

Thermische Turbomaschinen

Zweiter Band

Thermische Turbomaschinen

Von

Dr. Walter Traupel

o. Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule
Zürich

Zweiter Band

**Regelverhalten, Festigkeit
und dynamische Probleme**

Mit 459 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1960

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen
© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1960
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1960

ISBN 978-3-662-30447-1

ISBN 978-3-662-30446-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-30446-4

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften

Vorwort

Der vorliegende zweite Band behandelt drei voneinander wesentlich verschiedene Problemkomplexe, nämlich erstens das *Regelverhalten* der thermischen Turbomaschinen, zweitens die *Festigkeitsprobleme* (einschließlich der Temperaturprobleme, die mit ihnen eng verknüpft sind) und drittens die *dynamischen Fragen* (Schaufelschwingungen, kritische Drehzahlen usw.). Während die Behandlung des Regelverhaltens eine völlig natürliche Fortsetzung des Stoffes des ersten Bandes ist, scheint dies für die beiden übrigen Problemkreise weniger zuzutreffen. Trotzdem hielten wir es für dringend wünschbar, in einem solchen Buch die mechanischen Fragen nicht zu übergehen.

Die Vorstellung, an einer thermischen Strömungsmaschine werde alles Wesentliche durch strömungstechnische und thermodynamische Gesichtspunkte bestimmt, und das übrige sei Routinearbeit, ist leider recht weit verbreitet. Sie ist aber durchaus unzutreffend, um so mehr als dabei auch meist das Konstruktive als gedankliche Leistung unterbewertet wird. Die einwandfreie Lösung der mechanischen Probleme ist ebenso wichtig und ebenso schwierig, und die Betriebstüchtigkeit der Maschine hängt entscheidend davon ab. Deshalb müssen diesbezügliche Untersuchungen schon die ganze Auslegung und Konzeption der Maschine maßgebend beeinflussen. Der verantwortliche Ingenieur sollte die Zusammenhänge in ihrer Gesamtheit überblicken, d. h. in seine Überlegungen müssen zugleich mit thermodynamisch-strömungstechnischen auch mechanische Erwägungen eingehen. Diesem Sachverhalt möchten wir mit dem Buch gerecht werden.

Bei der Ausarbeitung dieses zweiten Bandes habe ich wiederum wertvolle Anregungen von Ingenieuren aus der Praxis erhalten. Ihnen allen möchte ich meinen Dank aussprechen, ebenso Frh. O. PALLAVICINI für die Anfertigung des Manuskriptes und den Herren Dipl.-Ing. H. JAGGI und Dipl.-Ing. G. GYARMATHY für das Lesen der Korrekturen. Besonders bin ich auch dem Springer-Verlag dankbar für die gewohnte vorbildliche Ausführung des Buches und für die Bereitwilligkeit, mit der er bei dem ganzen zweibändigen Werk auf meine verschiedenen Wünsche eingegangen ist.

Zürich, im Juli 1960

W. Traupel

Inhaltsverzeichnis

	Seite
12. Regelung der Dampfturbinen	1
12.1 Allgemeines	1
12.2 Regeleinriffe	1
12.3 Thermodynamische Berechnung der Regelung	5
12.4 Bemessung der Regelventile	14
12.5 Funktionelle Probleme der Dampfturbinenregelung	20
12.6 Berechnung der Überdrehzahlen	30
Literatur.	39
13. Regelung der Turboverdichter	40
13.1 Regeleinriffe	40
13.2 Saugdrosselregelung	42
13.3 Abblaseregelung	47
13.4 Umblaseregelung	51
13.5 Axialverdichterregelung durch Schaufelverstellung	54
13.6 Verdichter mit Zwischenkühlung	61
13.7 Funktionelle Probleme der Verdichterregelung	64
Literatur.	69
14. Regelung der Gasturbinen	70
14.1 Regeleinriffe	70
14.2 Berechnung der Beharrungszustände	73
14.3 Klimaempfindlichkeit und Teillastwirkungsgrad	85
a) Allgemeines	85
b) Einwellige Anlage	89
c) Anlage mit seriegeschalteten Turbinen	90
d) Anlage mit parallelgeschalteten Turbinen	91
e) Gegenüberstellung der verschiedenen Schaltungen	92
14.4 Beispiele gerechneter und gemessener Gasturbinencharakteristiken	94
14.5 Zur Dynamik der Gasturbinenregelung	102
14.6 Energieinhalt und regeltechnische Trägheit	110
14.7 Das Problem der Lastabschaltung	118
14.8 Beispiele von Gasturbinenregelsystemen	122
14.9 Übersicht über das regeltechnische Verhalten der verschiedenen Schaltungen	129
Literatur.	132
15. Festigkeit der Schaufelungen	132
15.1 Schaufelbeanspruchung durch Fliehkraft	132
15.2 Beanspruchung der freistehenden Schaufel durch Strömungskräfte	139
15.3 Rückwirkung der Fliehkraft auf die Beanspruchung der freistehenden Schaufel durch Strömungskräfte	146
15.4 Beanspruchung des Schaufelpaketes durch Strömungskräfte	150
15.5 Gestaltung der Schaufelbefestigung	156
15.6 Beanspruchung der Schaufelbefestigung	163
15.7 Beanspruchung der Schaufeln der Radialturbinen	177
15.8 Beurteilung der Festigkeit von Schaufeln und ihren Befestigungen	178
Literatur.	188
16. Festigkeit der Rotoren	188
16.1 Freitragender Ring	188
16.2 Radkranz mit Schaufeln, an Scheibe	190
16.3 Differentialgleichungen der rotierenden Scheibe bei elastischer Verformung	193
16.4 Scheibe gleicher Festigkeit	195
16.5 Scheibe für beliebig vorgegebenen Spannungsverlauf	196

	Seite
16.6 Scheibe konstanter Dicke	198
16.7 Scheibe hyperbolischen Profils	201
16.8 Keglige Scheibe	202
16.9 Scheibe beliebigen Profils	207
16.10 Zylindrische Trommel	210
16.11 Spannungskonzentration an Ausgleichlöchern	213
16.12 Bestimmung des Schrumpfmaßes	213
16.13 Rotoren mit ausladendem Kranz und zusammengesetzte Trommelrotoren	215
16.14 Laufräder von Radialverdichtern	217
16.15 Spannungsverteilung im Rotor bei kriechendem Werkstoff (viskoser Spannungszustand)	220
16.16 Die Beurteilung des Spannungszustandes in Rotoren	227
16.17 Gestaltung von Rotoren	233
Literatur	241
17. Festigkeitsprobleme an stillstehenden Teilen	242
17.1 Gehäuse und Leitschaufelträger, Allgemeines	242
17.2 Topfgehäuse	242
17.3 Gehäuse und Leitschaufelträger mit horizontalem Trennflansch	248
17.4 Berechnung der Bolzen	253
17.5 Berechnung der Leitradzwischenböden	255
Literatur	256
18. Temperatur- und Kühlungsprobleme	257
18.1 Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges	257
18.2 Ähnlichkeitsgesetz der Wärmeleitung, Analogieversuche	258
18.3 Strenge Lösungen des Wärmeleitungsproblems	262
a) Ebene Platte	262
b) Zylinder	263
c) Kugel	263
d) Allgemeinere instationäre Lösungen für Platte, Zylinder und Kugel	264
e) Stationäre Lösungen	265
18.4 Stationäre Temperaturverteilungen in Rotoren und Gehäusen	266
18.5 Temperaturverlauf in ungekühlter Schaufel	273
18.6 Gekühlte Schaufel	275
18.7 Theorie der gekühlten Turbine	280
18.8 Temperaturprobleme beim Anfahren und bei Laständerungen	283
Literatur	286
19. Schaufelschwingungen	287
19.1 Der einfache Schwinger	287
19.2 Rückführung des allgemeineren Falles des schwingenden Körpers auf den einfachen Schwinger	291
19.3 Gekoppelte Schwingungen	293
19.4 Biegeschwingungen eines geraden Stabes	295
19.5 Drehschwingungen eines geraden Stabes	298
19.6 Bestimmung von Eigenfrequenzen nach dem Verfahren von STODOLA	301
a) Allgemeines	301
b) Biegeschwingungen	302
c) Drehschwingungen	304
19.7 Bestimmung der Eigenfrequenzen nach dem Verfahren von RAYLEIGH	306
a) Allgemeines	306
b) Biegeschwingungen	307
c) Drehschwingungen	310
19.8 Formel von DUNKERLEY	311
19.9 Die Eigenfrequenzen von Schaufelpaketen	314
19.10 Der Einfluß der Fliehkraft auf die Eigenfrequenzen	321
19.11 Einflüsse zusätzlicher Effekte auf die Eigenfrequenzen	325
19.12 Experimentelle Feststellung von Eigenfrequenzen	326
19.13 Schwingungsanregung und Spannungsamplitude bei einzeln schwingenden Schaufeln	328
19.14 Schwingungsanregung und Spannungsamplitude bei Paketschwingungen	332
19.15 Die schwingungstechnische Auslegung von Schaufelungen	336
Literatur	341
20. Dynamische Probleme des Läufers	342
20.1 Die kritischen Drehzahlen eines beliebigen drehsymmetrischen Läufers	342
20.2 Die Scheibe an einer masselosen Welle als Modell des wirklichen Läufers	349
20.3 Stabilitätsuntersuchung nach STODOLA	353

	Seite
20.4 Der Einfluß der elastischen Lagerung	356
20.5 Nicht drehsymmetrische Läufer.	359
20.6 Die Kreiselwirkung	362
20.7 Nachgiebigkeit und Dämpfung des Ölfilmes	365
20.8 Klassische Verfahren zur Bestimmung kritischer Drehzahlen	370
20.9 Bestimmung kritischer Drehzahlen durch Digitalrechnergeräte	374
20.10 Bestimmung kritischer Drehzahlen durch Versuche und Analogiegeräte.	380
20.11 Ergebnisse der Lagertheorie	382
20.12 Selbsterregte Schwingungen des Läufers	393
20.13 Zusätzliche Resonanzen bei Wälzlagern	400
Literatur.	402
21. Anhang: Werkstoffeigenschaften	402
21.1 Allgemeines.	402
21.2 Bezeichnungen	404
21.3 Werkstoffe für mäßige Temperaturen	405
21.4 Ferritische Werkstoffe für höhere Temperaturen	406
21.5 Austenitische Werkstoffe und Speziallegierungen für sehr hohe Temperaturen	407
21.6 Relaxation	411
21.7 Titan und Titanlegierungen	411
21.8 Oxydation und Korrosion	412
Literatur.	413
Liste der Formelzeichen	414
Namen- und Sachverzeichnis	418