
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Entwicklung der Auswuchttechnik und der -maschinen	3
1.2	Normen und Richtlinien	8
2	Physikalische Grundlagen	13
2.1	Physikalische Größen	14
2.2	Skalar und Vektor	14
2.2.1	Addition	14
2.2.2	Multiplikation	15
2.3	Maßsystem	17
2.3.1	Grundgrößen	17
2.3.2	Abgeleitete Größen	17
2.4	Physikalische Gesetze	18
2.4.1	Dynamische Grundgleichung	18
2.4.2	Massenanziehung	19
2.5	Kreisbewegung	19
2.5.1	Ebener Winkel	19
2.5.2	Winkelfrequenz	20
2.5.3	Bahngeschwindigkeit	21
2.5.4	Winkelbeschleunigung	22
2.5.5	Bahnbeschleunigung	22
2.5.6	Antriebsdrehmoment	22
2.5.7	Trägheitsmoment	23
2.5.8	Radialbeschleunigung	23
2.5.9	Fliehkraft	24
2.6	Schwingungen	25
2.6.1	Einmassenschwinger mit Fliehkraftanregung	25
2.6.2	Freiheitsgrade	29
2.6.3	Dynamische Steifigkeit	30

3 Begriffe und Erläuterungen	33
3.1 Auswuchten	34
3.2 Auswuchtaufgabe	34
3.3 Rotor	34
3.4 Unwucht	34
3.5 Unwuchtzustand	35
3.6 Unwuchtverhalten	35
3.7 Unwuchttoleranz	35
3.8 Ausgleich	35
3.9 Ausgleichsebene	36
3.10 Schaftachse	36
3.11 Rotorverhalten	36
3.11.1 Rotoren mit starrem Verhalten	36
3.11.2 Rotoren mit nachgiebigem Verhalten	37
3.12 Rotorkonzept	38
4 Theorie des Auswuchtens	39
4.1 Allgemeines	39
4.1.1 Unwuchtzustand	40
4.1.2 Rotorkonzept	41
4.1.3 Rotorverhalten	42
4.1.4 Unwuchttoleranzen	44
4.1.5 Auswuchtaufgabe	45
4.2 Unwucht und Ausgleich	48
4.3 Unwucht des scheibenförmigen Rotors	50
4.4 Unwucht des allgemeinen Rotors	52
4.4.1 Resultierende Unwucht	54
4.4.2 Momentenunwucht	54
4.4.3 Unwuchtpaar	56
4.4.4 Modale Unwucht	57
4.4.5 Äquivalente modale Unwucht	59
4.5 Überblick über die Auswuchtaufgaben	61
4.5.1 Ausgewuchteter Rotor	61
4.5.2 Ein-Ebenen-Auswuchten	62
4.5.3 Zwei-Ebenen-Auswuchten	62
4.5.4 Mehr-Ebenen-Auswuchten	63
4.6 Fazit der neuen Sichtweise	67
4.7 Handhabung der Unwuchttoleranzen	68
5 Theorie des Rotors mit starrem Verhalten	73
5.1 Rotorverhalten	73
5.2 Unwuchtzustand	75

5.2.1	Statische Unwucht	75
5.2.2	Resultierende Unwucht	79
5.2.3	Momentenunwucht	81
5.2.4	Dynamische Unwucht	83
5.3	Darstellung des Unwuchtzustandes	85
5.3.1	Unwuchten	85
5.3.2	Lage der Trägheitsachse	87
6	Theorie des Rotors mit nachgiebigem Verhalten	91
6.1	Plastisches Rotorverhalten	92
6.2	Körperelastisches Rotorverhalten	93
6.3	Wellenelastisches Rotorverhalten	94
6.3.1	Idealisierter Rotor mit wellenelastischem Verhalten	96
6.3.2	Einfluss der Lagersteifigkeit	96
6.3.3	Standfrequenz und kritische Drehzahl	99
6.3.4	Allgemeiner Rotor mit wellenelastischem Verhalten	99
6.3.5	Unwuchtwirkungen am Rotor mit wellenelastischem Verhalten	99
6.3.6	Ausgleich eines Rotors mit wellenelastischem Verhalten	101
7	Toleranzen des Rotors mit starrem Verhalten	107
7.1	Allgemeines	108
7.1.1	Toleranzebenen	108
7.1.2	Ausgleichsebenen	110
7.1.3	Begrenzung der zulässigen Restunwucht	111
7.2	Ähnlichkeitsbetrachtungen	111
7.2.1	Rotormasse und zulässige Restunwucht	111
7.2.2	Betriebsdrehzahl und zulässige Restunwucht	112
7.3	Festlegen der zulässigen Restunwucht	113
7.3.1	Allgemeines	113
7.3.2	Auswucht-Gütestufen G	114
7.3.3	Experimentelle Festlegung	118
7.3.4	Grenzwerte aus besonderen Zielen	119
7.3.5	Nachgewiesene Erfahrung	120
7.4	Verteilung auf die Toleranzebenen	121
7.4.1	Rotoren, die nur eine Toleranzebene benötigen	121
7.4.2	Rotoren, die zwei Toleranzebenen benötigen	122
7.5	Zuordnung der Unwuchttoleranz zu den Ausgleichsebenen	124
7.6	Zusammengebaute Rotoren	126
7.7	Toleranzen für den Auswuchtprozess	126
7.8	Überprüfen der Restunwucht	128
7.8.1	Akzeptanzkriterien	128
7.8.2	Überprüfung durch den Hersteller	129

7.8.3	Überprüfung durch den Abnehmer	129
7.8.4	Nachprüfung auf einer Auswuchtmachine	130
7.8.5	Nachprüfung ohne eine Auswuchtmachine	130
8	Toleranzen des Rotors mit nachgiebigem Verhalten	131
8.1	Allgemeines	132
8.1.1	Auswuchtziel	132
8.1.2	Auswucherverfahren	132
8.2	Toleranzkriterien	133
8.2.1	Schwingungen	134
8.2.2	Unwuchten	137
8.3	Unwuchttoleranzen für Verfahren A bis I	139
8.3.1	Toleranzen niedrigtouriger Auswuchtverfahren	139
8.3.2	Toleranzen hochtouriger Auswuchtverfahren	142
8.4	Unwuchttoleranzen für Verfahren G	143
8.4.1	Unwuchttoleranzen nach DIN ISO 11342	143
8.4.2	Unwuchttoleranzen nach E-VDI 3835	143
8.5	Toleranzen für den Auswuchtprozess	147
8.6	Beurteilung des erreichten Unwuchtzustandes	149
8.6.1	Beurteilung durch Schwingungen	149
8.6.2	Beurteilung durch Unwuchten	151
8.7	Anfälligkeit und Empfindlichkeit von Maschinen gegen Unwuchten	152
8.7.1	Klassierung der Anfälligkeit von Maschinen	153
8.7.2	Bereiche der modalen Empfindlichkeit	154
8.7.3	Grenzkurven	155
8.7.4	Experimentelle Ermittlung der modalen Empfindlichkeit	158
9	Verfahren zum Auswuchten von Rotoren mit starrem Verhalten	161
9.1	Körper ohne eigene Lagerzapfen	162
9.1.1	Unwuchten durch Montage	162
9.1.2	Auswuchten auf Umschlag	165
9.1.3	Weitere Verwendung der Umschlag-Methode	169
9.1.4	Hilfswellen, Adapter	169
9.2	Baugruppen	170
9.2.1	Austauschbarkeit von Teilen	171
9.2.2	Ausgleich des Montagefehlers	171
9.2.3	Ersatzmassen (Dummies)	172
9.3	Rotoren mit Passfedern	172
9.3.1	Welle mit ganzer Passfeder	173
9.3.2	Welle mit halber Passfeder	173
9.3.3	Einfluss auf den Unwuchtzustand	174
9.3.4	Vorhalt	174
9.3.5	Konstruktive Maßnahmen	174

10 Verfahren zum Auswuchten von Rotoren mit nachgiebigem Verhalten	175
10.1 Allgemeines	176
10.2 Rotorkonfigurationen	176
10.2.1 Grundelemente wellenelastischer Rotoren	176
10.2.2 Auswuchtprinzipien	177
10.2.3 Rotor mit Scheiben	178
10.2.4 Starre Abschnitte	181
10.2.5 Walzen	182
10.2.6 Integraler Rotor	182
10.2.7 Kombinationen	183
10.2.8 Reparaturfall	183
10.3 Auswuchtverfahren	183
10.3.1 Verfahren A: Ein-Ebenen-Auswuchten	184
10.3.2 Verfahren B: Zwei-Ebenen-Auswuchten	184
10.3.3 Verfahren C: Auswuchten einzelner Bauteile vor dem Zusammenbau	185
10.3.4 Verfahren D: Auswuchten nach Begrenzung der Anfangsunwucht	185
10.3.5 Verfahren E: Schrittweises Auswuchten während des Zusammenbaus	185
10.3.6 Verfahren F: Auswuchten in optimalen Ebenen	188
10.3.7 Verfahren G: Auswuchten bei mehreren Drehzahlen	189
10.3.8 Verfahren H: Auswuchten bei der Betriebsdrehzahl	193
10.3.9 Verfahren I: Auswuchten bei einer festen Drehzahl	195
10.3.10 Verfahren für ein plastisches Verhalten	195
11 Beschreibung der Auswuchtaufgabe	197
11.1 Allgemeines	197
11.2 Niedrigtouriges Auswuchten	198
11.2.1 Rotor mit Zapfen	198
11.2.2 Rotoren ohne Zapfen	201
11.3 Niedrigtouriges Auswuchten von Rotoren mit wellenelastischem Verhalten	203
11.4 Hochtouriges Auswuchten	203
12 Auswuchtmaschinen	207
12.1 Angebot und technische Dokumentation	208
12.1.1 Horizontale Auswuchtmaschinen	208
12.1.2 Vertikale Auswuchtmaschinen	212
12.1.3 Schwerpunktwaagen	214
12.1.4 Hochtourige Auswuchtmaschinen	215

12.2	Technische Details und ihre Beurteilung	216
12.2.1	Antrieb	216
12.2.2	Anzeigesysteme	223
12.2.3	Aufnehmer	225
12.2.4	Bremse	225
12.2.5	Drehzahl	225
12.2.6	Kalibrieren und Einstellen der Messeinrichtung	226
12.2.7	Fundamentierung	229
12.2.8	Kleinste erreichbare Restunwucht U_{ker}	229
12.2.9	Lagerung	229
12.2.10	Massenträgheitsmoment, Zyklenzahl	233
12.2.11	Messverfahren	233
12.2.12	Testrotoren, Testmassen	234
12.2.13	Überlastung	236
12.2.14	Umgebungseinflüsse	236
12.2.15	Unwuchtreduzierverhältnis URV	236
12.2.16	Wirtschaftlichkeit	237
12.3	Randbedingungen	238
13	Tests an Auswuchtmaschinen	239
13.1	Statistik mit Unwuchten	241
13.1.1	Kreisförmiges Streufeld	242
13.1.2	Ringförmiges Streufeld	243
13.1.3	Kenndaten ein- und zweidimensionaler Normalverteilungen	244
13.1.4	Weitere Besonderheiten	245
13.1.5	Stichproben oder hundertprozentige Kontrolle	246
13.1.6	Kennzahlen	246
13.1.7	Ausschuss	246
13.2	Testrotoren	247
13.2.1	Testrotoren Typ A	247
13.2.2	Testrotoren Typ B	248
13.2.3	Testrotoren Typ C	251
13.2.4	Testbedingungen	253
13.3	Test der kleinsten erreichbaren Restunwucht U_{ker}	253
13.3.1	Startbedingung	253
13.3.2	Ausgleich	256
13.3.3	Testläufe mit Testmassen	256
13.3.4	Auswertung des U_{ker} -Tests	257
13.3.5	Verkürzter U_{ker} -Test	259
13.4	Test des Unwuchtreduzierverhältnisses URV	259
13.4.1	Startbedingung	259
13.4.2	Testläufe mit Testmassen	259

13.4.3	Auswertung des <i>URV</i> -Tests	261
13.4.4	Verkürzter <i>URV</i> -Test	262
13.5	Test des Momentenunwucht-Einflussverhältnisses <i>ME</i>	262
13.5.1	Auswertung des <i>ME</i> -Tests	262
13.6	Test der Umschlag-Kompensation	263
13.6.1	Startbedingung	263
13.6.2	Testläufe mit Testmassen	263
13.6.3	Auswertung des Kompensations-Tests	264
14	Ausgleich	265
14.1	Ausgleichsarten	266
14.1.1	Abtragen von Material	266
14.1.2	Verlagern von Material	268
14.1.3	Zugeben von Material	268
14.2	Ausgleichszeit	270
14.3	Abweichungen beim Ausgleich	271
14.3.1	Ausgleichsmassen	271
14.3.2	Ausgleichsebenen	271
14.3.3	Ausgleichsradien	272
14.3.4	Ausgleichswinkel	273
14.3.5	Zulässige Abweichungen beim Ausgleich	273
14.4	Unwuchtreduzierverhältnis	275
15	Vorbereitung und Durchführung des Auswuchtens	277
15.1	Allgemeines	277
15.2	Ursachen für Unwuchten	278
15.3	Konstruktionsrichtlinien und Zeichnungsangaben	279
15.4	Auslegen des Ausgleichs	279
15.5	Arbeitsvorbereitung	281
15.5.1	Unwuchttoleranzen für das Auswuchtziel	281
15.5.2	Unwuchttoleranzen für den Auswuchtprozesses	282
15.6	Automatisierung	283
15.7	Beladen und Entladen	289
15.8	Vorbereitungen am Rotor	291
15.9	Fertigungsgang Auswuchten	291
16	Abweichungen beim Auswuchten	293
16.1	Begrenzung der Auswuchtgüte durch den Rotor	293
16.2	Abweichungen	294
16.2.1	Art der Abweichung	294
16.2.2	Übersicht, Erläuterungen	295
16.3	Abschätzung der Gesamtabweichung	303

16.4	Abnahmekriterien	304
16.4.1	Prüfung beim Hersteller	304
16.4.2	Abnahme beim Hersteller	304
16.4.3	Abnahme auf einer anderen Auswuchtmaschine	304
16.4.4	Verallgemeinerung	304
17	Schutz beim Auswuchten	305
17.1	Allgemeines	305
17.2	Gefahren durch den Rotor	307
17.3	Schutzklassen	307
17.3.1	Absperrung	308
17.3.2	Widerstand gegen wegfliegende Teile	308
17.4	Beispiele der Schutzklassen	311
17.5	Schutzkasse C für Universal-Auswuchtmaschinen	313
17.6	Auslegung des Schutzes	314
17.7	Kennzeichnung des Schutzes	314
17.8	Zuständigkeiten	314
18	Auswuchten im Betriebszustand	317
18.1	Schwingungsgrenzwerte	317
18.2	Aufgabenstellung	319
18.3	Theorie des Auswuchtens im Betriebszustand	320
18.3.1	Ursachen für Unwuchten	320
18.3.2	Problematik	320
18.3.3	Methodik	321
18.4	Praxis des Auswuchtens im Betriebszustand	325
18.4.1	Messtechnische Hilfsmittel	325
18.4.2	Messebenen	326
18.4.3	Randbedingungen	327
18.5	DIN ISO 21940-13	328
19	Anhang	329
19.1	Formelzeichen	330
19.2	Bezeichnungen und Definitionen	333
19.2.1	Mechanik/Mechanics/Mécanique	333
19.2.2	Rotorsysteme/Rotor systems/Systèmes de rotors	335
19.2.3	Unwucht/Unbalance/Déséquilibre, balourd	338
19.2.4	Auswuchten/Balancing/Équilibrage	341
19.2.5	Auswuchtmaschinen und Ausrüstung/Balancing machines and equipment/Machines à équilibrer et équipements	344
19.2.6	Nachgiebige Rotoren/Flexible rotors/Rotors flexibles	351

19.2.7	Rotierende freie Körper/Rotating rigid free-bodies/Corps-libres rigides en rotation	354
19.2.8	Zubehör zu Auswuchtmaschinen/Balancing machine tooling/Outilage de machine à équilibrer	355
19.3	Unterlagen zur Berechnung	357
19.3.1	Dezimale Vielfache und Teile	357
19.3.2	Umrechnungsfaktoren für SI-Einheiten und inch/pound-Einheiten	358
19.3.3	Nomogramme, Diagramme	359
Literatur	383
Bildquellen	387
Sachverzeichnis	389