Inhaltsverzeichnis

Einleitung XVI

1. Dynamik des unwuchtigen starren Körpers 1

1.1 Begriffsbestimmung der Unwucht 1

1.1.1 Kennzeichen eines ausgewuchteten Rotors 1

1.1.2 Bedeutung des Begriffes "Auswuchten" 4

1.1.3 Elementare Zusammenhänge zwischen Schwerpunktsverlagerung, Fliehkraft und Unwucht 6

1.1.4 Einheiten der Unwucht 12

1.2 Mechanik der unwuchtigen Scheibe mit raumfester Drehachse 13

1.2.1 Statik der Fliehkräfte im rotorfesten Koordinatensystem 13

1.2.2 Bedingungen für das Gleichgewicht der Fliehkräfte an der achsensenkrechten dünnen Scheibe mit raumfester Drehachse . . 15

1.2.3 Kennzeichen der unwuchtigen achsensenkrechten Scheibe 17

1.2.4 Wege zum Massenausgleich bei einer Scheibe 24

1.2.5 Vergleich der Scheibe im Schwerefeld und der Scheibe im Zentrifugalkraftfeld 25

1.2.6 Anschauliche Deutung und angenäherte Berechnung der Unwuchtwirkung der schrägen, also taumelnd umlaufenden Scheibe 28

1.2.7 Berechnung des Unwuchtmomentes einer schrägstehenden Scheibe beliebiger Stärke 33

1.2.8 Ersatzmassen-Systeme zur Berechnung der Massenwirkung von Scheiben, Ringen, Walzen und Zylindern 36

1.3 Statik der Fliehkräfte und Unwuchten am allgemein gestalteten starren Rotor 39

1.3.1 Zwei komplementäre Unwuchten als wuchttechnisch wichtigste Zusammenfassung aller Unwuchten im Rotor 39

1.3.2 Übertragung von komplementären Unwuchten auf andere Radial-Ebenen 41

1.3.3 Allgemeine und spezielle Bedingungen für das Gleichgewicht der Fliehkräfte am Rotor mit raumfester Drehachse 43

1.3.4 Zusammenfassung aller Rotorunwuchten zu einer Unwuchtdyname, bestehend aus Unwucht-Resultierender und Unwuchtpaar 51

1.3.5 Übergang von zwei komplementären Unwuchten zu Unwucht-resultierender und Unwuchtpaar 56

1.3.6 Überblick über die Darstellungsmöglichkeiten für die Unwuchten eines Rotors 58

1.4 Schwerpunktsverlagerung und Winkelverlagerung der zentralen Hauptträgheitsachse unter dem Einfluß einer Einzelunwucht 63

1.4.1 Ableitung der Berechnungsformeln für die Winkelverlagerung der Hauptträgheitsachse 63

1.4.2 Der Taumelpunkt als Schwingmittelpunkt der freien räumlichen Bewegung eines Wuchtkörpers mit einer einzelnen Übermasse . . 68

1.4.3 Wirkung einer Einzelunwucht an einem "Kugelkreisel" 70

1.5 Kinematik der Achsenschwingungen eines unwuchtigen Rotors 72

1.5.1 Schwingungen der Lager als Informationsquelle 72

1.5.2 Geradlinige periodische Schwingungen eines Punktes und ihre Kennzeichen 72

1.5.3 Die geradlinige harmonische Schwingbewegung und ihre Darstellung durch die erzeugende Kreisbewegung 74

1.5.4 Harmonische Schwingbewegung der Rotorachse in einer Ebene . . 78

1.5.5 Harmonische Bewegung der Rotorachse im Raum 80

1.6 Kinetik des unwuchtigen Rotors als Grundlage der Unwuchtmessung . . . 81

1.6.1 Schwingungen als Informationsquelle für Unwuchten 81

1.6.2 Ableitung der Bewegungsgleichungen für den unwuchtigen Rotor für einen Freiheitsgrad 81

1.6.3 Kräfte-Gleichgewicht bei verschiedenen Schwingungszuständen mit einem Freiheitsgrad 84

1.6.4 Ortskurve der komplexen Amplitude der Schwingbewegung mit einem Freiheitsgrad 86

1.6.5 Frequenzgang des Vergrößerungsfaktors und des Phasenverschiebungswinkels für ein System mit einem Freiheitsgrad 86

1.6.6 Kinetik der Wuchtkörperschwingungen in einer Ebene (Rotor mit zwei Freiheitsgraden) 88

1.6.7 Bewegungs-Differentialgleichungen der räumlichen Bewegung der Schaftachse eines unwuchtigen Rotors in gleichgerichtet-anisotropen Lagern ohne Dämpfung 93

1.6.8 Verallgemeinerte Bewegungsgleichungen des starren Rotors für beliebige Lageranisotropie und beliebige radiale Meßrichtungen für die Lagerschwingungen 95

1.7 Zusammenfassung des Kapitels "Dynamik des unwuchtigen starren Körpers" 96

1.7.1 Statik der Fliehkräfte am Rotor mit raumfester Drehachse 96

1.7.2 Kinematik der Achsenschwingungen und Lagerschwingungen eines unwuchtigen Rotors 99

1.7.3 Kinetik der Unwuchtschwingungen 100

1.8 Auszüge aus ISO-Empfehlungen und DIN-Normen 103

1.8.1 Auszug aus DIN 1311 Blatt 1, Ausg. Febr. 1974, Schwingungslehre, Kinematische Begriffe 103

1.8.2 Auswucht-Terminologie für Kapitel 1 in Anlehnung an die internationale Norm ISO 1925-1974 (E,F) "Balancing-Vocabulary", 1. Ausg. von 1974 - 11 - 01 108

1.9 Schrifttum zum Kapitel 1 124

1.9.1 Allgemeines Schrifttum zur Schwingungstechnik, abschnittweise Fragen der Auswuchttechnik behandelnd 124

1.9.2 Lehrbücher, Monografien und Handbuchbeiträge 125

1.9.3 Dissertationen, Berichte, Richtlinien und Normen 125

1.9.4 Zeitschriftenaufsätze 127

2. Methodik der dynamischen Unwuchtmeßverfahren 130

2.1 Überblick über Meßprobleme und Meßverfahren 130

2.1.1 Meßinformationen für das Auswuchten in zwei Lagern 130

2.1.2 Verarbeitung der Meßinformationen 132

2.1.3 Problem der Siebung 133

2.1.4 Möglichkeiten für die Unwuchtanzeige 135

2.1.5 Kalibrieren der Anzeigeinstrumente 137

2.2 Beschreibung und Analyse der Methoden zur Trennung der Unwuchtanzeigen für die beiden Ausgleichsebenen 138

2.2.1 Problemdarstellung 138

2.2.2 Getrennte Ermittlung von Unwuchtresultierender und Unwuchtpaar 139

2.2.3 Wechselpendelverfahren (Doppelpendelverfahren) nach LAWACZECK-HEIDEBROEK 144

2.2.4 Wechselpendelverfahren mit mechanischem Rahmen (nach HEYMANN) 148

2.2.5 Schwingwegmessung in den Stoßmittelpunkten des eben schwingenden dämpfungsfreien Systems 151

2.2.6 Schwingwegmessung an den Lagern und Ebenentrennung mittels elektrischer Analogie zur Stoßmittelpunktmessung 153

2.2.7 Schwingkraftmessung an den Lagern und Ebenentrennung mittels elektrischer Überlagerungsschaltung 156

2.3 Methoden zur Messung der Unwuchtgröße 157

2.3.1 Auslaufverfahren mit Schwingungsaufzeichnung im Resonanzdurchgang 157

2.3.2 Größen- und Winkellagenmessung mittels Kompensationseinrichtungen am Wuchtkörper 161

2.3.3 Kompensations-Maschinen zur Größen- und Winkellagenmessung mittels mechanischer oder elektro-magnetischer Kompensation der Unwuchtkräfte 162

2.3.4 Direkt anzeigende Auswuchtmaschinen mit Messung im unterkritischen Lauf (kraftmessende Maschinen) 172

2.3.5 Direkt anzeigende Auswuchtmaschinen mit Messung im überkritischen Lauf (wegmessende Maschinen) 174

2.4 Messung der Unwuchtwinkellage — Wege zur Phasenwinkelbestimmung mechanischer Schwingungen 180

2.4.1 Bedeutung der Phasenwinkelbestimmung im Rahmen der Schwingungsmeßtechnik — Einteilung der Phasenwinkelmeßverfahren in Gruppen 180

2.4.2 Stroboskopische Phasenmeßverfahren 183

2.4.3 Laufzeitverfahren zur unmittelbaren Phasenwinkelanzeige . . . 191

2.4.4 Oszillografische Verfahren mit Phasenmarkierung 195

2.4.5 Oszillografische Diagramm-Verfahren 199

2.4.6 Kompensationsverfahren mit Kompensation der Unwuchtkräfte . . 204

2.4.7 Integrierende Überlagerungsverfahren mit additiver Überlagerung 204

2.4.8 Multiplikative Überlagerungsverfahren 206

2.5 Das Wattmeter-Verfahren und seine Bedeutung für die frequenzselektive Messung 211

2.5.1 Eigenschaften des Wattmeter-Verfahrens 211

2.5.2 Meßprinzip 213
2.5.3 Geräte und Verfahren zur wattmetrischen Messung von Unwuchtschwingungen 215
2.5.4 Existenz einer wattmetrischen Winkellagenanzeige für gegen Null gehende Unwuchten 217
2.5.5 Aufbau wattmetrischer Vektormesser 221
2.5.6 Komponenten-Ablesung am Vektormesser 224
2.5.7 Vektorablesung mittels drehbarem Phasengeber 226
2.5.8 Instrumentelles "Abfragen" der Wattmeteranzeige 227

2.6 Auszüge aus ISO-Normen 230
2.6.1 Terminologie der Auswuchtverfahren in Anlehnung an die internationale Norm ISO 1925 - 1974 (E, F) Balancing-Vocabulary, 1. Ausg. vom 1974 - 11 - 01 230
2.6.2 Auszug aus der internationalen Norm ISO 2953 - 1975 (E), Balancing Machines — Description and Evaluation; 1. Ausg. 1975 - 06 - 01. 240

2.7 Schrifttum zum Kapitel 2 246
2.7.1 Lehrbücher, Monografien und Handbuchbeiträge 246
2.7.2 Dissertationen, Berichte, Richtlinien und Normen 247
2.7.3 Zeitschriftenaufsätze 247

3. Erfahrungswerte, Richtlinien und Prüfmethoden für die Auswuchtgenauigkeit . 253

3.1 Deutungen des Begriffes Auswuchtgenauigkeit 253
3.1.1 Technische und wirtschaftliche Bedeutung allgemein anerkannter Richtlinien für die Auswuchtgenauigkeit 253
3.1.2 Beispiel für mögliche Anzeige- und Maschinenfehler 255
3.1.3 Die Auswuchtgenauigkeit als Kennzeichen für einen ausgewuchteten Rotor und als Kennzeichen für eine Auswuchtmaschine . . 256

3.2 Kenngrößen der Genauigkeit einer Auswuchtmaschine 258
3.2.1 Auswuchtfehlergrenze und Meßfehlergrenze 258
3.2.2 Empfindlichkeit der Anzeige 262
3.2.3 Einflüsse auf die Auswuchtgenauigkeit 263
3.2.4 Abhängigkeit der Meßempfindlichkeit von Rotorgewicht, Drehzahl und Meßprinzip. 265
3.2.5 Abhängigkeit der Meßgenauigkeit von der Unwuchtgröße 267
3.2.6 Gegenseitige Beeinflussung der Ausgleichsebenen 268

3.3 Erforderliche Auswuchtgüte und Unwuchttoleranzen 269
3.3.1 Überblick über bisher aufgestellte Richtlinien 269
3.3.2 Grundlagen sinnvoll gruppierter Unwuchttoleranzen 270

3.4 Abhängigkeit der erzielbaren Auswuchtgüte von den Rotoreigenschaften 275
3.4.1 Lage der Ausgleichsebenen 275
3.4.2 Großer Windwiderstand des Rotors 276
3.4.3 Schlechte Kupplungsmöglichkeit für den Antrieb 278
3.4.4 Wuchtkörper ohne eigene Lagerstellen 279
3.4.5 Vagabundierende Unwuchten 279
3.4.6 Paßfeder-Fehler 280
3.4.7 Unberücksichtigte Rotorverformungen in Abhängigkeit von der Drehzahl 280

3.5 Fehlermöglichkeiten bei ungeeigneter Aufnahme des Rotors 281
3.5.1 Durch Lagerzwangskräfte vorgetäuschte Unwucht 281
3.5.2 Scheinunwuchten infolge magnetischer Kräfte 282
3.5.3 Unwuchten durch Wälzlagerhöhenschlag 282
3.5.4 Unwuchten durch Wälzlager-Axialschlag 283
3.5.5 Unwuchten durch betriebsfremde Lagerung 285
3.5.6 Meßunsicherheit bei unrunden Lagerstellen 286

3.6 Vergleichende Auszüge aus Normen und Richtlinien 288
3.6.1 Auszüge aus ISO-1940 "Balance Quality of Rotating Rigid Bodies", 1973 288
3.6.2 Auszüge aus Richtlinie VDI 2060 "Beurteilungsmaßstäbe für den Auswuchtzustand rotierender starrer Körper", 1966 289

3.7 Ergänzendes Schrifttum zum Kapitel 3 314
3.7.1 Normen und Richtlinien 314
3.7.2 Monografien und Forschungsberichte 314
3.7.3 Zeitschriftenaufsätze 314

4. Auswuchten an betriebsmäßig aufgestellten Maschinen an Ort und Stelle . . . 316

4.1 Problematik des betriebsmäßigen Auswuchtens 316
4.1.1 Vorteile und Nachteile des Auswuchtens an Ort und Stelle . . . 316
4.1.2 Überblick über die Anforderungen und die möglichen Meß- und Auswerteverfahren 318

4.1.3 Prinzip des Tarierkoppel-Verfahrens von BLAESS 321

4.1.4 Meßbedingungen für das systematische Auswuchten in zwei Ebenen 321

4.2 Betriebsmäßiges Auswuchten in einer Ebene mit einfachsten Geräten der Schwingungsmeßtechnik 323

4.2.1 Formulierung der Aufgabe für das Auswuchten in einer Ebene 323

4.2.2 Einebenen-Vierpunkt-Verfahren von Schenck (Grafische Auswertung) 325

4.2.3 Grafisches Einebenen-Vierpunkt-Verfahren mit harmonischer Analyse der Meßwertquadrate 328

4.2.4 Einebenen-"Zweipunkt"-Verfahren mit grafischer Auswertung nach DEN HARTOG 330

4.2.5 Einebenen-Dreipunkt-Verfahren mit grafischer Auswertung nach SEIBERT 332

4.2.6 Vierpunkt-Komponenten-Verfahren mit grafischer Auswertung nach BLAESS 335

4.2.7 Einebenen-Vierpunkt-Verfahren mit programmierbarer numerischer Auswertung 338

4.2.8 Einebenen-Mehrpunkt-Verfahren mit programmierbarer harmonischer Analyse 343

4.2.9 Einebenen-Dreipunkt-Verfahren mit programmierbarer numerischer Auswertung 346

4.3 Betriebsmäßiges Auswuchten in einer Ebene mit Schwingungs-Amplituden- und -Phasenmessung oder Schwingungsmessung in Komponenten 348

4.3.1 Komponenten-Verfahren zum georteten Ausgleich mit grafischer Auswertung nach Schenck-HAARDT 349

4.3.2 Komponenten-Verfahren mit numerisch-grafischer Auswertung . . 350

4.3.3 Vektor-Verfahren zum polaren Ausgleich mit grafischer Auswertung nach Schenck-HAARDT 352

4.3.4 Komponenten-Verfahren mit programmierbarer numerischer Auswertung 353

4.3.5 Vektor-Verfahren mit programmierbarer numerischer Auswertung 354

4.4 Gleichungen für das betriebsmäßige Auswuchten in zwei Ebenen mit Messungen an zwei Lagern in drei Meßläufen 355

4.4.1 Analyse der Aufgabe und Grundprinzip der Meßwertverarbeitung 355

4.4.2 Grundgleichungen in komplexer Schreibweise für das betriebsmäßige Auswuchten in zwei Ebenen 360

4.4.3 Gleichungen für das betriebsmäßige Auswuchten in zwei Ebenen mit Hilfe von Komponentenmessung an zwei Lagern 365

4.4.4 Vereinfachte Gleichungen für die numerische Auswertung mit einem Minimum von Programmschritten 370

4.4.5 Überblick über die Verfahren zur Meßwertverarbeitung beim betriebsmäßigen Auswuchten in zwei Ebenen 372

4.4.6 Anzahl der erforderlichen Korrekturschritte beim Auswuchten unter Betriebsbedingungen 373

4.5 Programmierbare Verfahren für die numerische Ermittlung von Unwuchtkorrekturen in zwei Ebenen 375

4.5.1 Einfache Rechenschablonen für Betriebswuchtungen mit Ermittlung der Unwuchtkorrekturen in Komponenten 375

4.5.2 Einfache Rechenschablone für die numerische Berechnung von Nachverbesserungen nach dem ersten Ausgleich 378

4.5.3 Erweiterte Rechenschablonen für Betriebswuchtungen in Komponenten, die Ermittlung der Matrixelemente einschließend . . 381

4.5.4 Auf den Rechenschablonen aufbaubare Programme für Digitalrechner nach PLAZA 385

4.5.5 Numerische Auswerteverfahren nach Mac DUFF und CURRERI . . 389

4.6 Betriebsmäßiges Auswuchten in zwei Ebenen mittels numerisch-grafischer Meßwertverarbeitung 391

4.6.1 Numerisch-grafisches Meßwertkoppel-Verfahren 391

4.6.2 Numerisch-grafisches Vektorverfahren nach Reutlinger-WAHRHEIT 397

4.6.3 Modifiziertes numerisch-grafisches "Vektor"-Verfahren zur Berechnung von Nachverbesserungen aufgrund der Meßergebnisse beim Kontrollauf nach dem 1. Ausgleich 401

4.6.4 Grafisch-numerische Meßwertverarbeitung nach THEARLE . . . 403

4.6.5 Berechnung von Nachverbesserungen mit Hilfe des von THEARLE angegebenen Verfahrens 406

4.6.6 Grafisch-numerische Meßwertverarbeitung nach EL-HADI . . . 407

4.6.7 Möglichkeiten zu einem weiteren Ausbau der grafisch-numerischen Auswerteverfahren bei der Zwei-Ebenen-Auswuchtung mittels Schwingamplituden- und Phasenmessung an zwei Lagern . 409

4.7 Betriebsmäßiges Auswuchten in zwei Ebenen mit Hilfe von Komponentenmessungen an zwei Lagern und anschaulichen grafischen Auswerteverfahren 410

4.7.1 Grafische Iterationsverfahren nach Schenck-HAARDT 411

4.7.2 Auswuchten in zwei Ausgleichsebenen nach der Tarierkoppelmethode BLAESS-HAARDT 415

4.7.3 Grafisches Iterationsverfahren auf der Grundlage der Meßwertsummen und Meßwertdifferenzen 427

4.7.4 Meßwertkoppelverfahren mit rein grafischer Auswertung 429

4.8 Schrifttum zum Kapitel 4 432

4.8.1 Berichte, Richtlinien, Dissertationen 432

4.8.2 Zeitschriftenaufsätze 433

Verwendete Formelzeichen 436

Sachverzeichnis 442

http://www.springer.com/978-3-642-17236-6

Auswuchttechnik
Band 1: Allgemeine Grundlagen, Meßverfahren und Richtlinien
Federn, K.
2011, XVIII, 450 S. 195 Abb., Hardcover
ISBN: 978-3-642-17236-6