

Christian Waldherr

Ein Beitrag zur strukturdynamischen Analyse verstimmter Laufräder unter Rotation

Ein Beitrag zur strukturdynamischen Analyse verstimmter Laufräder unter Rotation

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Christian U. Waldherr

aus Tettnang

Hauptberichter: Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühhorn

Tag der mündlichen Prüfung: 14.12.2020

Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium
der Universität Stuttgart

2021

Berichte aus der Mechanik

Christian Waldherr

**Ein Beitrag zur strukturdynamischen Analyse
verstimmter Laufräder unter Rotation**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7941-8

ISSN 1616-0126

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Mein erster Dank gebührt Herrn Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt, der bereits meine Masterarbeit mit großem Interesse begleitet hat und mich bei meiner Promotionstätigkeit durch fachliche Gespräche und nötigen Freiraum bei der Forschung stets unterstützte. In meiner Zeit am ITSM durfte ich im Rahmen des FVV-Projektes „Schaufelkräfte“ spannende und inspirierende Diskussionen mit Prof. Vogt führen und erhielt dabei auch Einblicke in Themengebiete, welche nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühhorn möchte ich für die Anfertigung des Mitberichtes sowie dem entgegengebrachten Interesse an dieser Arbeit meinen Dank aussprechen.

Weiterer Dank gilt meinem Freund und Arbeitskollegen Tobias Müller. In zahlreichen Gesprächen diskutierten wir auftretende Probleme in unseren Fachgebieten und erhielten so ein besseres Verständnis für physikalische Vorgänge. Über unsere fachlichen Gespräche hinaus durfte ich mit ihm viele schöne Augenblicke bei gemeinsamen Bergtouren verbringen. Bei meinem Freund und Zimmerkollegen Marius Mihailowitsch möchte ich mich für die angenehmen und spannenden fachlichen und privaten Unterhaltungen bedanken. Eine Unterhaltung, welche mir besonders in Erinnerung bleiben wird, handelte über die Ethik in der Wissenschaft. Meinem Freund und Kollegen Patrick Buchwald danke ich für die Planung und den Aufbau des Axialverdichter-Prüfstandes. Durch seine Arbeit hat er einen realen Anwendungsfall geschaffen, den ich in meiner Arbeit numerisch untersuchen konnte.

Für das Ermöglichen einer Validierung der numerischen Berechnungsergebnisse mit Messdaten möchte ich Herrn Dr. rer. nat. Jochen Schell von der in Karlsruhe ansässigen Firma Polytec danken.

Zuletzt möchte ich mich bei zwei in meinem Leben sehr wichtigen Menschen, meinen Eltern, bedanken. Durch die Selbstlosigkeit meiner Mutter und den Verzicht auf ihre eigenen beruflichen Möglichkeiten hat sie meinen Geschwistern und mir eine großartige, sorgenlose Kindheit, wie auch eine gute Ausbildung ermöglicht. Aus dieser Perspektive hat sie zu einem großen Teil zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen, wofür ich ihr herzlichst danke.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	ix
Kurzfassung	xv
Abstract	xvii
1 Einleitung	1
2 Einführung in die Problematik verstimmter Strukturen	5
3 Stand der Wissenschaft	7
3.1 Überblick über historisch bedeutende Forschungsarbeiten auf dem Themengebiet der gekoppelten Schaufelschwingungen	7
3.2 Probabilistische Untersuchung des erzwungenen Schwingungsverhaltens	8
3.3 Amplitudenreduktion durch gezieltes Einbringen von strukturellen Verstimmungen	10
3.4 Amplitudenüberhöhung durch gezieltes Einbringen von strukturellen Verstimmungen	11
3.5 Identifikation von strukturellen Verstimmungen	12
4 Modellierung elastischer, rotierender Strukturen	15
4.1 Methode der Finiten Elemente	15
4.2 Vereinfachte Berücksichtigung von Rotationseffekten	16
4.3 Zustandsraumdarstellung	17
5 Modellierung der Aeroelastik	19
5.1 Modellierung der aerodynamischen Anregung	19
5.2 Modellierung der aerodynamischen Dämpfung	21

5.3	Berechnung der aerodynamischen Anregung	24
5.4	Bemerkungen zur aerodynamischen Dämpfung	25
6	Modellordnungsreduktion	27
6.1	Modales Abschneiden	27
6.1.1	Berücksichtigung von Rotationseffekten	31
6.2	Substrukturverfahren	33
6.2.1	Craig-Bampton Verfahren	33
6.2.2	Craig-Chang Verfahren	35
6.2.3	Craig-Chang-Martinez Verfahren	37
6.3	Interface-Reduktion	38
6.3.1	Wave-Based Substructuring	38
6.3.2	Quantifizierung der Approximationsgüte der reduzierten Modelle .	41
7	Kopplung periodischer Elemente	43
7.1	Systemassemblierung in physikalischen Koordinaten	43
7.2	Verwendung von zyklischen Randbedingungen	46
7.3	Assemblierung zum 360°-Modell	49
8	Verstimmungsidentifikation	51
8.1	Best Achievable Eigenvektor Ansatz	51
8.2	Ein neuer Ansatz zur Verstimmungsidentifikation	54
8.3	Verstimmungsidentifikation als Optimierungsproblem	57
9	Quantifizierung von Verstimmungseffekten	59
9.1	Begriff der Frequenzpfadverfolgung	59
9.2	Begriff der Modenfülligkeit	61
9.3	Begriff der Amplitudenüberhöhung	61
10	Validierung des erweiterten SNM-Ansatzes	65
10.1	Einführung des Fallbeispiels <i>ITSM-M1</i>	65
10.2	Statische Vorspannungsanalyse und Matrizenexport	66

10.3 Genauigkeit der implementierten Reduktionsansätze in der Vorhersage des Eigenschwingungsverhaltens	67
10.4 Zusammenfassung	74
11 Probabilistische Verstimmungsuntersuchungen	77
11.1 Analyse des Eigenschwingungsverhaltens der unverstimmten Struktur . .	77
11.2 Validierung der Approximationsgenauigkeit in der Vorhersage des Eigenschwingungsverhaltens	78
11.3 Probabilistische Analyse des Eigenschwingungsverhaltens verstimmter Strukturen	80
11.4 Validierung der Approximationsgenauigkeit in der Vorhersage des erzwungenen Schwingungsverhaltens	87
11.5 Probabilistische Analyse des erzwungenen Schwingungsverhaltens RCM1KD6	89
11.6 Probabilistische Analyse des erzwungenen Schwingungsverhaltens RCM2KD4	92
11.7 Zusammenfassung	96
12 Resonanzamplitudenänderung bei gezieltem Einbringen struktureller Verstimmungen	99
12.1 Mechanismen der Amplitudenreduktion	99
12.2 Maximale Amplitudenüberhöhung	104
12.3 Zusammenfassung	106
13 Eignung und Potenzial von Substrukturverfahren	109
13.1 Bemerkungen zur Interface-Reduktion bei Verwendung von Substrukturverfahren	109
13.2 Genauigkeit bei Verwendung der wellenbasierten Interface-Reduktion . .	112
13.3 Eignung der Reduktionsansätze bei Berücksichtigung großer Verstimmungen: Eigenschwingungsverhalten	113
13.4 Eignung der Reduktionsansätze bei Berücksichtigung großer Verstimmungen: Erzwungenes Schwingungsverhalten	117
13.5 Zusammenfassung	118

14 Validierung des SNM-ID Ansatzes	119
14.1 Validierung ohne Messrauschen	119
14.2 Validierung mit Messrauschen	125
14.3 Vergleich elastizitätsmodulbasierter Identifikationsansätze	129
14.4 Zusammenfassung	132
15 Verstimmungsidentifikation am Axialverdichterlaufrad <i>ITSM-ASBI</i>	135
15.1 Experimentelle Modalanalyse	135
15.2 Frequenzvergleich und Modenextraktion	137
15.3 Validierung der implementierten Identifikationsansätze	138
15.4 Zusammenfassung	146
16 Zusammenfassung	147
17 Ausblick	151
Literaturverzeichnis	153
A Anhang zu Kapitel 6	169
B Anhang zu Kapitel 7	171
C Anhang zu Kapitel 8	173
D Anhang zu Kapitel 10	177
E Anhang zu den Kapiteln 12, 14 und 15	181

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

A	Skalierungsfaktor
A	Zustandsraummatrix
B	Zustandsraummatrix
B	Boole'sche Matrix
B	Reduktionsbasis
b	Kraftvektor Zustandsraum
b	Vektor der Strukturverstimmungen
c	Gewichtungsvektor
c	Gewichtungsfaktor
d	Dämpfungskoeffizient
D	Dämpfungsmatrix
f	Kraftvektor
f	Eigenfrequenz
f	Funktional
G	Matrix der Bindungskräfte
G	gyroskopische Matrix
G	Nachgiebigkeitsmatrix
g	Vektor der Bindungskräfte
g	Gewichtungsfaktor
h	Schrittweite
DFT	Fourier-Koeffizient
E	Komplexe Diagonalmatrix
EO	Erregerordnung
I	Einheitsmatrix
K	Steifigkeitsmatrix
k	Formparameter der GEV
L	Matrix der Verschiebungsrandbedingungen
L	Koeffizientenmatrix

M	Massenmatrix
MF	Modenfülligkeit
N	Nichtsinguläre Matrix
N	Schaufelanzahl
n	Systemdimension
P	Population
p	modaler Verschiebungsvektor
q	Minimalkoordinaten
R	Rekombination
r	Vektor der rechten Seite
S	Relative Frequenzaufspaltung
s	Skalierungsfaktor
T	Grenzwert (engl. Treshold)
t	Zeit (engl. time)
U	Matrix der Rechts-Singulärvektoren
u	physikalischer Verschiebungsvektor
V	Matrix der Links-Singulärvektoren
W	Fourier-Matrix
W	Wellenmatrix
W	Arbeit (engl. work)
z	Verschiebungsvektor Zustandsraum

Griechische Buchstaben

α	Dämpfungskoeffizient
β	Dämpfungskoeffizient
λ	Eigenwert
Λ	Diagonalmatrix der Eigenwerte
ϕ	Sektorphasenwinkel
ψ	Knotendurchmesserabhängiger Phasenversatz
Ψ	Linkseigenvektoren
Ψ	Matrix der Linkseigenvektoren
ϕ	Rechtseigenvektoren
Φ	Matrix der Rechtseigenvektoren
ξ	Relativer Fehler

ξ	Zielfunktional
ξ	Verhältnis Fourier-Koeffizienten
χ	Amplitudenüberhöhung
ω	Eigenkreisfrequenz
Ω	Drehfrequenz
δ	Gleichverteilte Zufallsvariable
δ	Verstimmungskoeffizient
δ	Vektor der Verstimmungskoeffizienten
ΔK	Verstimmungsmatrix
γ	Lösungsvektor
ζ	Dämpfungskoeffizient
σ	Singulärwert
Σ	Matrix der Singulärwerte
σ	Skalenparameter der GEV
μ	Lageparameter der GEV

Tiefgestellte Indizes

A	Aktiv
aero	aerodynamisch
adapt	angepasst (engl. adapted)
b	Balken (engl. beam)
b	Rand (engl. boundary)
B	Blatt (engl. blade)
C	Zentrifugalfeldsteifigkeitsmatrix
c	Zwang (engl. constraint)
CB	Craig-Bampton
CC	Craig-Chang
CCM	Craig-Chang-Martinez
cyc	Zyklus (engl. cycle)
crit	kritisch (engl. critical)
Cs	Kreuzung (engl. cross section)
D	Nabe (engl. disc)
d	verwerfen (engl. delete)
d	abhängig (engl. dependent)

exc	Anregung (engl. excitation)
exp	Experiment
Freq	Frequenz
G	geometrische Steifigkeitsmatrix
Gen	Generationen
ges	gesamt
i	innen (engl. inner)
i	unabhängig (engl. independent)
id	Identifikation (engl. identification)
k	beibehalten (engl. kept)
L	linksseitig
MAC	Modal Accuracy Criterion
max	Maximum
min	Minimum
R	rechtsseitig
R	Rayleigh
red	reduziert (engl. reduced)
ref	Referenz (engl. reference)
rel	relativ
res	Fehler (engl. residual)
rot	Rotation (engl. rotation)
S	Größe (engl. size)
sec	Sektor (engl. sector)
sim	Simulation (engl. simulation)
sw	Stehende Welle (engl. standing wave)
stat	statisch (engl. static)
T	Schwellenwert (engl. threshold)
Tayl	Taylorreihe
tw	Umlaufende Welle (engl. traveling wave)
unred	unreduziert (engl. unreduced)
unver	unverstimmt
var	variabel
ver	verstimmt
x	Raumrichtung
y	Raumrichtung
z	Raumrichtung

360° 360°-Modell

Hochgestellte Indizes

0	Nominales System
centr	Zentrifugal (engl. centrifugal)
tot	total
s	Substrukturkomponente
IC	Einflusskoeffizienten (engl. influence coefficients)

Akronyme

ASB	Axial Subsonic Blisk
c	Cosinus
CB	Craig-Bampton
CC	Craig-Chang
CCM	Craig-Chang-Martinez
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMS	Component Mode Synthesis
BAE	Best Achievable Eigenvector
EF	Eigenfrequenz
F	Familie
FE	Finite Elemente
FHG	Freiheitsgrad
FINM	Fixed Interface Normal Modes
FIM	Free Interface Modes
FMM	Fundamental Mistuning Model
GEV	Verallgemeinerte Extremwertverteilung
ID	Identification
KD	Knotendurchmesseranzahl
KOS	Koordinatensystem
LDSV	Laser Doppler Scanning Vibrometer
M	Modellrad
MAC	Modal Accurance Criterion
MKD	Modifizierte Knotendurchmesseranzahl

MW	Mittelwert
RBEDN	Relative Blade Euclidean Displacement Norm
RC	Resonance Crossing
RS	Resonanzschwingung
RW	rückwärts
SNM	Subset of Nominal System Modes
s	Sinus
VW	vorwärts
WBS	Wave-Based Substructuring
WBSM	Wave-Based Substructuring Modes

Operatoren, Funktionen und Symbole

\Re	Realteil
\Im	Imaginärteil
H	hermetisch transponiert
T	transponiert
∂	partielles Differential
+	Pseudoinverse
\mathcal{O}	Abbruchfehler
\ddagger	hermitesche Matrix
$\hat{\cdot}$	reduziertes System
$\dot{\cdot}$	erste Ableitung
$\ddot{\cdot}$	zweite Ableitung

Kurzfassung

Zur schwingungssicheren Auslegung von Laufrädern wird heute meist die Finite-Elemente-Methode zur Diskretisierung eingesetzt. Dabei gilt es, den Berechnungsaufwand zur Lösung des resultierenden Bewegungsgleichungssystems bei unveränderter Diskretisierung gering zu halten. Wird die ideale, rotationsperiodische Laufradstruktur betrachtet, so lässt sich das dynamische Verhalten im Allgemeinen durch die Aufprägung von zyklischen Randbedingungen an einem Sektormodell betrachten. Für die Analyse rotierender Strukturen wird ein Ansatz zur Approximation der Zusatzmatrizen angegeben, wodurch sich für die Berechnung eines Campbell-Diagramms die Anzahl der durchzuführenden Vorspannungsanalysen reduzieren lässt. Durch Kombination des zyklischen Berechnungsansatzes mit der Modellordnungsreduktion kann die Rechenzeit ohne nennenswerten Verlust der Approximationsgenauigkeit minimiert werden. Die Validierung des vorgeschlagenen Berechnungsansatzes erfolgt an einem Axialverdichterlaufrad unter Berücksichtigung des Coriolis-Effektes.

Von besonderer Bedeutung ist die Modellordnungsreduktion für die Analyse des Schwingungsverhaltens verstimmter Laufräder. Für die probabilistische Analyse vergleichsweise schwach verstimmter Systeme kommt aufgrund der hohen Rechenzeitersparnis der systemmodenbasierte Reduktionsansatz zur Anwendung. Basierend auf diesen Analysen kann das bekannte Phänomen eines lokalen Maximums in der Amplitudenüberhöhungskurve aufgezeigt werden. Für die Anregung einer isolierten Doppelmode beläuft sich die maximale Amplitudenüberhöhung in guter Übereinstimmung mit den Kriterien von MacBain und Whaley [101] sowie Martel und Corral [104] auf einen Zahlenwert von 1.15. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der probabilistischen Analysen in Übereinstimmung mit den Resultaten von Griffin und Hoosac [55] Potential zur Amplitudenreduktion auf. Entgegen den von Petrov [131] und Schoenenborn et al. [148] postulierten Thesen, welche die Dämpfungscharakteristik als Ursache für die Amplitudenreduktion benennen, wird festgestellt, dass die Lokalisierung der Schwingungsenergie durch reduzierte generalisierte Kräfte überkompensiert wird. Die für Anregung einer isolierten Doppelmode gefundene maximale Amplitudenreduktion von 0.92 steht dabei in guter Übereinstimmung mit dem auf Basis einer analytischen Theorie abgeleiteten Kriterium von Willeke et al. [175].

Bei Berücksichtigung großer Verstimmungen kann basierend auf einer Fourier-Zerlegung der Eigenschwingungsformen des stark verstimmt Systems die Unzulänglichkeit des systemmodenbasierten Reduktionsansatzes aufgezeigt werden. Demgegenüber zeigen die Substrukturverfahren großes Potential für die Untersuchung stark verstimmt Systeme. Dem in Verbindung mit den Substrukturverfahren stehenden Nachteil der verbleibenden Interface-Freiheitsgrade kann durch den Einsatz der wellenbasierten Interface-Reduktion ohne nennenswerten Verlust der Approximationsgenauigkeit entgegengewirkt werden.

Zur Identifikation von Verstimmungen realer Laufräder wird ein in dieser Arbeit neu entwickelter Identifikationsansatz analytischen und heuristischen, steifigkeitsbasierten Identifikationsansätzen gegenübergestellt. Für das auf Basis von Laservibrometriemessungen abgeleiteten Eigenschwingungsverhaltens eines Axialverdichterlaufrades kann die Überlegenheit des neuen Identifikationsansatzes demonstriert werden. Die geringste Adaptionsgüte wird durch Anwendung des Best Achievable Eigenvektor Identifikationsansatzes erzielt. Auf Basis von Sensitivitätsuntersuchungen wird gezeigt, dass sich die geringere Adaptionsgüte auf ein Konditionierungsproblem zurückführen lässt. Insbesondere zeigt sich, dass kleinste Manipulationen an den zur Identifikation benötigten Eigenvektoren großen Einfluss auf die erzielbare Adaptionsgüte nehmen.

Abstract

For the vibration-resistant design of blisks nowadays primarily the finite element method is used for discretization. In this context, it is necessary to minimise the calculation effort without altering the discretisation. If the perfect periodic structure is analyzed, the dynamic behavior can be predicted by using cyclic boundary conditions. To analyze the behavior of rotating structures, an approach is given to approximate the additional matrices. Thereby, the number of necessary prestress analyses for calculating the Campbell diagram is reduced drastically. Through the combination of cyclic boundary conditions as well as model order reduction the computation time can be reduced without significant loss of accuracy. To validate the proposed calculation methodology, the approach is applied to an axial compressor wheel considering Coriolis effects.

For the probabilistic analysis of comparatively weak mistuned systems the system mode based reduction approach is used because of the strong savings in computation time. Based on the resulting statistical outcome the well-known peak behavior in the amplitude magnification curve can be shown. The excitation of an isolated double mode leads in good agreement with the criteria from MacBain and Whaley [101] as well as Martel and Corral [104] to a numerical value of 1.15 in amplitude magnification. In accordance with the findings of Griffin and Hoosac [55] the results of the probabilistic investigations indicate potential for the reduction of resonance amplitudes. Contrary to the postulated theses of Petrov [131] and Schoenenborn et al. [148] which designate the damping characteristic as main reason for the amplitude reduction, it is found that the localization of vibration energy is overcompensated by reduced generalized forces. The calculated amplitude magnification of 0.92 for the excitation of an isolated double mode is in good accordance with the analytical expression derived from Willeke et al. [175].

An important field of reduced order modeling is the vibration analysis of mistuned blisks. When large mistuning is taken into account, the inadequacy of the system mode based reduction approach is demonstrated based on a Fourier decomposition of mistuned mode shapes. In contrast, the substructure methods show great potential for the analysis of strong mistuned systems. The related disadvantage of remaining interface degrees of freedom can be avoided without significant loss of accuracy by applying the wave based substructuring interface reduction technique.

To identify mistuning patterns of real blisks a newly developed identification approach is compared with an analytical and heuristical, stiffness based identification approach. Based on the natural vibration behavior derived from laser vibrometer measurements the superiority of the new identification approach is shown. The lowest adaption accuracy is achieved by applying the best achievable eigenvector identification approach. Based on sensitivity analysis, it is demonstrated that the reduced adaption accuracy is caused by a conditioning problem. In particular, small manipulations of the mode shapes which are used in the identification process have a large impact on the achievable adaption quality.