

Thermische Turbomaschinen

Von

Dr. Walter Traupel

o. Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule
Zürich

Zweiter Band
Regelverhalten, Festigkeit
und dynamische Probleme

Zweite neubearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 587 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin/ Heidelberg / New York
1968

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	VIII
12. Regelung der Dampfturbinen	1
12.1 Allgemeines	1
12.2 Regeleinriffe	1
12.3 Thermodynamische Berechnung der Regelung	7
12.4 Empirische Unterlagen über das Teillastverhalten	16
12.5 Bemessung der Regelventile	19
12.6 Funktionelle Probleme der Dampfturbinenregelung	25
12.7 Probleme der Lastabschaltung	30
12.8 Zur Dynamik der Dampfturbinenregelung	36
12.9 Berechnung der Überdrehzahlen	44
Literatur	53
13. Regelung der Turboverdichter	54
13.1 Regeleinriffe	54
13.2 Saugdrosselregelung	56
13.3 Abblaseregelung	61
13.4 Umblaseregelung	65
13.5 Axialverdichterregelung durch Schaufel Verstellung	69
13.6 Radialverdichterregelung durch einstellbaren Vordrall	76
13.7 Verdichter mit Zwischenkühlung	78
13.8 Funktionelle Probleme der Verdichterregelung	80
Literatur	86
14. Regelung der Gasturbinen	86
14.1 Regeleinriffe	86
14.2 Berechnung der Beharrungszustände	90
a) Einwellige Anlage	90
b) Zweiwellige Anlage, Turbinen in Serie geschaltet	95
c) Zweiwellige Anlage, Turbinen parallelgeschaltet	100
14.3 Regelung mit verstellbarem Leitapparat	102
14.4 Klimaempfindlichkeit und Teillastwirkungsgrad	107
a) Allgemeines	107
b) Einwellige Anlage	110
c) Anlage mit seriegeschalteten Turbinen	111
d) Anlage mit parallelgeschalteten Turbinen	113
e) Anlage mit seriegeschalteten Turbinen und verstellbarem Leitrad	113
f) Gegenüberstellung der verschiedenen Schaltungen	114
14.5 Beispiele gerechneter und gemessener Gasturbinencharakteristiken	116
14.6 Zur Dynamik der Gasturbinenregelung	125
14.7 Energieinhalt und regeltechnische Trägheit	135
14.8 Das Problem der Lastabschaltung	143
14.9 Beispiele von Gasturbinenregelsystemen	148
14.10 Übersicht über das regeltechnische Verhalten der verschiedenen Schaltungen	154
Literatur	157
15. Festigkeit der Schaufelungen	158
15.1 Schaufelbeanspruchung durch Fliehkraft	158
15.2 Beanspruchung der freistehenden Schaufel durch Strömungskräfte	165
15.3 Rückwirkung der Fliehkraft auf die Beanspruchung der freistehenden Schaufel durch Strömungskräfte	172

15.4	Beanspruchung des Schaufelpaketes durch Strömungskräfte	177
15.5	Torsionsbeanspruchung von Schaufeln	182
15.6	Wärmespannungen in Schaufeln	185
15.7	Viskoser Spannungszustand in Schaufeln	188
15.8	Die Gestaltung der Schaufelbefestigung	191
15.9	Die Beanspruchung der Schaufelbefestigung	198
15.10	Die Beanspruchung der Schaufeln der Radialturbinen	214
15.11	Die Beurteilung der Festigkeit von Schaufeln und ihren Befestigungen	219
	a) Allgemeines	219
	b) Tiefe Temperatur	220
	c) Hohe Temperatur	227
	Literatur	234
16.	Festigkeit der Rotoren	225
16.1	Freitragender Ring	235
16.2	Radkranz mit Schaufeln, an Scheibe	236
16.3	Differentialgleichungen der rotierenden Scheibe bei elastischer Verformung	240
16.4	Scheibe gleicher Festigkeit	242
16.5	Scheibe für beliebig vorgegebenen Spannungsverlauf	243
16.6	Die Scheibe konstanter Dicke	245
16.7	Scheibe hyperbolischen Profils	248
16.8	Die kegelige Scheibe	248
16.9	Die Scheibe beliebigen Profils	255
16.10	Die zylindrische Trommel	258
16.11	Spannungskonzentration an Ausgleichlöchern	261
16.12	Rotoren mit ausladendem Kranz und zusammengesetzte Rotoren	262
16.13	Bestimmung des Schrumpfmaßes	267
16.14	Biegespannungen in Scheiben	270
16.15	Spannungen in Radialrädern	273
16.16	Spannungsverteilung im Rotor bei kriechendem Werkstoff (viskoser Spannungszustand)	280
16.17	Spannungsverteilung in Scheiben bei teilweise elastischem, teilweise viskosem Verhalten	287
16.18	Die Beurteilung des Spannungszustandes in Rotoren	289
16.19	Gestaltung von Rotoren	297
	Literatur	305
17.	Festigkeitsprobleme an stillstehenden Teilen	306
17.1	Gehäuse und Leitschaufelträger, Allgemeines	306
17.2	Topfgehäuse	306
17.3	Gehäuse und Leitschaufelträger mit horizontalem Trennflansch	313
17.4	Berechnung von Gehäuseteilen nach der Theorie dünner Schalen	319
17.5	Viskoser Spannungszustand in Kugel- und Zylinderschalen	323
17.6	Berechnung der Bolzen	325
17.7	Berechnung der Leitradzwischenböden	328
	Literatur	329
18.	Temperatur- und Kühlungsprobleme	330
18.1	Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges	330
18.2	Ähnlichkeitsgesetz der Wärmeleitung, Analogieversuche	332
18.3	Strenge Lösung des Problems der instationären Wärmeleitung	335
	a) Ebene Platte	336
	b) Zylinder	336
	c) Kugel	337
	d) Allgemeine instationäre Lösungen für Platte, Zylinder, Kugel und allgemeinere Körper	337
	e) Stationäre Lösungen	339
18.4	Stationäre Temperaturverteilung in Rotoren und Gehäusen	339
18.5	Eindimensionaler Temperaturverlauf in ungekühlten Schaufeln	347
18.6	Temperaturprobleme beim Anfahren und bei Laständerungen, vereinfachte Behandlung	351
18.7	Differenzenverfahren zur Berechnung instationärer Temperaturfelder	354
18.8	Berechnung von instationären Temperaturfeldern in Rotoren und Gehäusen	361
18.9	Berechnung der Wärmedehnungen	369
18.10	Gekühlte Schaufeln	371
18.11	Theorie der gekühlten Schaufel	378
18.12	Theorie der gekühlten Turbine	386

18.13	Vorausbestimmung der Zustandsänderungen in gekühlten Turbinen bei Prozeßrechnungen	395
	Literatur	399
19.	Schwingungen von Schaufeln und Scheiben	400
19.1	Der einfache Schwinger	400
19.2	Rückführung des allgemeineren Falles des schwingenden Körpers auf den einfachen Schwinger	403
19.3	Gekoppelte Schwingungen	406
19.4	Biegeschwingungen eines geraden Stabes	407
19.5	Drehschwingungen eines geraden Stabes	411
19.6	Bestimmung von Eigenfrequenzen nach dem Verfahren von STODOLA	413
	a) Allgemeines	413
	b) Biegeschwingung	414
	c) Drehschwingung	416
19.7	Bestimmung der Eigenfrequenzen nach dem Verfahren von RAYLEIGH	418
	a) Allgemeines	418
	b) Biegeschwingungen	419
	c) Drehschwingungen	422
19.8	Formel von DTTNKEKLEY	423
19.9	Die Eigenfrequenzen von Schaufelpaketen	425
19.10	Der Einfluß der Fliehkraft auf die Eigenfrequenzen	434
19.11	Schwingungen stark verwundener Schaufeln	438
19.12	Schwingungsberechnung mit Hilfe von Übertragungsmatrizen	443
19.13	Berechnung von Scheibenschwingungen mit Übertragungsmatrizen	448
19.14	Koppelschwingungen von Schaufeln und Scheibe	454
19.15	Einflüsse zusätzlicher Effekte auf die Eigenfrequenzen	461
19.16	Experimentelle Feststellung von Eigenfrequenzen	462
19.17	Schwingungsanregung und Spannungsamplitude bei einzeln schwingenden Schaufeln	464
19.18	Schwingungsanregung und Spannungsamplitude bei Paketschwingungen	469
19.19	Größe der Erregungskräfte	473
19.20	Größe der Dämpfung, Selbsterregung	477
19.21	Die schwingungstechnische Auslegung von Schaufelungen	485
	Literatur	488
20.	Dynamische Probleme des Läufers	489
20.1	Die kritischen Drehzahlen eines beliebigen drehsymmetrischen Läufers	489
20.2	Die Scheibe an einer masselosen Welle als Modell des wirklichen Läufers	496
20.3	Stabilitätsuntersuchung nach STODOLA	500
20.4	Der Einfluß der elastischen Lagerung	503
20.5	Nicht drehsymmetrische Läufer	508
20.6	Die Kreiselwirkung	511
20.7	Nachgiebigkeit und Dämpfung des Ölfilms	515
20.8	Der Einfluß der inneren Dämpfung auf die Stabilität	523
20.9	Klassische Verfahren zur Bestimmung kritischer Drehzahlen	529
20.10	Bestimmung kritischer Drehzahlen durch Digitalrechengерäte	534
20.11	Bestimmung der kritischen Drehzahlen durch Versuche und Analogiegeräte	540
20.12	Drehschwingungen	542
20.13	Ergebnisse der Lagertheorie	546
20.14	Selbsterregte Schwingungen des Läufers	559
20.15	Gaslager	570
20.16	Zusätzliche Resonanzen bei Wälzlagern	574
	Literatur	576
21.	Anhang: Werkstoffeigenschaften	577
21.1	Allgemeines	577
21.2	Bezeichnungen	579
21.3	Werkstoffe für mäßige Temperaturen (ferritisch)	580
21.4	Ferritische Werkstoffe für höhere Temperaturen	581
21.5	Austenitische Werkstoffe und Sonderlegierungen	583
21.6	Relaxation und Abbau von Spannungsspitzen	588
21.7	Leichtmetalle	592
21.8	Oxydation und Korrosion	593
	Literatur	594
	Namen- und Sachverzeichnis	595