

Dominik Hamann

Sensitivity Analysis of the Stability of Machining Systems

SHAKER
VERLAG



Band 67 (2021)

Sensitivity Analysis of the Stability of Machining Systems

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und
Fahrzeugtechnik und dem Stuttgart Research Center for
Simulation Technology der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dominik Hamann

aus Heilbronn

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Mitberichter: Prof. Dr. Prof. h.c. Gábor Stépán

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Januar 2021

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2021

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische
Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 67/2021

Dominik Hamann

**Sensitivity Analysis of the Stability
of Machining Systems**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8127-5

ISSN 1861-1651

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

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische und Numerische Mechanik (ITM) der Universität Stuttgart. Im Rückblick auf diese zurückliegenden fünf Jahre sind es neben den fachlichen Aspekten vor allem die persönlichen Erfahrungen, welche ich als große Bereicherung schätze. Zum Ausdruck meine Dankbarkeit an viele Wegbegleiter:innen möchte ich deshalb die Gelegenheit des Vorworts nutzen.

Zunächst gilt dieser Dank Prof. Gábor Stépán für eine herzliche und lehrreiche Zeit in Budapest im Frühjahr 2017 im Rahmen meines SimTech-Auslandsaufenthalts sowie für die Übernahme des Mitberichts und das gezeigte Interesse.

Prof. Peter Eberhard möchte ich für die Übernahme des Hauptberichts danken - vor allem aber für die Möglichkeit der Entstehung dieser Arbeit und das in mich gesetzte Vertrauen. Seine Zielstrebigkeit, die stets offene Tür und das Überlassen von größt möglicher Freiheit bei der inhaltlichen Ausrichtung und gleichzeitigem Setzen von wichtigen Impulsen haben mich nachdrücklich beeindruckt. Gerne erinnere ich mich auch das gemeinsame Engagement in der Lehre.

Die Zeit am ITM wurde geprägt durch eine Vielzahl an fachlichen, kritischen oder zutiefst albernen - stets sinnvollen - Diskussionen. Möglicherweise ist die Entstehung einiger Ereignisse auf den einzigartigen Charme einiger Individuen zurückzuführen. Trotz kontinuierlichem Wandel war die Beständigkeit der ungewöhnlich hohen Konzentration starker Charaktere am Institut bemerkenswert. Die entstandenen Freundschaften sind mir eine wertvolle Errungenschaft der teils anspruchsvollen Zeit. Den Kolleg:innen möchte ich einen besonderen Dank für die fachliche, organisatorische und persönliche Unterstützung aussprechen.

Durch Studium und Promotion durfte ich stets auf die Unterstützung meiner Familie und Freunde vertrauen. Insbesondere meiner Frau Katharina danke ich für ihren bedingungslosen Rückhalt und die Wertschätzung in diesem großen Kapitel unseres gemeinsamen Lebens.

Herzlichst Dankeschön!

Dominik Hamann

Stuttgart, im März 2021.

Contents

Kurzfassung	IX
Abstract	XI
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Outline of the Thesis	3
2 Modeling of Machining Systems	7
2.1 Equations of Motion	7
2.2 Mechanics of Metal Cutting	8
2.2.1 Orthogonal Cutting	9
2.2.2 Oblique Cutting	11
2.3 Mechanistic Modeling of Machining Operations	12
2.3.1 Turning Operations	13
2.3.2 Milling Operations	15
3 Modeling of Varying Workpiece Dynamics	23
3.1 Structural Dynamics by Finite Element Analysis	23
3.2 Model-Order Reduction	25
3.2.1 Modal Truncation	28
3.2.2 Component Mode Synthesis	28
3.2.3 Moment Matching	29
3.2.4 Proper Orthogonal Decomposition	30
3.3 Parametric Model-Order Reduction	30
3.3.1 Global-Basis Approach	31

3.3.2	Local-Bases Approaches	31
3.4	Numerical Investigation	33
3.4.1	Basics of Model-Order Reduction Techniques and Motivation of the Parametric Counterpart	33
3.4.2	Modeling and Order Reduction of Moving Loads	37
3.4.3	Parametric Model-Order Reduction of In-Process Workpiece Dynamics	41
4	Stability Analysis of Machining Systems	47
4.1	Stability of Periodic Time-Delay System	48
4.1.1	Floquet Theory	49
4.1.2	Spectral Radius, Spectral Abscissa, and Basic Types of Losing Stability	49
4.2	Approximation of the Floquet Matrix	51
4.2.1	Semi-Discretization	52
4.2.2	Spectral Elements	55
4.3	Numerical Investigation	58
4.3.1	Comparison of Semi-Discretization and Spectral Elements	59
4.3.2	Adaptive Discretization for Spectral Elements	60
4.3.3	Characteristics of the Spectral Radius	63
5	Sensitivity Analysis of Machining Systems	67
5.1	Eigenvalue Problem	68
5.1.1	Distinct Eigenvalues	68
5.1.2	Multiple Eigenvalues	71
5.2	Floquet Matrix	74
5.2.1	Semi-Discretization	74
5.2.2	Spectral Elements	76
5.3	Matrix Exponential	77
5.4	Spectral Radius and Spectral Abscissa	79
5.5	Numerical Investigation	80
5.5.1	Verification of the Sensitivity Analysis	80
5.5.2	Efficiency of the Sensitivity Analysis	82

5.5.3	Sensitivity Analysis in the Vicinity of Defective Eigenvalues	85
6	Analysis of Uncertain Machining Systems	89
6.1	Possibilistic Analysis by Fuzzy Arithmetic	90
6.1.1	Standard Problem	91
6.1.2	Implicit Problem	92
6.1.3	Sampling Strategies	93
6.2	Optimization-Based Analysis	96
6.2.1	Mathematical Optimization	97
6.2.2	Numerical Continuation	98
6.2.3	Computational Implementation	100
7	Conclusion and Outlook	111
	Bibliography	115

Kurzfassung

Eine der wesentlichen Einschränkungen von erzielbaren Zeitspannungsvolumina und damit der Leistungsfähigkeit von Zerspanprozessen ist das Auftreten von sogenannten Ratterschwingungen. Dem Regenerativeneffekt, dessen mathematische Beschreibung auf retardierte Differentialgleichungen führt, wird die Tendenz zu selbsterregten Schwingungen maßgeblich beigemessen. In der fertigungstechnischen Praxis kann die Bewertung von Arbeitspunkten wesentlich bei der Auswahl von geeigneten Kenngrößen zur Reduktion des Werkzeugverschleißes, der Verbesserung von Oberflächengüten bis hin zur Vermeidung von Beschädigungen der gesamten Werkzeugmaschine beitragen. Standardmäßig werden experimentelle oder simulationsbasierte Bewertungen von Arbeitspunkten in Stabilitätskarten dargestellt, wobei die Stabilitätsgrenze in Abhängigkeit von beispielsweise Spindeldrehzahl und axialer Zustellung aufgezeigt wird. Darüber hinaus lassen sich auf Basis dieser Diagramme unterschiedliche Komponenten des zerspanenden Systems hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewerten. Zu nennen sind hier die Struktur der Werkzeugmaschine oder beispielsweise die Geometrie der Werkzeuge.

Die mathematische Modellierung von Zerspanungsvorgängen führt auf retardierte beziehungsweise totzeitbehaftete Differentialgleichungen, welche einen äußerst unregelmäßigen Verlauf der periodischen Koeffizienten aufweisen können. Diese Eigenschaften sind unmittelbar mit der Stellung beziehungsweise dem Eingriff der Schneiden verknüpft. Eine zeitliche Diskretisierung mittels Semi-Diskretisierung oder Spektralelementen ermöglicht die Approximation der charakteristischen Multiplikatoren auf der Grundlage der Theorie von Floquet. Dabei müssen anspruchsvolle Diskretisierungsstrategien wie die adaptiven Sequenzierung der Periode umgesetzt werden, um den Ansprüchen gerecht zu werden. Der enorm hohe Rechenaufwand durch Auswertung komplexer Modelle oder einer Vielzahl von Parametern führt trotz hoher, verfügbarer Rechenkapazitäten auf ungemein große Rechenzeiten.

Um die Effizienz der simulationsbasierten Analyse sicherzustellen, wird eine detaillierte Untersuchung und Anpassung von Modellierung und Stabilitätsanalyse von retardierten Differentialgleichungen in dieser Arbeit durchgeführt. Neben der Modellierung von Zerspankräften wird ausführlich die Bereitstellung der prozessinternen Strukturodynamik des Werkstücks untersucht. Zur örtliche Diskretisierung der partiellen Differentialgleichungen wird auf die Methode der Finiten Elemente zurückgegriffen. Das Vorgehen ermöglicht präzise Modelle, welche durch Projektion auf die wesentliche Dynamik reduziert werden können und für weitere Untersuchungen wie beispielsweise der numerischen Lösung von Anfangswertproblemen oder Stabilitätsuntersuchungen geeignet sind. Aufgrund der Transformation in einen gemeinsamen Unterraum können die individuell reduzierten Modelle interpoliert werden, entsprechend einem lokalen Ansatz der parametrischen Modellordnungsreduktion.

Die Analyse der Methoden zur Stabilitätsuntersuchung von retardierten Differentialgleichungen zielt auf die parameterabhängige Abbildung des Spektralradius ab. Da die Verwendung von standardmäßigen Optimierungsalgorithmen beabsichtigt ist, ist eine zumindest stückweise glatte Parameterabhängigkeit von Vorteil. Darüberhinaus kann eine lokale Sensitivitätsuntersuchung des Spektralradius die Effizienz und Verlässlichkeit dieser Optimierungsalgorithmen verbessern. Die Optimierung des Spektralradius wird durch einige Eigenschaften erschwert. Zu nennen sind hierbei insbesondere Singularitäten. Ihr Phänomen wird aufgezeigt, numerische Eigenschaften werden untersucht und Lösungsstrategien präsentiert. Schlussendlich wird ein effizientes und verlässliches Vorgehen zur Berechnung von robusten Stabilitätskarten und Stabilisierbarkeitsdiagrammen vorgestellt - basierend auf numerischem Fortsetzen.

Abstract

Machine tool vibrations are one of the major limitations with respect to material removal rates and productivity. The tendency to self-excited vibrations in machining systems bases essentially on surface regeneration whose mathematical characterization yields delay-differential equations. From the engineering point of view, an assessment of operating points supports the selection of suitable parameters in order to decrease tool wear, increase surface quality, and avoid damage of entire machine tools. The experimental or simulation-based assessment of operating points is typically illustrated in so-called stability lobe diagrams, depicting the stability limit in dependence of spindle speed and axial immersion for instance. Additionally, these diagrams can support the assessment of the performance of various components of the machining system such as the machine tool structure or tool geometries.

Mathematical modeling of machining operations yields delay-differential equations, which can exhibit highly non-smooth, time-periodic coefficients. This is directly connected to the engagement of cutting teeth. Time-discretization by Semi-Discretization or Spectral Elements enables the estimation of characteristic multipliers based on Floquet theory. In order to meet high demands, highly sophisticated discretization schemes have to be applied such as multi-interval discretization. Despite high available computation power, huge computation times can occur for the evaluation of complex models as well as models with a high amount of parameters.

For efficient simulation-based analysis of machining systems, a detailed examination and adaptation of modeling and stability analysis of delay-differential equations is performed in this thesis. Besides modeling of cutting forces, a detailed investigation of the preparation of in-process workpiece dynamics is given, where the evaluation of structural dynamics of the workpiece is performed by means of Finite Element Analysis. The approach results in accurate models reduced to essential dynamics via projection which are appropriate for further investigations such as time-domain simulations and stability analysis thanks to the transformation into a common subspace.

The examination of the stability analysis of delay-differential equations is motivated by the parameter-dependent mapping of the spectral radius. Since the application of standard optimization techniques is intended, a (piecewise) smooth parameter dependency is desired and obtained. Further, local sensitivity analysis of the spectral radius can improve the efficiency and reliability of standard optimization algorithms. Optimization based on the spectral radius is challenged by some characteristics of the spectral radius such as the appearance of singular points with infinite derivatives. This phenomenon will be highlighted as well as numerical aspects and solution strategies. At the end of the day, an efficient and reliable approach for the calculation of robust stability lobe diagrams as well as stabilizability diagrams is proposed - based on numerical continuation.