des Lavalläufers in der kritischen Drehzahl und die beschleunigte Fahrt durch die Resonanz.....	133
7.1	Einleitung.....	133
7.2	Auswandern der Welle in der kritischen Drehzahl	133
7.3	Zur Phänomenologie der instationären Resonanzdurchfahrt.....	138
7.4	Die Bewegungsgleichungen bei instationärem Betrieb und ihre Lösung	141
7.5	Starker Antrieb oder geringe Exzentrizität – volle Kraft voraus.....	143
7.6	Schwacher Antrieb oder hohe Exzentrizität – der Hängenbleiber.....	145
7.7	Verallgemeinerung	147
7.8	Fragen	148

8	Einschwingverhalten des Lavalläufers bei plötzlicher Unwucht – Schaufelbruch.....	149
8.1	Einleitung.....	149
8.2	Die Bewegungsgleichungen	149
8.3	Lösung der Bewegungsgleichungen	152
8.4	Diskussion der Lösungen.....	153
8.5	Fragen	158
9	Einfluß der Kreiselwirkung.....	159
9.1	Übersicht.....	159
9.2	Bewegungsgleichungen	162
9.3	Freie Wellenschwingungen	168
9.4	Unwuchterzwungene Wellenschwingungen.....	174
9.5	Biegekritische Drehzahlen bei gegenläufiger Erregung	182
9.6	Anisotrop elastisch gelagerter Rotor unter Kreiselwirkung.....	188
9.7	Fragen	190

Mehrscheiben- und Kontinuumsrotoren – Wälzlagerung

10	Kritische Drehzahlen und Unwuchtantwort von Mehrscheiben und Kontinuumsrotoren	191
10.1	Einleitung.....	191
10.2	Der Mehrscheibenrotor	191
10.3	Der Kontinuumsrotor.....	201
10.4	Dämpfungseinfluß bei wälzgelagerten Rotoren	205
10.5	Fragen	206
11	Der Einfluß von Schubelastizität und Kreiselwirkung auf die Kritischen Drehzahlen der glatten Welle und des Vielscheibenrotors.....	207
11.1	Zur Modellbildung.....	207
11.2	Bewegungsgleichungen, homogene Lösungen.....	210
11.3	Drehzahlabhängige Eigenfrequenzen und kritische Drehzahlen einer schlanken Welle und einer mit vielen Scheiben besetzten Welle	213
11.4	Notwendige Nachschrift	215
11.5	Fragen	216

Rotoren in Gleitlagern

12	Gleitlagertheorie	217
12.1	Einleitung.....	217
12.2	Die Reynolds-Differentialgleichung und die Randbedingungen	220
12.3	Lösung der Reynoldsgleichung	224
12.4	Linearisierung der Ölfilmkräfte, Feder- und Dämpfungszahlen	227
12.5	Statische und dynamische Eigenschaften des kurzen Kreislagers	229
	12.5.1 Vereinfachungen beim kreiszylindrischen Kurzlager.....	229
	12.5.2 Kraft-Bewegungsgesetz	230
	12.5.3 Die Ortskurve der statischen Ruhelage des Wellenzapfens.....	232
	12.5.4 Feder- und Dämpfungskonstanten des Ölfilms	235
	12.5.5 Dynamische Nachgiebigkeit des Ölfilms.	240
12.6	Statische und dynamische Eigenschaften von Gleitlagern mit anderen Geometrien.....	242
12.7	Fragen	250
13	Der horizontale Läufer in Gleitlagern	251
13.1	Einleitung.....	251
13.2	Der starre Läufer in Gleitlagern.....	252
	13.2.1 Die Bewegungsgleichungen	253
	13.2.2 Eigenschwingungen, Stabilität des starren Läufers in Gleitlagern	255
	13.2.3 Unwuchterzwungene Schwingungen des starren Läufers in Gleitlagern.....	260
13.3	Der elastische Läufer in Gleitlagern	268
	13.3.1 Die Bewegungsgleichungen	268
	13.3.2 Eigenschwingungen, Stabilität des elastischen Läufers in Gleitlagern	270
	13.3.3 Unwuchterzwungene Schwingungen des elastischen Läufers in Gleitlagern.....	277
13.4	Fragen	282
14	Der vertikale Rotor in Gleitlagern	283
14.1	Einleitung.....	283
14.2	Der starre Rotor in Gleitlagern	285
	14.2.1 Bewegungsgleichungen	285
	14.2.2 Unwuchterzwungene Schwingungen	286
	14.2.3 Unwuchterzwungene Schwingungen für den starren Rotor in kreiszylindrischen Kurzlagern.....	289

14.2.4	Stabilität der Kreisbahnen beim kreiszylindrischen Kurzlager	291
14.2.5	Unwuchterzwungene Schwingungen des starren Rotors in Kippsegmentlagern	294
14.3	Der elastische Lavalläufer in Gleitlagern	296
14.3.1	Bewegungsgleichungen	296
14.3.2	Unwuchterzwungene Schwingungen	298
14.3.3	Unwuchterzwungene Schwingungen des Lavalläufers in kreiszylindrischen Kurzlagern	301
14.3.4	Die Stabilität der Kreisbahnen	306
14.4	Fragen	308
15	Quetschöldämpfer	309
15.1	Einleitung	309
15.2	Dynamische Eigenschaften von Quetschöldämpfern, Kraft - Bewegungsgesetze	312
15.2.1	Dämpfungskonstanten nach der Kurzlagertheorie	313
15.2.2	Dämpfungskonstanten nach der Breitlagertheorie	319
15.3	Der starre Läufer in Quetschöldämpfern	322
15.3.1	Bewegungsgleichungen	323
15.3.2	Unwuchterzwungene Schwingungen des starren Läufers in kurzen Quetschöldämpfern – ohne Kavitation	324
15.3.3	Unwuchterzwungene Schwingungen des starren Rotors in kurzen kavitierenden Quetschöldämpfern; nicht-lineare Rechnung	327
15.4	Beispiele industrieller Anwendung	329
15.5	Fragen	332

Magnetisch gelagerte Rotoren

16	Permanentmagnetische Lagerung von Rotoren	333
16.1	Einleitung	333
16.2	Kräfte und Steifigkeiten von Permanentmagnet-Lagern	334
16.3	Das magnetische Dipolmodell	339
16.4	Das Strombelagsmodell	344
16.5	Steifigkeiten einfacher, ringförmiger, permanentmagnetischer Lager	345
16.6	Starrer Rotor in permanentmagnetischen Lagern	352
16.7	Bauformen, Skalierungsregeln	356
16.8	Levitron – ein Beispiel für die vollständige permanentmagnetische Lagerung eines Rotors	357
16.9	Fragen	358

17	Der starre Rotor in aktiven Magnetlagern	359
17.1	Einleitung.....	359
17.2	Aufbau eines aktiven Magnetlagers.....	360
17.3	Die Systemgleichungen von Magnetlager, Regler und Rotor bei PD-Rückführung.....	363
17.4	Lösung der Bewegungsgleichungen, Systemverhalten bei PD-Regelung	365
17.5	Systemverhalten bei Integralrückführungen	368
17.6	Regelungsziele, Schaltungen von Magnetlagern	370
17.7	Kippfreiheitsgrade	373
17.8	Fragen	374
18	Der elastische Läufer in aktiven Magnetlagern.....	375
18.1	Einleitung.....	375
18.2	Einsatz als aktives Hilfssystem.....	375
18.3	Zweifache Magnetlagerung eines elastischen Rotors	377
18.4	Schlußbemerkung	381

Unrunde und zeitvariante Systeme

19	Die unrunde Welle.....	383
19.1	Einleitung.....	383
19.2	Bewegungsdifferentialgleichungen und Lösungen.....	385
19.3	Die unrunde Welle in orthotroper Lagerung.....	397
19.4	Unrunde Welle in Gleitlagern.....	403
19.5	Fragen	404
20	Der zweiflüglige Propeller	405
20.1	Einleitung.....	405
20.2	Mechanisches Modell, Bewegungsgleichungen.....	405
20.3	Homogene Lösung und Stabilität des ungedämpften Systems..	409
20.4	Dämpfungseinfluß auf die Stabilität.....	413
20.5	Unwuchterzwungene Schwingungen	414
20.6	Schlußbemerkung	417
20.7	Fragen	419
21	Der Lavalläufer mit angerissener Welle.....	421
21.1	Einleitung.....	421
21.2	Ein einfaches Rissmodell.....	421
21.3	Die Bewegungsgleichungen und ihre Linearisierung bei horizontaler Welle – der atmende Riss	427
21.4	Stabilität.....	430
21.5	Erzwungene Schwingungen	433

21.5.1	Risserzwungene Schwingungen	433
21.5.2	Unwucht- und Rissantwort	439
21.6	Schlußbemerkung	440
21.7	Fragen	440

Rotor-Fluid-Interaktion

22	Berührungslose Flüssigkeitsdichtungen	443
22.1	Einleitung	443
22.2	Modellbildung und Lösungsansätze für fluid- dynamische Berechnungen	447
22.3	Das Bulk-Flow-Modell	449
22.3.1	Grundgleichungen der Bulk-Flow-Theorie	450
22.3.2	Lösungswege zur Berechnung	453
22.4	Parameterstudie an einem glatten Dichtspalt	460
22.5	Einflussstudien an einer Laval-Welle	466
22.6	Schlußbemerkung	476
22.7	Fragen	477
23	Berührungslose Gasdichtungen	479
23.1	Einleitung	479
23.2	Kräfte in Gasdichtungen	481
23.3	Einteilung berührungsloser Gasdichtungen	482
23.4	Funktionsprinzip einer Labyrinthdichtung	484
23.5	Modellbildung und Lösungsansätze	486
23.5.1	Berechnung der Leckage	486
23.5.2	Berechnungsverfahren für die rotordynamischen Koeffizienten	490
23.6	Einflussgrößen auf die rotordynamischen Koeffizienten	495
23.7	Anwendungsbeispiel: Hochdruckkompressor	503
23.7.1	Vorgegebenes Datenmaterial für den Radialkompressor	503
23.7.2	Berechnung der Labyrinthdichtungen	505
23.7.3	Untersuchung der Eigenschwingungen mit der FE-Methode	507
23.8	Fragen	509
24	Spalterregung in Turbinen – Thomas-Kräfte.....	511
24.1	Einleitung	511
24.2	Ansatz für die Spalterregungskräfte – Modellbildung	512
24.3	Der lokale Wirkungsgradverlust $\zeta_{sp}(\Theta)$	515
24.4	Die Spalterregungskonstante k_s	518
24.5	Die destabilisierende Wirkung der Spalterregung	518

24.6	Fragen	520
25	Luftkraftsteifigkeiten und -dämpfungen von Windturbinen und die Gondelwhirl-Stabilität.....	521
25.1	Einleitung.....	521
25.2	Luftkraftsteifigkeit und -dämpfung	523
25.3	Systematische Ermittlung der Propeller-Derivativa	526
25.4	Mechanisches Modell des elastisch gebetteten Triebstranges ...	528
25.5	Gondelstabilität einer größeren Windkraftanlage.....	530
25.6	Stabilitätsgrenze formelmäßig	533
25.7	Schlußbemerkung	535
25.8	Fragen	536

Rotor-Stator-Berührung

26	Der sanft anstreifende Rotor	537
26.1	Einleitung.....	537
26.2	Die Bewegungsgleichungen	541
26.3	Lösung der elasto-thermischen Bewegungsgleichung.....	546
26.4	Diskussion der Anstreif-Lösung – das Spiralen	548
26.5	Stabilität der Spirale.....	549
26.6	Periodendauer der Spirale.....	551
26.7	Beispiel Turbokompressor.....	552
26.8	Schlußbemerkung	553
26.9	Fragen	554
27	Die harte Statorberührung – Fanglager	555
27.1	Einleitung.....	555
27.2	Resonanzpassage mit im Fanglager anliegendem Rotor	557
27.3	Kinematisches Rückwärtsrollen – dry friction whirl.....	563
27.4	Die Bewegungsgleichungen bei Rotor-Stator-Berührung	567
27.5	Plötzlicher Schaufelverlust mit anschließendem Anstreifen der Welle – digitale Simulation	568
27.6	Schlußbemerkung	572
27.7	Fragen	573

Rotor-Fundament-Interaktion

28	Verschiebung der kritischen Drehzahlen des Rotors durch Einfluß von Gehäuse- und Fundamentdynamik	575
28.1	Einleitung.....	575

28.2	Verschiebung der Eigenfrequenzen durch Lager- und Bocknachgiebigkeiten.....	576
28.3	Genauere Betrachtung der Rotor-Fundament-Interaktion	580
28.4	Fragen	586
29	Ausnutzung der Fundamentdämpfung zur Beruhigung der Rotorschwingungen – die Abstimmung $\omega_R \approx \omega_F$	587
29.1	Einleitung.....	587
29.2	Freie Schwingungen – das Durchdringen der Fundamentdämpfung bei $\omega_R \approx \omega_F$	589
29.3	Unwuchtantwort	592
29.4	Verbesserung der Stabilität des Rotors durch Ausnutzen der Fundamentdämpfung	594
29.5	Schlußbemerkung	598
30	Lavalläufer – Blockfundament – elastischer Halbraum	599
30.1	Einleitung.....	599
30.2	Die Halbraumsteifigkeiten und -dämpfungen.....	601
30.3	Bewegungsgleichungen, Unwuchtlösungen und Reduktion der Parameter	603
30.4	Unwuchtantwort – Optimalauslegung	606
30.5	Stabilitätserhöhung durch den Bodeneinfluß.....	609
30.6	Gleitlagerung	610
30.7	Zusammenfassung, Schlußbemerkung	610
30.8	Fragen	611

Maschinenüberwachung und Diagnose

31	Schwingungsüberwachung von Maschinen – Normen und Richtlinien	613
31.1	Einleitung.....	613
31.2	Anordnung der Schwingungsaufnehmer und deren Eigenschaften.....	618
31.3	Kleiner Vergleich von Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmessungen	623
31.4	Beurteilung von Lagergehäuse- und Wellenschwingungen – Zulässige Werte, Normen und Richtlinien.....	624
31.5	Schlußbemerkung	625
31.6	Fragen	625
32	Maschinendiagnose – Signalanalytische Betrachtungen und Orbitkinematik	627
32.1	Einleitung.....	627

32.2	Elliptische Orbits in ein- und zweiseitiger Fourierdarstellung ..	627
32.3	Orbitkinematik	631
32.4	Die Transformation zwischen inertialen und mitrotierenden Koordinaten – Spektralshift	637
32.5	Differenzdiagnose, Trendanalyse	638
32.6	Schlußbemerkung	639
32.7	Fragen	640
33	Diagnosehinweise – Störschwingungen und ihre Ursachen	641
33.1	Einleitung.....	641
33.2	Erkennungskriterien für Rotorinstabilitäten	642
33.3	Ursachen von $\pm 1\Omega$ Orbits – Ellipsenbahnen	643
33.4	Ursachen von $\pm n \Omega$ Orbits	646
33.5	Bruchteilmfrequenzen – Rosetten, n/m Orbits.....	648
33.6	Wälzlagerfehler.....	649
33.7	Typische Signale von Getrieben, Elektromaschinen, Gebläsen etc.....	652
33.8	Schlußbemerkung	657
34	Modellgestützte Maschinenüberwachung und -diagnose	659
34.1	Einleitung.....	659
34.2	Modellgestützte Beobachtung	662
34.3	Überwachung mittels angelernter Neuro-Fuzzy-Logik	664
34.4	Begleitende Ermittlung der Rest-Lebenserwartung mit Hilfe von Beobachtern	669
34.5	Schlußbemerkung	671
	Literaturverzeichnis.....	673
	Sachverzeichnis	701

Rotordynamik

Gasch, R.; Nordmann, R.; Pfützner, H.

1975, XVIII, 706 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-41240-3