

Diss. ETH Nr. 10113

BOHRSTANGENDYNAMIK

Faserverstärkte Materialien und Beschichtungen
im Vergleich zu Hilfsmassensystemen

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH**

vorgelegt von

FRIEDRICH KUSTER

dipl. Masch.-Ing. ETH

geboren am 1. Februar 1955

von Eschenbach SG

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. G. Schweitzer, Referent

Prof. Dr. J. Dual, Korreferent

Zürich 1993

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinenbau und Fertigungstechnik (IWF) der ETH Zürich. Dem ehemaligen Leiter, Herrn Prof. E. Matthias ist es gelungen, mich für diese interessante und weitgefächerte Arbeit zu begeistern.

Nach seinem plötzlichen Hinschied, in einer schwierigen Übergangsphase des Instituts, hat sich Prof. Dr. G. Schweitzer vom Institut für Robotik spontan bereit erklärt, die Betreuung dieser Arbeit als Doktorvater zu übernehmen. Ihm möchte ich ganz besonders danken, für seine ausserordentlich grosszügige, fachlich kompetente Unterstützung sowie der Aufmunterung zum Abschluss der begonnen Arbeit.

Zu ganz besonderem Dank bin ich auch Herrn Prof. Dr. J. Dual vom Institut für Mechanik für seine fachliche Unterstützung und für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit verpflichtet. Seine kritischen Bemerkungen und Anregungen, sowie seine jederzeitige Diskussionsbereitschaft haben wesentlich zur Ausgewogenheit der Arbeit beigetragen.

Dem Leiter des Instituts während der Vakanzzeit, Herrn Prof. F. Huber danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen. Den beiden neuen Professoren des IWF, Herrn Prof. M. Engeli für sein stets offenes Ohr bei mathematischen Problemen und dem neuen Institutsleiter, Herrn Prof. F. Rehsteiner, für sein Interesse und die Möglichkeit, die Arbeit gewissenhaft abschliessen zu können.

Meinen heutigen und ehemaligen Arbeitskollegen und Kolleginnen, Dipl. Ing. H.P. Gysin, Dipl. Ing. A. Frachebourg, Dipl. Ing. D. Leuenberger, Dipl. Ing. W. Hundt, Dipl. Ing. W. Schröder, sowie Dr. P.E. Gygax, Dr. W. Looser und Dr. J.P. Tschudi, mit denen ich in einfachen und schwierigen Aufgaben zusammenarbeiten durfte, sei für die vielen interessanten und anregenden Diskussionen herzlich gedankt. In diesen eingeschlossen sind auch Herrn E. Bolli und Herrn Dipl. Ing. J. Götz und deren Mannschaft für die überdurchschnittliche Qualität der Betreuung bei meinen unzähligen Fragen und Versuchen in mechanischen, respektive messtechnischen Belangen.

Nicht zuletzt gilt mein Dank der Firma Stellram SA Nyon für die fachliche und materielle Unterstützung während meinen praktischen Versuchen.

F. Kuster

KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Dynamik von Bohrstangen oder Innendrehstäben. Erfahrungsgemäss führen konventionelle Bohrstangen zu Stabilitätsproblemen des Bearbeitungsprozesses, wenn das Verhältnis von freier Länge zu Bohrstangendurchmesser L/D grosse Werte annimmt. Eine bekannte Lösung, die Dynamik dieser Bohrwerkzeuge weiter zu verbessern, beruht auf Hilfsmassensystemen. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie immer auf das mechanische System Werkzeug-Maschine-Werkstück abgestimmt werden müssen, und sie sind deshalb sehr schwer automatisierbar. Die Zielsetzung dieser Arbeit war es nun, die Dynamik von Bohrstangen dahingehend zu untersuchen, wie mit konstruktiven Ansätzen an der Bohrstange selbst und unter optimaler Ausnützung der Eigenschaften moderner Werkstoffe, eine dynamisch stabilere, universelle Bohrstange zu gestalten ist.

Dazu konnte als erstes in der Absorptionsleistung bei der ersten Biege-eigenfrequenz eine gute Beurteilungsgrösse für die Prozessstabilität gefunden werden, die bei konventionellen Bohrstangen gut mit gemessenen kritischen L/D -Verhältnissen korreliert.

Zylindrische Standardbohrstangen kommen in ihrer Geometrie biege-optimalen Bohrstangen, gegeben durch ein Rohr mit einem Innendurchmesser des $\sqrt{0.2}$ -fachen Aussendurchmessers, sehr nahe. Längs der Bohrstangenachse sollten verschiedene Materialien gestaffelt werden. Insbesondere ist bei der Einspannung ein steifes und am freien Ende bei der Wendeplattenaufnahme ein leichtes Material zu verwenden.

Diese Forderung nach einem leichten Material führt auch zur Überprüfung faserverstärkter Werkstoffe. Um die in der Absorptionsleistung enthaltene Dämpfung mitberücksichtigen zu können, musste bei der Modellierung mit Finiten Elementen auf komplexe Steifigkeiten übergegangen werden. Mit diesem Ansatz hat sich gezeigt, dass auch bei anisotropen Werkstoffen Dämpfungsgewinne nur zu Lasten von Steifigkeitsverlusten möglich sind. Ein optimales Verhalten bezüglich der als Zielgrösse definierten Absorptionsleistung wurde in einem Verbund aus $\pm 10^\circ$ und $\pm 45^\circ$ gewickelten Kohlefasern gefunden.

Als weiterer Ansatz zur Verbesserung des Dämpfungsverhaltens von Bohrstangen wurden Beschichtungen untersucht. Die mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente berechneten Eigenschaften unterschiedlicher Bohrstangenaufbauten konnten im Fall der Torsionsbelastung mit der geschlossenen analytischen Lösung und im Fall der Biegebelastung mit Ergebnissen aus dynamischen Messungen verglichen werden. Die untersuchten Beispiele haben gezeigt, dass mit "constrained" Beschichtungen nur geringe, mit "freien" Beschichtungen aus hoch dämpfenden metallischen Werkstoffen (High Damping METals) jedoch erhebliche Verbesserungen der Dämpfung und damit des dynamischen Verhaltens möglich sind. Leider liegen die mit Beschichtungen realisierbaren Dämpfungen der Bohrstange alleine jedoch unterhalb typischer Strukturdämpfungswerte, die zusätzlich auch noch den Einfluss der Bohrstangeneinspannung und jener der Werkzeugmaschine mitberücksichtigen.

Beim Vergleich der Kennwerte der in dieser Arbeit untersuchten Lösungsansätze mit bekannten Werten von Hilfsmassensystemen muss ganz eindeutig festgestellt werden, dass die hier untersuchten Lösungsansätze herkömmlichen Hilfssystemen bezüglich ihres Dämpfungsverhaltens unterlegen sind. Sowohl die axiale Materialstaffelung, die Berücksichtigung von faserverstärkten Werkstoffen wie auch der Einsatz von Beschichtungen ergaben zwar eine universellere Handhabbarkeit, im dynamischen Strukturverhalten sind sie jedoch Bohrstangen mit eingebautem Hilfsmassendämpfer unterlegen.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the dynamic behaviour of boring bars or inside turning tools. According to common experience, standard boring bars with a high free length-diameter ratio (L/D) tend to instability called chattering. A well known solution to improve the dynamics of boring bars are absorbers. However, this method has the disadvantage, that the absorber has to be adjusted to the mechanical system "tool-machine-workpiece" and therefore it is difficult to automate. The goal of this thesis is now to try to improve the dynamics of boring bars itself in a more universal way by applying fibre reinforced composites and layer techniques.

In a first step the capacity of energy absorption in the first mode of bending vibration has been found as a reliable factor to estimate the cutting stability of boring bars. The comparison with measured critical L/D -ratios showed good agreement.

Standard boring bars are very close to the optimised geometrical design for bending given by cylindrical tubes with an internal to external diameter ratio of $\sqrt{0.2}$. Along the axis of the boring bar different materials should be combined, meaning a stiff material near the fixation and a light material at the free end.

This demand for a light material ended in consideration of fibre reinforced composites. To include damping, the very important factor in characterizing capacity of energy absorption, the modelling in finite elements has been extended to complex stiffnesses. As it is well known from isotropic materials, anisotropic materials with high stiffness show low damping. To satisfy requirements for high damping in both bending and torsion, several UD-layers with winding angles of $\pm 10^\circ$ and $\pm 45^\circ$ must be combined.

Another important method to improve damping capacity is the damping layer technique. Verifying partially the results of finite element calculations, in case of torsion an analytical solution based on fundamental equations of mechanics of continua could be found. The examples in constrained layer technique that were tested showed only poor, the free

layer examples with high damping metals (HIDAMET's) however important improvements in damping behaviour. Unfortunately, the damping that can be achieved by layered boring bars is smaller than typical structural damping values which include the additional influence of fixation and machine tool.

Comparing the results obtained with those of boring bars with absorbers, it is very clear, that absorbers are superior to any solution involving either different materials axially or using fibre reinforced materials and/or damping layers, if only dynamic behaviour is considered. On the other hand, for a practical case the more universal handling must be weighted against these disadvantages.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	I
Abstract	III
1 EINLEITUNG	1
1.1 Probleme von Bearbeitungen mittels Bohrstan- gen	1
1.2 Literaturübersicht	6
1.3 Ziel dieser Arbeit und Abgrenzung gegenüber anderen bekannten Arbeiten	10
1.4 Vorgehensweise	10
2 MODELLIERUNG DER DYNAMIK UND DEFINITION EINER ZIELGRÖSSE	12
2.1 Modellierung der Dynamik von Bohrstan- gen	12
2.2 Zielfunktion aus Energiebetrachtungen	15
2.3 Einfluss struktureller Parameter, Empfindlichkeit	17
2.4 Konstruktionsparameter Dämpfung	19
2.5 Einzelne Dämpfungsanteile bei konventionellen Bohrstan- gen	23
3 EINFLUSSPARAMETER GEOMETRIE	25
3.1 Querschnitteinfluss	25
3.2 Einfluss der Bohrstan- genform (Längsschnitt)	32
4 EINFLUSSPARAMETER MATERIAL	35
4.1 Grundsätzliche Überlegungen zur Materialwahl	35
4.2 Dämpfung metallischer Werkstoffe	39
4.3 Verbundwerkstoffe aus Beton	41

5	FASERVERSTÄRKTE WERKSTOFFE	44
5.1	Berechnungsverfahren für anisotrope faserverstärkte Bohrstan- gen	44
5.1.1	Eigenschaften der unidirektionalen Einzelschicht in den Hauptrichtungen des Materials	45
5.1.2	Eigenschaften der unidirektionalen Einzelschicht in beliebiger Richtung	48
5.1.3	Mehrere Schichten beliebiger Orientierung und Dicke	49
5.1.4	Erweiterung der Berechnungsmethoden zur Berücksichtigung der Werkstoffdämpfung faserverstärkter Strukturen	52
5.2	Erste Anwendung: primär unidirektional, kohlefaserverstärkte Bohrstange	55
5.3	Optimierung des Schichtaufbaus faserverstärkter Bohrstan- gen	59
5.3.1	Einflussparameter Wickelwinkel	60
5.3.2	Einfluss der Schichtanordnungen	68
5.4	Design der bisher besten Bohrstange	76
6	BESCHICHTUNGEN	80
6.1	Berechnungsmethoden für beschichtete Rohre	80
6.1.1	Allgemeine Kontinuumsmechanische Grundlagen für rotationssymmetrische Körper	81
6.1.2	Torsion eines "constrained" Rohres	85
6.1.3	Torsion frei beschichteter Rohre	92
6.1.4	Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente	93
6.2	Überprüfung der Modelle und wichtigste Einflussfaktoren	94
6.2.1	CL-Beschichtungen	94
6.2.2	Freie Beschichtungen	98
6.3	Anwendbarkeit auf Bohrstan- gen	101
6.4	Homogene Füllungen	105

7	HILFSSYSTEME	106
7.1	Hilfsmassendämpfer (passiver Absorber)	106
7.2	Aktive Dämpfer (aktiver Absorber)	110
7.3	Impulsdämpfer	111
8	WEITERE DÄMPFUNGMETHODEN	115
8.1	Reibung in Kontaktstellen	115
8.2	Transportvorgänge in Fugen	118
9	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	120
	ANHANG	128
A	Verschiedene Dämpfungskennwerte und ihr Zusammenhang	129
B	Charakteristische Frequenzen des gedämpften Schwingers	139
C	Kennwerte verschiedener Querschnitte	143
D	Einfluss der Schubverformung infolge Querkraft	146
E	Materialdaten für faserverstärkte Kunststoffe	148
F	Berechnung der Biege- und Torsionssteifigkeiten einer zusammengesetzten Bohrstange	150
G	Materialdaten von betonartigen Verbundwerkstoffen	153
H	Berechnungsansätze zur Bestimmung der Schichteigenschaften eines faserverstärkten Werkstoffes aus den Materialdaten der Grundkomponenten	154
I	Bestimmung der dynamischen Eigenschaften von Bauteilen aus faserverstärkten Werkstoffen mit Hilfe einer FE-Rechnung (Nastran DMAP-Alter Beispiel)	160
J	Materialdaten typischer "constrained" Zwischenschichten	166
K	Auslegung von Impulsdämpfern nach Pinotti	168
	Literatur	170
	Bezeichnungen	178
	Lebenslauf	

1 EINLEITUNG

Im Verlauf der letzten Jahre wurden sehr grosse Anstrengungen zur Automation von Produktionsanlagen unternommen. Moderne Werkzeugmaschinen sind heute mit leistungsfähigen numerischen Steuerungen ausgerüstet, die neben der eigentlichen Werkzeugmaschine auch Werkstückbeschickungs- und Werkzeugwechselsysteme steuern. Verschiedene solcher Werkzeugmaschinen werden vollständig miteinander verkettet, so dass vollautomatische, autonome Produktionsanlagen entstehen. Diese müssen mit möglichst wenig Personal und teilweise in unbemannten Schichten gefahren werden, was extrem hohe Anforderungen an die Betriebs- und Prozesssicherheit stellt. Dasselbe gilt für Werkzeugmaschinen, die von angelerntem Personal bedient werden. Ein Bearbeitungsprozess, der immer wieder zu Problemen führt, ist die Bearbeitung von tiefen Bohrungen mittels Bohrstangen, auch als Ausdrehen bezeichnet.

1.1 Probleme von Bearbeitungen mittels Bohrstangen

Tiefe Bohrungen in guter Oberflächenqualität werden heute entweder mit speziellen Tieflochbohrverfahren, oder wenn vorgebohrt, durch Ausdrehen mit einer Bohrstange, hergestellt. TAB. 1.1 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Verfahren.

	Ausdrehen	Tieflochbohren
max. L/D	4:1	200:1
Maschinen	Drehbank; Bohrwerk Fräsmaschine	Spezialmaschinen spez. Bohrvorrichtung
Flexibilität	gut	schlecht
Prozessstabilität	beschränkt	gut
Schnitt ins Volle	nein	ja
Schnittleistung	mittel	gut

TAB. 1.1 : Ausdrehen mit Bohrstangen und Tieflochbohren

Bei grossen Werten des Verhältnisses von Bohrungstiefe zu Bohrungsdurchmesser ist man oft gezwungen, auf das teurere Tieflochbohrverfahren auszuweichen (THAI /83/, STREICHER /81/, GREUNER /28/, FUSS /25/, ENGELHARD /19/). Enge, tiefe Bohrungen, die mit Bohrstangen hergestellt werden, führen zu Stabilitätsproblemen. Erfahrungsgemäss neigen herkömmliche Bohrstangen zu Instabilität, wenn das Verhältnis von freier Länge zu Bohrstangendurchmesser L/D den kritischen Wert von 3 bis 4 übersteigt.

Um die Problematik der Bearbeitung mit konventionellen Bohrstangen etwas konkreter darzustellen, werden im folgenden die Ergebnisse eigener praktischer Versuche auf einer Drehmaschine vorgestellt. Eine handelsübliche Bohrstange, bestückt mit einer Hartmetallwendeplatte, wurde für das Ausdrehen von Innenbohrungen auf einem 4-fach Werkzeughalter befestigt, während das Werkstück rotierte. Mit zwei verschiedenen Werkzeugen (Wendeplatten mit unterschiedlichen Eckenradien von 0.8 respektive 1.2mm) wurden je zwei charakteristische Schnitte (Schruppen/Schlichten) gefahren. Die TAB. 1.2 zeigt eine Zusammenstellung der Versuchsbedingungen.

Maschine:	Drehmaschine Oerlikon DM2 mit Aufsatzlünette zur Sicherheit und 4-fach Werkzeughalter		
Werkzeug:	Stellram posicut Typ E215V32R mit einem Einstellwinkel $\kappa=97^{\circ}30'$ Durchmesser $D=32\text{mm}$		
Wendeplatten:	ECMM120412G und ECMM120408G mit Eckenwinkel 75° Kantenlänge 12mm Plattendicke 4mm Eckenradius $r_E = 1.2$ respektive 0.8mm		
Schnittdaten:		Schlichten	Schruppen
	Vorschub:	$s_c=0.104 \text{ mm/U}$	$s_c=0.41 \text{ mm/U}$
	Schnittiefe:	$a_p=0.5 \text{ mm}$	$a_p=2 \text{ mm}$
	Schnittgeschw.:	$v_c=100 \text{ m/min}$	$v_c=100 \text{ m/min}$
Werkstück:	CK60 mit Bohrungsdurchmesser : 40-120mm		

TAB. 1.2 : Versuchsbedingungen

