

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Entwicklung der Auswuchttechnik	2
1.2	Normen und Richtlinien	8
2	Physikalische Grundlagen	9
2.1	Physikalische Größen	9
2.2	Skalar und Vektor	9
2.2.1	Addition	10
2.2.2	Multiplikation	10
2.3	Maßsystem	12
2.3.1	Grundgrößen	12
2.3.2	Abgeleitete Größen	12
2.4	Physikalische Gesetze	13
2.4.1	Dynamische Grundgleichung	13
2.4.2	Massenanziehung	14
2.5	Kreisbewegung	14
2.5.1	Ebener Winkel	15
2.5.2	Winkelfrequenz	16
2.5.3	Bahngeschwindigkeit	16
2.5.4	Winkelbeschleunigung	17
2.5.5	Bahnbeschleunigung	17
2.5.6	Antriebsdrehmoment	17
2.5.7	Trägheitsmoment	18
2.5.8	Radialbeschleunigung	18
2.5.9	Fliehkraft	19
2.6	Schwingungen	20
2.6.1	Einmassenschwinger mit Fliehkraftanregung	20
2.6.1.1	Unterkritisches Gebiet	23
2.6.1.2	Resonanzgebiet	24
2.6.1.3	Überkritisches Gebiet	24
2.6.2	Freiheitsgrade	25
2.6.3	Dynamische Steifigkeit	25
3	Theorie des starren Rotors	27
3.1	Definitionen und Erläuterungen	28
3.2	Unwucht eines scheibenförmigen Rotors	30

3.3	Unwucht eines allgemeinen Rotors	31
3.4	Statische Unwucht	33
3.5	Momentenunwucht	36
3.6	Quasi-statische Unwucht	37
3.7	Dynamische Unwucht	39
3.8	Darstellung des Unwuchtzustandes	40
3.8.1	Neue Ansätze	44
4	Theorie des nachgiebigen Rotors	47
4.1	Plastischer Rotor	48
4.2	Körperelastischer Rotor	48
4.3	Wellenelastischer Rotor	50
4.3.1	Idealisierter wellenelastischer Rotor	51
4.3.2	Einfluss der Lagersteifigkeit	52
4.3.3	Standfrequenz und kritische Drehzahl	54
4.3.4	Allgemeiner Rotor mit wellenelastischem Verhalten	55
4.3.5	Unwuchtwirkungen am Rotor mit wellenelastischem Verhalten	55
4.3.5.1	Modale Unwuchten	56
4.3.5.2	Äquivalente modale Unwuchten	56
4.3.6	Ausgleich eines Rotors mit wellenelastischem Verhalten	57
4.3.6.1	Erste Biegeeigenform	58
4.3.6.2	Zweite Biegeeigenform	59
4.3.6.3	Dritte Biegeeigenform	60
5	Toleranzen des Rotors mit starrem Verhalten	61
5.1	Allgemeines	61
5.1.1	Toleranzebenen	62
5.1.2	Ausgleichsebenen	63
5.2	Ähnlichkeitsbetrachtungen	64
5.3	Festlegen der zulässigen Restunwucht	66
5.4	Verteilung auf die Toleranzebenen	70
5.5	Zuordnung der Unwuchttoleranz zu den Ausgleichsebenen	73
5.6	Zusammengebaute Rotoren	74
5.7	Nachprüfen der Restunwucht	74
5.7.1	Akzeptanzkriterien	75
5.7.2	Nachprüfung durch den Hersteller	76
5.7.3	Nachprüfung durch den Abnehmer	76
6	Toleranzen des nachgiebigen Rotors	77
6.1	Unwuchttoleranzen nach DIN ISO 11342	77
6.2	Vorschlag des Verfassers	78
6.2.1	Darstellung der Unwucht eines Rotors	78
6.2.2	Toleranzgrenzen	79
6.2.3	Verteilung auf mehrere Unwuchten	80
6.2.4	Unterschiedliche Unwuchtsituationen	81
6.2.4.1	Ausgewuchteter Rotor	81

6.2.4.2	Ein-Ebenen-Auswuchten	81
6.2.4.3	Zwei-Ebenen-Auswuchten	82
6.2.4.4	Mehr-Ebenen-Auswuchten	83
6.2.5	Diskussion	84
6.2.6	Betriebsdrehzahl	85
6.3	Beurteilung des Unwuchtzustandes	85
6.3.1	Niedrigtourige Auswuchtmaschine	86
6.3.2	Hochtourige Auswuchtmaschine oder -anlage	86
6.3.2.1	Zulässige Schwingungen	86
6.3.2.2	Zulässige Unwuchten	87
6.3.3	Im Prüffeld	87
6.3.4	Im Betriebszustand	87
6.4	Anfälligkeit und Empfindlichkeit von Maschinen gegen Unwuchten	88
6.4.1	Klassierung der Anfälligkeit von Maschinen	88
6.4.2	Bereiche der modalen Empfindlichkeit	89
6.4.3	Grenzkurven	90
6.4.4	Experimentelle Ermittlung der modalen Empfindlichkeit	93
7	Verfahren zum Auswuchten starrer Rotoren	95
7.1	Körper ohne eigene Lagerzapfen	95
7.1.1	Unwuchten durch Montage	95
7.1.2	Auswuchten auf Umschlag	99
7.1.3	Weitere Verwendung der Umschlag-Methode	102
7.1.4	Hilfswellen, Adapter	102
7.2	Baugruppen	102
7.2.1	Austauschbarkeit von Teilen	103
7.2.2	Ausgleich des Montagefehlers	104
7.2.3	Ersatzmassen (Dummies)	104
7.3	Rotoren mit Passfedern	104
7.3.1	Welle mit ganzer Passfeder	105
7.3.2	Welle mit halber Passfeder	105
7.3.3	Einfluss auf den Unwuchtzustand	106
7.3.4	Vorhalt	106
7.3.5	Konstruktive Maßnahmen	106
8	Verfahren zum Auswuchten nachgiebiger Rotoren	107
8.1	Rotorkonfiguration	107
8.1.1	Grundelemente wellenelastischer Rotoren	107
8.1.2	Auswuchtprinzipien	108
8.1.3	Rotor mit Scheiben	109
8.1.3.1	Eine Scheibe	109
8.1.3.2	Zwei Scheiben	110
8.1.3.3	Mehr als zwei Scheiben	110
8.1.4	Starre Abschnitte	111
8.1.5	Walzen	112
8.1.6	Integraler Rotor	112

8.1.7	Kombinationen	112
8.1.8	Reparaturfall	112
8.2	Auswuchtverfahren	113
8.2.1	Verfahren A: Ein-Ebenen-Auswuchten	113
8.2.2	Verfahren B: Zwei-Ebenen-Auswuchten	113
8.2.3	Verfahren C: Auswuchten einzelner Bauteile vor dem Zusammenbau	114
8.2.4	Verfahren D: Auswuchten nach Begrenzung der Unwucht	114
8.2.5	Verfahren E: Schrittweises Auswuchten während des Zusammenbaus	114
8.2.5.1	Problem Transferunwuchten	114
8.2.5.2	Lösung	115
8.2.5.3	Problem Montage	116
8.2.6	Verfahren F: Auswuchten in optimalen Ebenen	117
8.2.7	Verfahren G: Auswuchten bei mehreren Drehzahlen	117
8.2.7.1	2+N-Methode und N+2-Methode	117
8.2.7.2	Ausgleichsverhältnis	118
8.2.7.3	Empfehlung	119
8.2.7.4	Rechnerunterstützung	120
8.2.7.5	Entwurf VDI-Richtlinie 3835	121
8.2.8	Verfahren H: Auswuchten bei Betriebsdrehzahl	121
8.2.9	Verfahren I: Auswuchten bei einer festen Drehzahl	122
8.2.10	Verfahren für ein plastisches Verhalten	122
9	Beschreibung der Auswuchtaufgabe	123
9.1	Rotor mit Zapfen	123
9.1.1	Tabellarische Beschreibung des Rotortyps	124
9.1.2	Weitere Tabellen	124
9.1.3	Maximaldaten	124
9.1.4	Zusätzliche Angaben zu den Rotoren	124
9.2	Rotor ohne Zapfen	126
9.3	Hochtouriges Auswuchten	128
10	Auswuchtmaschinen	129
10.1	Angebot und technische Dokumentation	129
10.1.1	Horizontale Auswuchtmaschinen	129
10.1.1.1	Grenzen für die Rotormasse und die Unwucht	129
10.1.1.2	Wirtschaftlichkeit des Messlaufs	130
10.1.1.3	Unwuchtreduziervverhältnis	130
10.1.1.4	Rotorabmessungen	130
10.1.1.5	Lagerzapfen	132
10.1.1.6	Einstellbereich der Ausgleichsebenen	132
10.1.1.7	Antrieb	132
10.1.1.8	Bremse	132
10.1.1.9	Zusätzliche Angaben	133
10.1.2	Vertikale Auswuchtmaschinen	133
10.1.2.1	Grenzen für die Rotormasse und die Unwucht	134

10.1.2.2	Rotorabmessungen	134
10.1.2.3	Einfluss der Momentenunwucht	135
10.1.3	Schwerpunktwaagen	136
10.1.4	Hochtourige Auswuchtmaschinen	136
10.1.4.1	Antrieb	137
10.1.4.2	Lagerständer	137
10.1.4.3	Messeinrichtung	138
10.2	Technische Details und ihre Beurteilung	138
10.2.1	Antrieb	138
10.2.1.1	Kurzschlussläufermotor	139
10.2.1.2	Schleifringläufermotor	139
10.2.1.3	Gleichstrommotor	139
10.2.1.4	Antriebsleistung	140
10.2.1.5	Gelenkwellenantrieb	140
10.2.1.6	Bandantrieb	141
10.2.1.7	Drehfeldantrieb	143
10.2.1.8	Eigenantrieb	144
10.2.1.9	Druckluftantrieb	144
10.2.2	Anzeigesysteme	145
10.2.3	Aufnehmer	147
10.2.4	Bremse	147
10.2.5	Drehzahl	147
10.2.6	Kalibrierung und Einstellen der Messeinrichtung	148
10.2.6.1	Wegmessende Auswuchtmaschine	148
10.2.6.2	Kraftmessende Auswuchtmaschine	149
10.2.7	Fundamentierung	150
10.2.8	Kleinste erreichbare Restunwucht U_{ker}	151
10.2.9	Lagerung	151
10.2.9.1	Tragrollenlager	151
10.2.9.2	Prismenlager	152
10.2.9.3	Gleitlager	152
10.2.9.4	Spindellager	153
10.2.9.5	Betriebslager	153
10.2.9.6	Sonderlagerung	154
10.2.10	Massenträgheitsmoment, Zyklenzahl	155
10.2.11	Messverfahren	155
10.2.12	Testrotoren, Testmassen	156
10.2.12.1	Testrotoren	156
10.2.12.2	Testmassen	157
10.2.13	Überlastung	157
10.2.14	Umgebungseinflüsse	158
10.2.15	Unwuchtreduziervhältnis URV	158
10.2.16	Wirtschaftlichkeit	158
10.3	Randbedingungen	159
11	Tests an Auswuchtmaschinen	161
11.1	Statistik mit Unwuchten	162

11.1.1	Kreisförmiges Streufeld.....	163
11.1.2	Ringförmiges Streufeld.....	164
11.1.3	Kenndaten ein- und zweidimensionaler Normalverteilungen.....	165
11.1.4	Weitere Besonderheiten.....	166
11.1.5	Stichproben und hundertprozentige Kontrolle.....	166
11.1.6	Kennzahlen.....	167
11.1.7	Ausschuss.....	167
11.2	Testrotoren.....	167
11.2.1	Testrotoren Typ A	169
11.2.2	Testrotoren Typ B	170
11.2.3	Testrotoren Typ C	172
11.2.4	Testbedingungen.....	173
11.3	Test der kleinsten erreichbaren Restunwucht U_{ker}	176
11.3.1	Startbedingung.....	176
11.3.2	Ausgleich.....	176
11.3.3	Testläufe mit Testmassen	177
11.3.4	Auswertung des U_{ker} -Tests	177
11.3.5	Verkürzter U_{ker} -Test.....	179
11.4	Test des Unwuchtreduziervhältnisses URV	179
11.4.1	Startbedingung.....	179
11.4.2	Testläufe mit Testmassen	180
11.4.3	Auswertung des URV -Tests.....	181
11.4.4	Verkürzter URV -Test.....	182
11.5	Test des Momentenunwucht-Einflussverhältnisses ME	182
11.5.1	Auswertung des ME -Tests.....	182
11.6	Test der Umschlag-Kompensation	183
11.6.1	Startbedingungen.....	183
11.6.2	Testläufe mit Testmassen	183
11.6.3	Auswertung des Kompensations-Tests.....	184
12	Ausgleich	185
12.1	Ausgleichsarten	185
12.1.1	Abtragen von Material	186
12.1.2	Verlagern von Material	188
12.1.3	Zugeben von Material	188
12.2	Ausgleichszeit	189
12.3	Fehler beim Ausgleich	190
12.3.1	Ausgleichsmasse	191
12.3.2	Ausgleichsebenen	191
12.3.3	Ausgleichsradien	191
12.3.3.1	Radialer Ausgleich	192
12.3.3.2	Ausgleich am Umfang	192
12.3.3.3	Ausgleich durch Spreizen von zwei Ausgleichsmassen	192
12.3.4	Winkel	192
12.3.5	Zulässige Abweichungen beim Ausgleich	193
12.4	Unwuchtreduziervhältnis	194

13	Vorbereitung und Durchführung des Auswuchtens	195
13.1	Ursachen für Unwuchten	195
13.2	Wirkungen von Unwuchten	196
13.3	Konstruktionsrichtlinien und Zeichnungsangaben	196
13.4	Auslegen des Ausgleichs	197
13.5	Arbeitsvorbereitung	198
13.6	Beladen und Entladen	204
13.7	Vorbereitungen am Rotor	205
13.8	Fertigungsgang Auswuchten	206
14	Abweichungen beim Auswuchten	207
14.1	Begrenzung der Auswuchtgüte durch den Rotor	207
14.2	Abweichungen	207
14.2.1	Art der Abweichung	207
14.2.1.1	Systematische Abweichungen	208
14.2.1.2	Zufällige Abweichungen	208
14.2.1.3	Skalare Abweichungen	209
14.2.2	Übersicht, Erläuterungen	209
14.2.2.1	Bewegliche Teile	209
14.2.2.2	Flüssigkeiten oder Festkörper in Hohlräumen	212
14.2.2.3	Thermische Einflüsse und Effekte der Schwerkraft	213
14.2.2.4	Luftströmungen	213
14.2.2.5	Magnetismus	214
14.2.2.6	Schrägstellung von Kugellagern	214
14.2.2.7	Unvollständige Montage	215
14.2.2.8	Kupplungsstelle am Rotor	215
14.2.2.9	Passungsspiel	215
14.2.2.10	Verdrehen aufgesetzter Teile	215
14.2.2.11	Unwucht der Aufnahme	216
14.2.2.12	Unwucht im Antriebsselement	216
14.2.2.13	Laufabweichungen der Aufnahme	216
14.2.2.14	Exzentrizität der Auswuchtlager	216
14.2.2.15	Systematische und zufällige Abweichungen der Messkette	217
14.3	Abschätzung der Gesamtabweichung	217
14.4	Abnahmekriterien	217
15	Schutz beim Auswuchten	219
15.1	Gefahren durch den Rotor	219
15.2	Schutzklassen	220
15.2.1	Beispiele der Schutzklassen	221
15.2.2	Schutzklasse C	223
15.2.2.1	Flächenspezifische Energie	223
15.2.2.2	Absolute Energie	224
15.2.3	Auslegung des Schutzes	226
15.2.4	Kennzeichnung des Schutzes	226
15.3	Zuständigkeiten	226

16	Auswuchten im Betriebszustand	227
16.1	Schwingungsgrenzwerte	227
16.2	Aufgabenstellung	228
16.3	Theorie des Auswuchtens im Betriebszustand	229
16.3.1	Ursachen für Unwuchten	229
16.3.2	Problematik	230
16.3.3	Methodik	230
16.3.3.1	Ausgleich in einer Ebene	230
16.3.3.2	Ausgleich in zwei Ebenen	232
16.3.3.3	Ausgleich in mehr als zwei Ebenen	233
16.4	Praxis des Auswuchtens im Betriebszustand	234
16.4.1	Messtechnische Hilfsmittel	234
16.4.2	Messebenen	235
16.4.3	Randbedingungen	235
16.5	DIN ISO 20806	236
17	Anhang	237
17.1	Formelzeichen	237
17.2	Bezeichnungen und Definitionen	240
17.2.1	Mechanik	240
17.2.2	Rotorsysteme	241
17.2.3	Unwucht	244
17.2.4	Auswuchten	247
17.2.5	Auswuchtmaschinen und Ausrüstung	250
17.2.6	Nachgiebige Rotoren	257
17.2.7	Rotierende freie starre Körper	260
17.2.8	Zubehör zu Auswuchtmaschinen	261
17.3	Unterlagen zur Berechnung	262
17.3.1	Dezimale Vielfache und Teile	262
17.3.2	Umrechnungsfaktoren für SI-Einheiten und inch/pound-Einheiten .	263
17.3.3	Nomogramme, Diagramme	264
17.4	Normen	286
17.4.1	DIN ISO 1940-1: Mechanische Schwingungen – Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem (starren) Zustand. Teil 1 (2004): Festlegung und Nachprüfung der Unwuchttoleranz, anschließend Berichtigung 1	287
17.4.2	DIN ISO 11342: Mechanische Schwingungen – Verfahren und Kriterien für das mechanische Auswuchten nachgiebiger Rotoren, anschließend Berichtigung 1	321
Literatur		349
Bildquellen		352
Sachverzeichnis		353