Aktive Schwingungsberuhigung mit reflektierenden und isolierenden Verbindungselementen in mehrfach angeregten Strukturen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. (FH) Björn Timo Kletz
geb. am 21.10.1983 in Lüneburg
genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Monner
Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Promotionskolloquium am 14.02.2017

Berichte aus dem Maschinenbau

Björn T. Kletz

Aktive Schwingungsberuhigung mit reflektierenden und isolierenden Verbindungselementen in mehrfach angeregten Strukturen

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Informationen 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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5207-07
ISSN 0945-0874

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: `www.shaker.de` • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Diese Dissertation stellt neuartige IC^2-Regler und aktive Verbindungselemente vor, die kombiniert Systemeigenschaften realisieren, die bisher als unvereinbar galten.

Zum Schutz eines empfindlichen Bauteils vor Schwingungen sind von nun an Systemeinstellungen erreichbar, bei denen eine Struktur gleichzeitig sowohl sehr weich als auch sehr steif gelagert wirkt. Gegenüber verschiedenartigen simultan angreifenden Anregungen bilden sich so Reflexionen aus, infolge derer eine empfindliche Struktur schwingungsberuhigt ist.

Zentrale Themen dieser Arbeit sind die Beschreibungen von Reflexionen zwischen verschiedenen Systemteilen, die Impedanzeinstellung von Verbindungselementen, die Bestimmung der für eine geeignete Regelung zu erfassenden Größen und die Implementierung dieser Regelungen in analoger, digitaler und adaptiver Ausführung.

Zur Induktion generischer Aussagen sind alle Systemgleichungen in analytischer Form angegeben. So wird deutlich, dass die neu eingeführten Regler unabhängig von den wirkenden Anregungen und dem Umfeld gültig sind, in dem die Verbindungselemente eingesetzt werden. Diese Regler können entweder aus wenigen Bauteilen aufgebaut oder mit Filtern geringer Ordnung auf einfachen Mikrocontrollern implementiert sein.

In den durchgeführten Experimenten erreicht ein entsprechend geregeltes Verbindungselement eine Schwingungsberuhigung von 41,8 dB gegenüber dem ungeregelten Aufbau.

Stichwörter:
Schwingungsisolation, Schwingungsberuhigung, Fußpunktanregung, Kraftanregung, Regelung, adaptiver Regler, Impedanzregelung, Isolation, Reflexion, Dämpfung, Piezokeramik, Tauchspulaktor

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2011 bis 2016 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) und am Institut für Adaptronik und Funktionsintegration (IAF) der Technischen Universität Braunschweig.

In erster Linie möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Monner und Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius, den Betreuern und Gutachtern dieser Dissertation, bedanken. Sie waren stets für anregende Diskussionen verfügbar, unterstützten mich bei auftretenden Fragen zur Erstellung der Arbeit und gaben mir die gewünschten Freiräume. Sie boten mir ein herausragendes und kreatives Forschungsumfeld und ermöglichten mir mit internationalen Konferenzbesuchen und Vorlesungen Einblicke in mir neue und spannende Kulturen.

Besonders bedanke ich mich bei meinem Mentor Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Melcher. Mit sehr großem Engagement förderte und motivierte er mich von Anbeginn meiner Tätigkeit im DLR. Bei allen auftretenden Fragen war er stets kurzfristig erreichbar und immer hilfsbereit. Mit seinem Enthusiasmus und den exzellenten, sehr fruchtbaren und kreativen Diskussionen leistete er einen für mich sehr wichtigen Beitrag zum Gelingen der Arbeit. Er trieb mich stets an, das Erreichte weiter zu verbessern.

Von ganzen Herzen danke ich besonders meiner lieben Frau und Freundin Lina. Erst mit ihrem stetigen Zuspruch, ihrer unentwegten Unterstützung und auch mit ihrem großen Verständnis während der letzten Jahre der Forschung konnte diese Arbeit gelingen. Sie durchlebte mit mir die Höhen und auch die Tiefen, die sie ganz im Sinne dieser Arbeit ausglich und ins Positive verkehrte.

Meinen lieben Eltern Herbert und Ingrid und meinem Bruder Florian danke ich ebenfalls ganz besonderes. Sie standen seit jeher verständnisvoll am meiner Seite und bestärkten mich mit aller Kraft auf meinem Weg. Für die Jahre der Unterstützung gebührt ihnen mein herzlicher Dank.

Auch den freundlichen Umgang zwischen den Kollegen und die allseits offene Kommunikation an beiden Instituten möchte ich hervorheben, stets herrschte eine Atmosphäre, in der ich meiner Arbeit mit viel Freude nachgehen konnte. Aus dem Kreise der Kollegen bin ich insbesondere den Herren Doktoren Marcus Perner, Stephan Algermissen, Malte Misol und Martin Pohl sowie den Herren Ralf Keimer und Torsten Mendrock für die in verschiedenen Bereichen geleistete Unterstützung dankbar.

Hinweise zum vorliegenden Dokument

Die wichtigsten Schaubilder dieser Dissertation sind mit dem Symbol gekennzeichnet. Es weist auf Abbildungen hin, die auf ausklappbaren Seiten am Ende des Dokuments wiederholt sind. Die entsprechenden Darstellungen können so stets im Blick des Lesers bleiben.

Weiterhin finden sich einige Animationen innerhalb des elektronischen Dokuments, sie sind mit der Kennzeichnung hervorgehoben. Außerdem enthält diese Arbeit 3D-Modelle des verwendeten Verbindungselements und des Versuchsstands, sie sind mit markiert.

Damit die Animationen und die 3D-Elemente betrachtet werden können, muss *JavaScript* für dieses Dokument aktiviert sein.

Braunschweig, im Februar 2017 Björn T. Kletz

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung **I**

Vorwort **III**

Inhaltsverzeichnis **V**

Symbolverzeichnis **IX**

1 Einleitung **1**

2 Motivation der Arbeit und Arbeitshypothesen **3**

3 Fortschrittliche Reflexions- und Isolationssysteme **9**

3.1 Wesentliche Merkmale reflektierender und isolierender Verbindungselemente . 9

3.1.1 Impedanzdefinition 9

3.1.2 Begriffsbestimmungen: Reflexion, Transmission, Isolation und Dissipation 12

3.1.3 Begriffsbestimmung: Impedanzanpassung 19

3.2 Stand des Wissens und der Technik 21

3.2.1 Systematik der Literaturrecherche 21

3.2.2 Kritische Diskussion der Literatur 22

3.2.3 Hypothesenbezogenes Fazit 32

4 Realisierung unendlich großer und unendlich kleiner mechanischer Impedanzen **35**

4.1 Bestimmung von Eingangsimpedanzen und Reflexionsfaktoren von Isolations- und Reflexionssystemen 35

4.1.1 Grundlegende Modellierung und Berechnung unterschiedlich angeregter Isolations- und Reflexionssysteme 36

4.1.2 Modellierung und Berechnung von Isolations- und Reflexionssystemen bei allgemeinen Anschlüssen 43

4.1.3 Einstellung von Totalreflexionen in Gesamtsystemen zur Minimierung von Kräften und Schwingungen . . . 56
4.2 Bezugsgrößenabhängige Impedanzeinstellung bei mehrseitiger Schwingungsanregung . . . 62
4.2.1 Begriffsbestimmung und Vorgehen zur Berechnung der bezugsgrößenabhängigen optimalen Einstellungen für die Schwingungsberuhigung einer Nutzlast . . . 64
4.2.2 Spezifische Berechnung der optimalen Impedanz und der Aktoreinstellung zur Schwingungsberuhigung einer Nutzlast . . . 66
4.2.3 Berechnung der optimalen Impedanz und Aktoreinstellung zur Schwingungsberuhigung einer Nutzlast bei allgemeinen Anschlusskomponenten und unbekannten Anregungen . . . 75
4.3 Zusammenfassung des verwendeten Berechnungsverfahrens . . . 81
4.4 Hypothesenbezogenes Fazit . . . 82

5 Aktive Schwingungsberuhigung mithilfe messtechnisch erfassbarer Größen 85
5.1 Berechnung sekundärer Aktorkräfte mithilfe messbarer Gesamtkräfte und Gesamtschnellen . . . 85
5.2 Analytische Reglerauslegung . . . 91
5.2.1 *Skyhook*-Regler . . . 96
5.2.2 Interface-konforme Zweikreisregler (IC^2-Regler) . . . 96
5.2.3 Allgemeingültige Beschreibung von Systemen mit *Skyhook*- und IC^2-Reglern . . . 97
5.2.4 Spezifisches Systemverhalten mit *Skyhook*- und IC^2-Reglern . . . 101
5.2.5 Stabilitäts- und Robustheitsanalyse . . . 104
5.2.6 Leistungsfähigkeit von *Skyhook*- und IC^2-Reglern . . . 110
5.3 Digitale IC^2-Regler . . . 113
5.3.1 IC^2-Regler mit digitalen IIR-Filtern . . . 114
5.3.2 IC^2-Regler mit adaptiven IIR-Filtern . . . 121
5.4 Hypothesenbasiertes Fazit . . . 125

6 Verknüpfung passiver und aktiver Systemeigenschaften 127
6.1 Optimale Ausführung passiver Systeme . . . 127
6.2 Optimale Ausführung aktiver Systeme . . . 131
6.3 Bestimmung des Frequenzbereichs aktiver Ansteuerungen . . . 139
6.4 Hypothesenbasiertes Fazit . . . 142

7 Experimentelle Untersuchungen und Nachweise **145**
7.1 Auslegung aktiver Verbindungselemente 145
7.1.1 Beschreibung des verwendeten aktiven Verbindungselements 146
7.2 Generierung der Anregungen und Aufbau der Anschlusskomponenten 150
7.3 Signalerfassung und -aufbereitung 152
7.4 Implementierte IC_A^2-Regelung 153
7.5 Experimentell gewonnene Ergebnisse mit hypothesenbasiertem Fazit 155

8 Zusammenfassung und Ausblick **165**

Literaturverzeichnis **169**

A Berechnung von Systemreaktionen bei verschiedenen Anregungen **179**
A.1 Kraftanregung mit der Kraft F_{N0} 179
A.2 Fußpunktanregung mit der Schnelle v_{F0} 184
A.3 Aktoranregung mit den Größen F_{S0} oder v_{S0} 188
A.4 Systemreaktionen bei kombinierter Kraft-, Fußpunkt- und Aktoranregung . . 193

B Arbeits- und Ausgleichsfähigkeit bei hysteretischen Dämpfungen **203**

C Messungen **207**
C.1 Regelung mittels Tauchspulaktor 207
C.2 Regelung mittels Piezoaktoren 214
C.3 Gemessene Übertragungspfade 221

D Darstellungen von Systemen zur Schwingungsberuhigung bei allgemeinen Anschlüssen **229**