

Christian Rebelein

**Prognosefähige Simulation von  
Dämpfungseffekten in mechatronischen  
Werkzeugmaschinenstrukturen**



## **Forschungsberichte IWB**

Band 346

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 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.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen  
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2019

ISBN 978-3-8316-4790-3

Printed in Germany  
utzverlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Notation, Symbole und Abkürzungen</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Auslegung von Werkzeugmaschinen . . . . .	5
2.1.1 Simulationsmethoden . . . . .	5
2.1.1.1 Finite-Elemente-Methode . . . . .	5
2.1.1.2 Mehrkörpersysteme . . . . .	7
2.1.1.3 Simulation des mechatronischen Gesamtsystems . . . . .	10
2.1.1.4 Reduktionsverfahren . . . . .	13
2.1.2 Mathematische Beschreibung schwingungsfähiger Systeme . . . . .	16
2.1.2.1 Proportional gedämpfte Systeme . . . . .	17
2.1.2.2 Nicht proportional gedämpfte Systeme . . . . .	20
2.1.2.3 Zustandsraum-Darstellung . . . . .	23
2.1.2.4 Kriterien zum Vergleich dynamischer Systeme . . . . .	24
2.2 Dämpfungsmodellierung bei Werkzeugmaschinen . . . . .	26
2.2.1 Globale Dämpfungsmodellierung . . . . .	28
2.2.2 Lokale Dämpfungsmodellierung . . . . .	30
2.2.2.1 Lineare Dämpfungsmodelle . . . . .	31
2.2.2.2 Nichtlineare Reibungsmodelle . . . . .	33
2.3 Identifikation lokaler Dämpfungsmodelle . . . . .	41
2.3.1 Verfahren zur Identifikation von globalen Dämpfungsgraden . . . . .	42
2.3.1.1 Identifikation bei linearem Systemverhalten . . . . .	42
2.3.1.2 Identifikation bei nichtlinearem Systemverhalten . . . . .	45
2.3.2 Verfahren zur Identifikation von lokalen Dämpfungsmodellen . . . . .	46
2.3.2.1 Isolierte Betrachtung einzelner Dissipationsquellen auf Versuchsständen . . . . .	47
2.3.2.2 Sequenzieller Aufbau . . . . .	51
2.4 Zusammenfassung und Handlungsbedarf . . . . .	54
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>57</b>
3.1 Ziel der Arbeit . . . . .	57
3.2 Vorgehensweise . . . . .	59

<b>4</b>	<b>Dissipationsquellen in der mechatronischen Werkzeugmaschinenstruktur</b>	<b>63</b>
4.1	Allgemeines . . . . .	63
4.2	Strukturdämpfung . . . . .	63
4.2.1	Werkstoffdämpfung . . . . .	63
4.2.2	Fugendämpfung . . . . .	66
4.2.3	Dämpfung von Maschinenelementen . . . . .	67
4.2.3.1	Aufstellelemente . . . . .	67
4.2.3.2	Linearführungen . . . . .	68
4.2.3.3	Kugelgewindetriebe . . . . .	70
4.2.3.4	Wälzlager . . . . .	71
4.2.3.5	Kupplungen . . . . .	73
4.2.3.6	Motoren . . . . .	74
4.2.3.7	Energieführungsketten . . . . .	75
4.3	Antriebsdämpfung . . . . .	76
4.3.1	Regelung . . . . .	76
4.3.2	Verfahrbewegung . . . . .	77
4.4	Schlussbetrachtung . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Lineare Dämpfung</b>	<b>79</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	79
5.2	Verwendete lineare Dämpfungsmodelle . . . . .	79
5.2.1	Hysteretische Dämpfungsmodelle . . . . .	79
5.2.2	Viskoses Feder-Dämpfer-Modell . . . . .	81
5.3	Vorgehen zur Identifikation linearer Dämpfungsmodelle . . . . .	81
5.4	Kupplungen . . . . .	84
5.4.1	Versuchsstand . . . . .	84
5.4.2	Identifikation und Modellierung . . . . .	86
5.4.3	Validierung . . . . .	88
5.5	Motoren . . . . .	90
5.5.1	Versuchsstand . . . . .	91
5.5.2	Identifikation und Modellierung . . . . .	93
5.5.3	Validierung . . . . .	95
5.6	Energieführungsketten . . . . .	98
5.6.1	Versuchsstand . . . . .	99
5.6.2	Identifikation und Modellierung . . . . .	100
5.6.3	Validierung . . . . .	104
5.7	Schlussbetrachtung . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Nichtlineare Reibung</b>	<b>107</b>
6.1	Allgemeines . . . . .	107
6.2	Verwendetes nichtlineares Reibungsmodell . . . . .	108
6.2.1	Modellierung . . . . .	110
6.2.2	Modelleigenschaften . . . . .	116

6.3	Vorgehen zur Identifikation nichtlinearer Reibungsmodelle . . .	117
6.4	Profilschienenführungen . . . . .	122
6.4.1	Versuchsstand . . . . .	122
6.4.2	Validierung . . . . .	123
6.5	Kugelgewindetriebe . . . . .	124
6.5.1	Versuchsstand . . . . .	124
6.5.2	Validierung . . . . .	125
6.6	Motoren . . . . .	125
6.6.1	Versuchsstand . . . . .	126
6.6.2	Validierung . . . . .	127
6.7	Wälzlager . . . . .	128
6.7.1	Versuchsstand . . . . .	128
6.7.2	Validierung . . . . .	129
6.8	Vorschubachsen . . . . .	129
6.8.1	Versuchsstand . . . . .	130
6.8.2	Validierung . . . . .	130
6.9	Schlussbetrachtung . . . . .	133
<b>7</b>	<b>Prognosefähige Modellierung von mechatronischen Werkzeugma-</b>	
	<b>schinenstrukturen</b>	<b>135</b>
7.1	Allgemeines . . . . .	135
7.2	Modellierung . . . . .	135
7.2.1	Massen- und Steifigkeitseigenschaften . . . . .	136
7.2.2	Lineare Dämpfung . . . . .	138
7.2.3	Nichtlineare Reibung . . . . .	140
7.2.4	Regelung . . . . .	140
7.2.5	Bewegung . . . . .	141
7.2.6	Streuungen und Unsicherheiten . . . . .	142
7.3	Sensitivitätsanalyse . . . . .	144
7.3.1	Reduktionsverfahren und erforderlicher Frequenzbe-	
	reich . . . . .	145
7.3.2	Dämpfungsmodellierung . . . . .	150
7.3.2.1	Modellierung der Dämpfung von Eigenmo-	
	den . . . . .	150
7.3.2.2	Modellierung der Dämpfung von Korrekturmo-	
	den . . . . .	153
7.4	Schlussbetrachtung . . . . .	155
<b>8</b>	<b>Anwendung an einem Bearbeitungszentrum</b>	<b>157</b>
8.1	Allgemeines . . . . .	157
8.2	Modellierung . . . . .	158
8.3	Validierung . . . . .	159
8.3.1	Vergleich der Eigenschwingungsformen . . . . .	159
8.3.2	Vergleich der Eigenfrequenzen . . . . .	162

8.3.3	Vergleich der Frequenzgänge . . . . .	163
8.4	Einflussanalysen . . . . .	168
8.4.1	Einfluss der linearen Dämpfung . . . . .	168
8.4.2	Einfluss der nichtlinearen Reibung . . . . .	171
8.4.3	Einfluss der Regelung . . . . .	174
8.4.4	Einfluss der Bewegung . . . . .	181
8.5	Schlussbetrachtung . . . . .	184
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung, Potenzialanalyse und Ausblick</b>	<b>187</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	187
9.2	Potenzialanalyse . . . . .	189
9.2.1	Aufwände . . . . .	189
9.2.1.1	Simulation des dynamischen Verhaltens . . . . .	190
9.2.1.2	Einflussanalysen . . . . .	192
9.2.2	Potenziale . . . . .	193
9.3	Ausblick . . . . .	194
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>197</b>
A.1	Verwendete Modellparameter für das Einmassensystem zur Analyse der Reibungsmodelleigenschaften . . . . .	197
A.1.1	Einmassensystem . . . . .	197
A.1.2	Reibung . . . . .	197
A.2	Verwendete Modellparameter für die Gesamtsystemmodellierung	198
A.2.1	Gusseisen GJS-600 . . . . .	198
A.2.2	Baustahl E295 . . . . .	198
A.2.3	Einsatzstahl 16MnCr5 . . . . .	198
A.2.4	Energieführungskette . . . . .	199
A.2.5	Profilschienenführungen . . . . .	199
A.2.6	Kugelgewindetriebe . . . . .	200
A.2.7	Wälzlager . . . . .	201
A.2.8	Motoren . . . . .	202
A.2.9	Keilschuhe . . . . .	203
A.2.10	Kupplungen . . . . .	204
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>205</b>

# 1 Einleitung

In der industriellen Fertigung nimmt die Werkzeugmaschine als „Mutter aller Maschinen und Vater der Produktion“ eine Schlüsselstellung ein (SCHULZ 2014). Alle Produkte, egal ob es sich um ein Weltraumteleskop, ein Flugzeug, ein Auto, ein Mobiltelefon, eine Spielzeugeisenbahn oder ein künstliches Hüftgelenk handelt, werden mittelbar oder unmittelbar auf einer Werkzeugmaschine gefertigt (VDMA 2005). Ohne die Entwicklung von Werkzeugmaschinen hätten die Industrienationen ihren heutigen Lebensstandard nicht erreicht (BRECHER & WECK 2017). In Deutschland ist der Werkzeugmaschinenbau mit derzeit 68.985 Beschäftigten und einem Produktionswert von 15 Mrd. Euro im Jahr 2016 nach wie vor eine wichtige Industriebranche (VDW 2017a). Auch weltweit nimmt die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie als Exportweltmeister 2016 mit ihren produzierenden Investitionsgütern eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit und die Innovationskraft des produzierenden Gewerbes ein (DISPAN 2017; VDW 2017b).

Um auch in Zukunft die Stellung der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie im globalen Vergleich zu behaupten, muss den wachsenden Anforderungen nach kürzeren Entwicklungszeiten bei gleichzeitiger Produktivitäts- und Genauigkeitssteigerung der Werkzeugmaschinen Genüge getan werden. Dies ist durch das gezielte Auslegen des Maschinenverhaltens mithilfe von Simulationen an einem virtuellen Prototyp in der frühen Phase der Entwicklung möglich (WECK & BRECHER 2006). Dabei kommt dem dynamischen Verhalten einer Werkzeugmaschine eine entscheidende Rolle zu. Durch die Wechselwirkungen zwischen der Maschine und dem Prozess können bei nicht abgestimmten dynamischen Eigenschaften der Maschine unerwünschte Schwingungen auftreten, deren Folgen ein erhöhter Verschleiß, schlechte Oberflächenqualitäten und sogar Beschädigungen an der Werkzeugmaschine sein können (WECK & BRECHER 2006). Damit beschränkt das dynamische Verhalten maßgeblich die Leistungsfähigkeit einer Werkzeugmaschine.

Für die Auslegung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen steht eine Reihe von Simulationsverfahren zur Verfügung. Die entsprechenden Modelle geben jedoch häufig nicht ohne einen vorherigen Abgleich am realen System die dynamischen Eigenschaften mit der erforderlichen Genauigkeit wieder. Eine Ursache hierfür ist in der nicht vorhandenen prognosefähigen Modellierung der Dämpfungseffekte in Werkzeugmaschinen zu finden, was aus mangelnden Kenntnissen zu den lokalen Dämpfungseffekten sowie fehlenden geeigneten Dämpfungsmodellen und -parametern resultiert. Damit stellt die fehlende Prognosefähigkeit bei der Dämpfungsmodellierung das Kernproblem bei der Simulation des dynamischen Verhaltens dar und verhindert das Ausschöpfen der vorhandenen Potenziale bei der Optimierung des Maschinenverhaltens.

Zwar wurden in den vergangenen Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen, um diese Defizite zu überwinden, doch stehen aufgrund von zum Teil unbeachteten Fremddämpfungseinflüssen bei der Identifikation sowie aufgrund der Fokussierung auf vorwiegend lineare Modelle nicht für sämtliche Komponenten einer Werkzeugmaschine prognosefähige Modelle zur Verfügung (FEY 2015; NIEHUES 2016; SCHWARZ 2015). Insbesondere im Bereich der Modellierung der nichtlinearen Reibung in Werkzeugmaschinen sind noch erhebliche Unzulänglichkeiten vorhanden. Dies wirkt sich besonders gravierend aus, da die Reibung einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtdämpfung einer Werkzeugmaschine aufweist (KUNC 2013). Durch das Vereinfachen der nichtlinearen Dämpfungseffekte aus der Reibung mittels linearer Ersatzmodelle können die Berechnungszeiten zwar reduziert werden, doch führt dies zu einer Verminderung der Prognosegenauigkeit der Simulationsmodelle.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das genannte Defizit bei der Simulation des dynamischen Verhaltens zu beheben und eine prognosefähige Simulation der Dämpfungseffekte in mechatronischen Werkzeugmaschinenstrukturen zu erreichen. Damit soll auch der Nachweis erbracht werden, dass auch ohne den Abgleich am realen Gesamtsystem das dynamische Verhalten mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Die Beschränkung auf die mechatronische Werkzeugmaschinenstruktur bedeutet, dass Dämpfungseffekte aus der Einhausung, aus den Anbauteilen sowie aus dem Prozess in den anstehenden Betrachtungen ausgeklammert werden. Zusätzlich wird auf das Berücksichtigen der Hauptspindel verzichtet, da die Dämpfung in diesen Komponenten der Gegenstand der Forschungen von BRECHER ET AL. (2015) und RUDOLPH & IHLENFELDT (2017) ist.

Um eine prognosefähige Simulation für das dynamische Verhalten zu erreichen, werden in dieser Arbeit für eine mechatronische Werkzeugmaschinenstruktur prognosefähige Dämpfungsmodelle für die verschiedenen Dissipationsquellen des Systems identifiziert. Dabei wird die Beschränkung auf ausschließlich lineare Dämpfungsmodelle fallen gelassen, und in Abhängigkeit der Dämpfungseffekte werden sowohl lineare als auch nichtlineare Modelle verwendet. Da insbesondere im Bereich der Identifikation linearer Dämpfungsmodelle eine Vielzahl an Arbeiten existiert und entsprechende Methoden bereitgestellt wurden, liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Identifikation und Modellierung von nichtlinearen Dämpfungseffekten. Diese resultieren vorwiegend aus der Reibung in den Antriebskomponenten der Vorschubachsen. Im Bereich der linearen Dämpfung werden aufbauend auf den bestehenden Methoden für weitere Komponenten geeignete Modelle identifiziert. Für die nichtlineare Reibung in den Antriebskomponenten wird ein geeignetes flexibles Reibungsmodell für eine einfache Parametrierung und effiziente Simulation hergeleitet sowie eine Methode zur Identifikation der benötigten Modellparameter bereitgestellt und auf die Antriebskomponenten von Vorschubachsen angewendet. Durch das Aufheben der Beschränkung auf lineare Dämpfungsmodelle soll die Prognosegenauigkeit der Simulationsmodelle weiter erhöht werden. Gleichzeitig erfordert diese Erweiterung jedoch auch einen geeigneten Modellierungsansatz für eine effiziente



---

Berechnung und genaue Prognose des dynamischen Verhaltens unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussfaktoren: Massen- und Steifigkeitseigenschaften, lineare Dämpfung, nichtlineare Reibung, Regelung und Bewegung. Ein solcher Modellierungsansatz soll in dieser Arbeit entwickelt und anschließend zusammen mit den identifizierten linearen und nichtlinearen Dämpfungsmodellen durch eine beispielhafte Anwendung an einem Standard-Vier-Achs-Bearbeitungszentrum validiert werden. Mit diesem Schritt wird der Nachweis der prognosefähigen Simulation von Dämpfungseffekten in mechatronischen Werkzeugmaschinenstrukturen erbracht. Zusätzlich wird eine Einflussanalyse durchgeführt, um einen Einblick in die Zusammensetzung der Dämpfung einer Werkzeugmaschine zu erhalten und die Relevanz der einzelnen Dissipationsquellen zu bewerten. Hierbei werden neben der linearen Dämpfung und der nichtlinearen Reibung auch die Einflüsse aus der Regelung und der Bewegung analysiert. Das mit dieser Arbeit angestrebte prognosefähige Simulationsmodell sowie die Einflussanalyse stellen den Ausgangspunkt für eine ganzheitliche Optimierung des dynamischen Verhaltens einer Werkzeugmaschine dar.

- 319 **Julian Christoph Sebastian Backhaus:** Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme  
264 Seiten · ISBN 978-3-8316-4570-1
- 320 **Sabine G. Zitzlsberger:** Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten unter besonderer Beachtung der optischen Qualität  
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4573-2
- 321 **Christian Thiemann:** Methode zur Konfiguration automatisierter thermografischer Prüfsysteme  
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4574-9
- 322 **Markus Westermeier:** Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen  
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4586-2
- 323 **Thorsten Klein:** Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau  
284 Seiten · ISBN 978-3-8316-4598-5
- 324 **Markus Wiedemann:** Methodik zur auslastungsorientierten Angebotsterminierung für hochvariante Produkte mit kundenindividuellen Leistungsanteilen  
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-4599-2
- 325 **Harald Krauss:** Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung  
304 Seiten · ISBN 978-3-8316-4628-9
- 326 **Stefan Krobi:** Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase der Maschinen- und Anlagenentwicklung  
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4636-4
- 327 **Andreas Roth:** Modellierung des Rührerschweißens unter besonderer Berücksichtigung der Spalttoleranz  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4639-5
- 328 **Philipp Benjamin Michaeli:** Methodik zur Entwicklung von Produktionsstrategien am Beispiel der Triebwerksindustrie  
288 Seiten · ISBN 978-3-8316-4642-5
- 329 **Michael Richard Niehues:** Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung  
314 Seiten · ISBN 978-3-8316-4650-0
- 330 **Johannes Stock:** Remote-Laserstrahltrennen von kohlenstoffseeserverstärktem Kunststoff  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4662-3
- 331 **Andreas Fabian Hees:** System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme  
218 Seiten · ISBN 978-3-8316-4676-0
- 332 **Fabian Michael Distel:** Methodische Auslegung ultraschallbasierter berührungsloser Handhabungssysteme  
292 Seiten · ISBN 978-3-8316-4679-1
- 333 **Christian Plehn:** A Method for Analyzing the Impact of Changes and their Propagation in Manufacturing Systems  
276 Seiten · ISBN 978-3-8316-4695-1
- 334 **Josef Huber:** Verfahren zur Klassifikation von Ungängen bei der optischen Prüfung von Batterieseparatoren  
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-4593-0
- 335 **Martin Schmid:** Kognitive Prozesssteuerung zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Druckindustrie  
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-4139-0
- 336 **Alexander Beltzki:** Rechnergestützte Minimierung des Verzugs laserstrahlgeschweißter Bauteile  
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-4254-0
- 337 **Georg Albin Josef Götz:** Methode zur Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4332-5
- 338 **Thomas Knoche:** Elektrolytbefüllung prismatischer Lithium-Ionen-Zellen  
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4714-9
- 339 **Johannes Graf:** Ein Vorgehensmodell zur automatisierten und qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge  
262 Seiten · ISBN 978-3-8316-4745-3
- 340 **Georgios Dimitrios Theodosiadi:** Thermal Joining based on Reactive Multilayered Nanofoils  
110 Seiten · ISBN 978-3-8316-4747-7
- 341 **Fabian Karl Keller:** Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung  
218 Seiten · ISBN 978-3-8316-4761-3

## Forschungsberichte IWB ab Band 342

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
utzverlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 342 **Johannes Karl Bernhard Schmalz:** Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen  
236 Seiten · ISBN 978-3-8316-4768-2
- 343 **Christoph Richter:** Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau  
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-4773-6
- 344 **Benedikt Sager:** Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke  
288 Seiten · ISBN 978-3-8316-4780-4
- 345 **Alexander Friedrich Schönmann:** Antizipative Identifikation produktionstechnologischer Substitutionsbedarfe durch Verwendung von Zyklusmodellen  
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4787-3
- 346 **Christian Rebelein:** Prognosefähige Simulation von Dämpfungseffekten in mechatronischen Werkzeugmaschinenstrukturen  
270 Seiten · ISBN 978-3-8316-4790-3