

Pia Jacobi

**Frequenzgangkopplung zur
Stabilitätskartenberechnung für
die simulationsgestützte Auslegung
von stabilen Fräsprozessen**

Schriftenreihe Virtual Machining
Hrsg.: Petra Wiederkehr



Frequenzgangkopplung zur Stabilitätskartenberechnung für die simulationsgestützte Auslegung von stabilen Fräsprozessen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr.-Ing.
von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

M.Sc. Pia Jacobi
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 23. April 2019
1. Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Petra Wiederkehr
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann

Dortmund, 2019

Virtual Machining

Band 1

Pia Jacobi

**Frequenzgangkopplung zur Stabilitätskarten-
berechnung für die simulationsgestützte Auslegung
von stabilen Fräsprozessen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6911-2

ISSN 2698-3184

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Verfahrensentwicklerin bei der Daimler AG in Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund. Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann und Frau Prof. Dr.-Ing. Petra Wiederkehr danke ich insbesondere für die Ermöglichung und die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Außerdem danke ich für die wertvollen Diskussionen, die wissenschaftlichen Förderung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Bei den Kollegen der Verfahrensentwicklung der Daimler AG am Standort in Stuttgart möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bedanken. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Wilfrid Polley, Herrn Dr.-Ing. Bonno Hayo Stürenburg und Herrn Dr.-Ing. Tobias Bleckmann. Ich danke auch meinen Studenten Herrn M.Sc. Christopher Bachmeier, Frau M.Sc. Susanne Kugler, Herrn B.Sc. Yasseen Alqiq, Herrn M.Sc. Jakob Rempel und Herrn M.Sc. Martin Betz für ihre Geduld, ihre Unterstützung und ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Herrn Jochen Frys, Herrn Bernd Schnekenburger, Herrn Norbert Vaas, Herrn Manuel Chantre, Herrn Dinko Malnar, Herrn Rocco Teschner, Frau Melanie Müller-Pretsch und Frau Petra Schulz danke ich für ihre Hilfsbereitschaft und die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. rer. nat. Ulrich Mayer für die wertvollen Diskussionen, die wissenschaftliche Unterstützung und das freundschaftliche Miteinander. Ohne seine Hilfe wäre ein erfolgreicher Abschluss der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei Adil Benjamin Chaoui, Theresa Kuglin und Elena Scolnaia, die mir Rückhalt gegeben haben. Außerdem gilt mein Dank Annika Lübbers und Phil Layer, die mich immer wieder inspirieren. In besonderer Weise möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken. Sie haben mir diesen beruflichen Werdegang durch ihren liebevollen Beistand in jeder Hinsicht überhaupt erst ermöglicht. Sie gaben mir stets Kraft und Rückhalt. Mein besonderer Dank gilt meiner Schwester: Léna, für die Stärke die Du in jungen Jahren bewiesen hast widme ich Dir diese Arbeit.

Pia Jacobi

Stuttgart, 2019

Kurzfassung

Durch die kürzeren Entwicklungszyklen und die steigende Variantenvielfalt steht die Prozessauslegung in der Automobilindustrie unter einem hohen Zeitdruck. Die heute übliche versuchsbasierte Auslegung und Absicherung von Prozessen ist dabei nicht immer zielführend, da die Verfügbarkeit der benötigten Komponenten nicht immer gegeben ist und die Übertragbarkeit der ermittelten Prozessparameter auf die spätere Großserienfertigung nicht garantiert wird. Deshalb kommen zunehmend simulationsbasierte Verfahren zum Einsatz.

Eine Herausforderung in der zerspanenden Großserienfertigung ist das Vermeiden von qualitätsmindernden Schwingungen. Die Basis für die Untersuchungen zur Prozessstabilität bilden in dieser Dissertation simulativ bestimmte Stabilitätskarten, die in Abhängigkeit von den Prozessparametern Drehzahl und Zustellung die stabilen und ratternden Bereiche beschreiben. Das für die Simulation der Fräsprozesse eingesetzte Programm ist eine an der Technischen Universität Dortmund entwickelte geometrisch-physikalische Prozesssimulation. Die Simulation bestimmt die Zerspankräfte und die dadurch angeregten Werkzeugbewegungen als Basis für eine Stabilitätsberechnung des betrachteten Prozesses.

Für die Simulation werden verschiedene Eingangsdaten benötigt. Einige dieser Daten liegen vor (z.B. die Werkzeuggeometrie), andere lassen sich mit kommerziellen Simulationsprogrammen ermitteln (z.B. die Trajektorie des Werkzeugs). Experimentell sehr aufwendig und simulativ schwierig aufgrund der für einen Maschinennutzer nicht verfügbaren Daten einer Maschine ist die Bestimmung der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge. In dieser Arbeit wird die Methode der Frequenzgangkopplung, mit der die Nachgiebigkeitsfrequenzgänge komplexer Systeme einfach und flexibel ermittelt werden können, analysiert. In der Anwendung wird dabei ein an der Maschine einmalig gemessener Frequenzgang mit dem für jedes zu untersuchende Werkzeug berechneten Frequenzgang mathematisch gekoppelt. Dadurch können die Probleme einer unzureichenden Maschinen- und Werkzeugverfügbarkeit für Messungen während der Prozessauslegung umgangen werden. Die Analyse umfasst dabei die Wahl der richtigen Koppelstelle, die Sensitivitätsbetrachtung der Messungen und Berechnungen sowie die Erweiterung der Methode auf die Frequenzgangkopplung von Bauteil und Vorrichtung. Für die simulative Ermittlung der Stabilitätskarten werden neben den Nachgiebigkeitsfrequenzgängen weitere Eingangsdaten benötigt. Daher wird auch eine Sensitivitätsanalyse bei der Ermittlung der Stabilitätskarten durchgeführt. Die Ergebnisse werden zusammengeführt und darauf basierend eine neuartige Stabilitätskarte für einen anwendungsnahen Fräsprozess erstellt, in der das Wissen und die zugehörige Ungenauigkeit zusammengefasst sind.

Anhand von Stabilitätskarten können Werkzeuge und stationäre Prozesse schnell und einfach bewertet werden. Jedoch schließt die Vorgehensweise die direkte Betrachtung von Prozessen mit variierendem Zeitspanvolumen, wie sie in der automobilen Komponentenfertigung die Regel sind, aus. Daher werden die Anwendungsmöglichkeiten der Stabilitätskarten für den Übergang zwischen zwei definierten (z.B. zwei stabilen) Zuständen analysiert.

Abstract

Due to the shorter development cycles and the increasing number of variants, the process design in the automotive industry is under considerable time pressure. The today's test-based design and validation of processes is not always expedient, since the availability of the required components is not always ensured and the transferability of the determined process parameters to the large-volume production cannot be guaranteed. Therefore, simulation-based methods are increasingly used.

The avoidance of chatter is a challenge in large-volume production. In this dissertation, the basis for the process stability investigations are the stability diagrams calculated with a process simulation, which describes the stable and chattering areas in dependence of the process parameters of the spindle speed and the infeed. The tool used for the simulation of milling processes is a geometric-physical milling simulation developed at the Technical University of Dortmund. The simulation determines the cutting forces and the resulting tool movements as the basis for a stability calculation of the simulated process.

A wide variety of input data is required for the simulation. Some of these data are usually available (e.g. the tool geometry), others can be determined using commercial simulation tools (e.g. the trajectory of the tool). The experimental determination of the frequency response functions is complex and the simulativ determination is difficult due to the data of a machine tool that is not available for a machine user. This work analyses the method of receptance coupling, which can be used to determine easily and flexibly the frequency response functions of complex systems. In the application, a frequency response function measured once on the machine tool is mathematically coupled with the frequency response functions calculated for each tool to be investigated. This allows the problems of insufficient machine tool and tool availability to be avoided during the process design. The analysis includes the selection of the right coupling point, the sensitivity analysis of the measurements and calculations, as well as the extension of the receptance coupling method on the component and the device.

For the simulative determination of the stability diagrams, further input data are required in addition to the frequency response functions. Therefore a sensitivity analysis is also carried out at the procedure for determining the stability diagrams. The results of both analyses are combined and based on this a new stability diagram for an application-oriented milling process is designed, in which the knowledge and the associated inaccuracy are united.

Using stability diagrams, tools and stationary processes can be evaluated quickly and easily. However, the procedure excludes the direct consideration of time-dependent material removal rate as they are the rule in the automotive component manufacturing. Therefore the application possibilities of stability diagrams for the transition between two defined (e.g. two stable) states are analyzed.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Grundlagen und Stand der Forschung | 3 |
| 2.1 | Großserienfertigung von Automobilkomponenten | 3 |
| 2.1.1 | Zerspanung | 3 |
| 2.1.2 | Schwingungen und Rattern bei der Zerspanung | 4 |
| 2.1.3 | Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen | 6 |
| 2.2 | Prozessauslegung für die Zerspanung in der Großserienfertigung | 7 |
| 2.2.1 | Möglichkeiten der Prozessauslegung | 8 |
| 2.2.2 | Strategien zur Sicherstellung ratterfreier Fräsprozesse | 10 |
| 2.2.3 | Simulationsverfahren in der Prozessauslegung | 15 |
| 2.2.4 | Frequenzgangkopplung | 18 |
| 2.3 | Statistische Versuchsplanung | 23 |
| 2.3.1 | Grundlagen | 24 |
| 2.3.2 | Zentral zusammengesetzter Versuchsplan | 24 |
| 2.3.3 | Auswertung | 25 |
| 3 | Ausgangssituation und Zielsetzung | 27 |
| 4 | Versuchsumfeld, Messtechnik und Software | 31 |
| 4.1 | Geometrisch-physikalische Zerspannsimulation | 31 |
| 4.1.1 | Zerspankraftberechnung | 32 |
| 4.1.2 | Oszillatorbasiertes Dynamikmodell | 32 |
| 4.1.3 | Stabilitätskriterium | 33 |
| 4.1.4 | Eingangsdaten | 34 |
| 4.2 | Messtechnische Umgebung | 36 |
| 4.2.1 | Werkzeugmaschinen | 36 |
| 4.2.2 | Werkzeuge | 36 |
| 4.2.3 | Messtechnik | 37 |
| 4.3 | Anwendungsprogramme | 39 |
| 4.3.1 | Validierung der Frequenzgangkopplung | 39 |
| 4.3.2 | Anwendungsprogramm <i>Frequenzgangkoppler</i> | 41 |
| 4.3.3 | Ermittlung von Stabilitätskarten | 41 |
| 5 | Werkzeugseitige Frequenzgangkopplung | 49 |
| 5.1 | Kennzeichen der Frequenzgangkopplung | 49 |
| 5.1.1 | Güte der Vorhersage des Koppelns | 50 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.1.2 | Frequenzverschiebung durch das Koppeln von Substrukturen | 52 |
| 5.2 | Voruntersuchungen zur Sensitivität der Frequenzgänge bezüglich der Ein- gangparameter | 57 |
| 5.2.1 | Wiederholgenauigkeit | 58 |
| 5.2.2 | Reproduzierbarkeit | 61 |
| 5.2.3 | Einfluss des Positionsfehlers | 63 |
| 5.3 | Sensitivitätsanalyse der Frequenzgangkopplung | 64 |
| 5.3.1 | Ermittlung der zu untersuchenden Einflussgrößen | 65 |
| 5.3.2 | Durch Messfehler an den Schneiden verursachte Abweichungen in dem Kopplungsergebnis | 67 |
| 5.3.3 | Vorgehensweise für die Untersuchung der Einflussgrößen | 68 |
| 5.3.4 | Einfluss der Wiederholgenauigkeit | 71 |
| 5.3.5 | Einfluss des Schneidstoffes | 73 |
| 5.3.6 | Einfluss des Werkzeugmodells in der Simulation | 75 |
| 5.3.7 | Auswirkung der Einflussgrößen auf das Kopplungsergebnis | 77 |
| 6 | Frequenzgangkopplung an einem Maschinentisch | 81 |
| 6.1 | Erweiterung des Verfahrens der werkzeugseitigen Frequenzgangkopplung . . . | 81 |
| 6.1.1 | Ermittlung der Kopplungsstelle | 81 |
| 6.1.2 | Ersatzmodell | 83 |
| 6.1.3 | Ermittlung der Kopplungsgleichungen | 88 |
| 6.2 | Ermittlung der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge | 91 |
| 6.2.1 | Messtechnische Bestimmung | 91 |
| 6.2.2 | FEM-basierte Bestimmung | 92 |
| 6.3 | Validierung des Kopplungsergebnisses | 94 |
| 6.3.1 | Vorgehensweise der Kalibrierung | 94 |
| 6.3.2 | Ergebnis | 97 |
| 7 | Sensitivitätsanalyse einer simulationsbasierten Fräsprozessauslegung | 99 |
| 7.1 | Sensitivitätsanalyse der Stabilitätskarten | 99 |
| 7.1.1 | Voruntersuchungen zur Sensitivität der Stabilitätskarte bezüglich des Detaillierungsgrades des Frequenzgangs | 100 |
| 7.1.2 | Ermittlung der Einflussgrößen | 103 |
| 7.1.3 | Stufen der zu untersuchenden Einflussfaktoren | 104 |
| 7.1.4 | Versuchsplanung | 106 |
| 7.1.5 | Ergebnisse | 108 |
| 7.2 | Zusammenstellung der Ergebnisse der gesamten Sensitivitätsanalyse | 113 |
| 7.3 | Simulationsbasierte Auslegung eines anwendungsnahen Fräsprozesses | 115 |
| 7.3.1 | Beschreibung des Anwendungsfalls | 115 |
| 7.3.2 | Ermittlung der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge | 116 |
| 7.3.3 | Ermittlung der spezifischen Schnittkraftparameter | 117 |
| 7.3.4 | Eingangsparameter für die Simulation | 117 |
| 7.3.5 | Auslegung des Fräsprozesses anhand der Stabilitätskarte | 117 |

| | |
|---|------------|
| 8 Untersuchungen der Stabilität von Prozessen mit variierendem Zeitspanvolumen | 121 |
| 8.1 Simulationsumgebung | 121 |
| 8.2 Definition variabler Prozessparameter | 122 |
| 8.2.1 Kurzzeitig erhöhte axiale Schnitttiefe | 122 |
| 8.2.2 Radiale Schnitttiefe | 123 |
| 8.2.3 Vorschubgeschwindigkeit | 123 |
| 8.2.4 Vorschubrichtung | 124 |
| 8.3 Definition des Stabilitätskriteriums | 125 |
| 8.4 Simulation und Auswertung von Prozessen mit variablen Bedingungen | 126 |
| 8.4.1 Kurzzeitig vergrößerte axiale Schnitttiefe | 126 |
| 8.4.2 Radiale Schnitttiefe | 127 |
| 8.4.3 Vorschubgeschwindigkeit | 129 |
| 8.4.4 Vorschubrichtung | 132 |
| 8.5 Erweiterte Untersuchung eines Fräsprozesses | 134 |
| 9 Zusammenfassung und Ausblick | 139 |
| 10 Anhang | 143 |