

Verhalten und Optimierung eines direkt angetriebenen Vorschubsystems bei impulsförmiger Belastung

Dem Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur

vorgelegte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Volker Piwek

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß
Prof. Dr.-Ing. Dieter-H. Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Dezember 2006

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Fertigungseinrichtungen
der Universität Bremen
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß

Volker Piwek

**Verhalten und Optimierung eines direkt angetriebenen
Vorschubsystems bei impulsförmiger Belastung**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Bremen, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6148-1

ISSN 1864-578X

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

Vorwort des Herausgebers

Vorschubsystemen kommt bei Auslegung und Betrieb rechnergesteuerter Werkzeugmaschinen eine überragende Bedeutung zu. Die Anforderungen lassen sich charakterisieren durch das Einhalten des vorgegebenen in der Regel programmierten Bewegungsprofils unter Berücksichtigung externer Störeinflüsse.

Wesentliche Kenngrößen, die die Regelgüte beschreiben, sind die statische und dynamische Laststeifigkeit und die erreichbare Kreisverstärkung. Besonders anspruchsvoll ist die Auslegung von Vorschubsystemen für diskontinuierliche Fertigungsprozesse, die zu hohen impulsartigen Störlastungen führen. Ein klassischer Vertreter diskontinuierlicher Fertigungsverfahren ist das Rundkneten.

Rundknetverfahren sind nach DIN 8580 den Freiformschmiedeverfahren zuzuordnen. Hierbei vollzieht sich der Umformvorgang durch eine schnelle Folge impulsförmig auf das Werkstück einwirkender Werkzeugeingriffe, die zu einem quasi-stationären dreidimensionalen Fließvorgang führen.

Das Rundkneten hat aufgrund seiner verfahrenstypischen Vorteile weite Verbreitung vor allem in der Automobil- bzw. Zulieferindustrie gefunden. Wesentliche Vorzüge sind ressourcenschonender Materialeinsatz infolge Längenzunahme, optimierter beanspruchungsgerechter Wandstärkenverlauf, Festigkeitssteigerung durch Kaltverfestigung, Einbringen von Druckeigenspannungen, Möglichkeit der endkonturnahen Formgebung, Herstellung von Profildesigns und hohe Produktivität durch weitgehende Automatisierung. Besonders wirkungsvoll unterstützt das Verfahren die Forderung nach Leichtbaukonstruktionen. Gestaltoptimierte rohrförmige Bauteile ersetzen zum Beispiel bei Antriebswellen und Lenkspindeln entsprechende Massivbauteile.

Stand der Technik bei Vorschubsystemen für Rundknetanlagen sind hydraulische Kolben-/Zylindersysteme, die bei der weitaus größten Zahl der Anlagen als gesteuerte Achsen ausgeführt sind. Einige wenige Anlagen setzen lagegeregelte hydraulische Systeme ein. Diese hydraulischen Vorschubachsen haben sich als geeignet herausgebildet, um die besonderen Anforderungen des Rundknetprozesses mit hoher impulsförmiger Belastung zu realisieren. Als besondere Eigenart der Vorschubzeugung mittels Kolben-/Zylindersystem ist herauszustellen, dass die Vorschubkraft kontinuierlich während des gesamten Prozessablaufs ansteht.

Ausgehend von dieser Problemstellung beim Rundkneten widmet sich die vorliegende Schrift der Aufgabe, Konzepte für auf den Prozess abgestimmte

Vorschubsysteme bei diskontinuierlich ablaufenden Fertigungsverfahren zu entwickeln, deren Potential experimentell zu überprüfen und allgemein Lösungen für eine Weiterentwicklung hochdynamisch betriebener Vorschubsysteme aufzuzeigen.

Besonders interessant in dieser Hinsicht ist der Vorschlag der parallelen Kraftleitungswege, d. h. die Erzeugung der Vorschubbewegung über einen hochdynamisch ausgelegten Antrieb und die Ableitung der Störkräfte über ein separates Sperrsystem. Dieses neuartige Konzept kann zu optimierten ressourcenschonenden Antriebsauslegungen führen.

Vorwort des Autors

Die Überwindung von technisch-physikalischen Widersprüchen ist ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zu neuen innovativen Produkten und Fertigungssystemen. Dies gelingt jedoch nur, wenn die Aufgabe systematisch analysiert und der Wesenskern durch Experimente untersucht und belegt werden kann. Beide Voraussetzungen wurden innerhalb meiner Promotionszeit am Fachgebiet Fertigungseinrichtungen an der Universität Bremen erfüllt. Die in dieser Dissertation dargestellten Lösungskonzepte zur Überwindung des Widerspruchs „Hochdynamisch in der Bewegung und unnachgiebig in Belastungsrichtung“ sind geeignet, bestimmte ausgewählte Vorschubantriebe künftig anders zu gestalten.

Für die ganzheitliche Unterstützung bei der Bearbeitung des Projekts und der Erstellung der Dissertation danke ich meinem Betreuer, Herrn Prof. Bernd Kuhfuß, von ganzem Herzen. Für die Übernahme des Co-Referates bin ich Herrn Prof. Dieter H. Müller ebenso wie Herrn Prof. Christoph Ament sehr dankbar.

Die Abstraktion der Antriebsaufgabe basiert auf einer realen Aufgabenstellung des Industriepartners, der Firma Felss GmbH & CoKG, Königsbach-Stein. Für die Unterstützung und die vertiefenden, angeregten inhaltlichen Diskussionen bedanke ich mich sehr herzlich beim Technischen Leiter Fritz Binhack und Herrn Dipl.-Ing. Philipp Grupp.

Bei der Interpretation und Beurteilung von Phänomenen und bei der Suche nach neuen Lösungen ist die Reflektion der eigenen Gedanken unerlässlich. An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Christian Schenck, Herrn Dipl.-Ing. Frank Lichthorn, Herrn Dipl.-Ing. Fritz Budde, Herrn Dipl.-Ing. Heiko Leopold und Herrn Dipl.-Ing. Ingo Gebauer für die kritischen Diskussionen und Anregungen bedanken.

Für die tatkräftige und treue Unterstützung danke ich meinen ehemaligen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern: Frau Cand.-Ing. Anika Schäfer, Frau Dipl.-Ing. Anette Theiss, Herrn Dipl.-Ing. Daniel Höft und Herrn Dipl.-Ing. Carsten van Vügt.

Für die großartige Unterstützung bei der Anfertigung von Schlifffildern und der messtechnischen Ermittlung der Bauteilgeometrie danke ich Frau Lisa Albers und Herrn Martin Estorf vom Bremer Institut für angewandte Strahltechnik.

Für die geduldige redaktionelle Unterstützung und Durchsicht des Manuskriptes danke ich Frau Susanne Gieffers und Frau Birgit Taeger sowie Herrn Kai Schöneberg.

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	4
2.1	Rundkneten – Verfahren, Bauteil und Maschinen	4
2.2	Vorschubsysteme – Antriebe und Systemkomponenten	10
2.3	Konstruktions- und Entwurfsmethoden	16
3	Ziel der Arbeit	17
3.1	Rundkneten mit direkt angetriebenem Linearvorschub	17
3.2	Maßnahmen zur Erhöhung der Antriebssteifigkeit bei impulsförmigen Lasten	18
4	Theoretische Grundlagen für das Vorschubrundkneten	19
4.1	Knetprozess	19
4.1.1	Knetwerk- und Werkzeugkinematik	19
4.1.2	Kontaktverhältnisse Werkzeug / Werkstück	23
4.1.3	Werkzeug- und Prozesskräfte	26
4.1.4	Phasen des Knetprozesses	29
4.2	Vorschubprozess	31
4.2.1	Vorschubkinematik und Werkzeuggeometrie	31
4.2.2	Maximale Vorschubgeschwindigkeit	33
4.2.3	Trägheits- und Prozesskräfte am Vorschubsystem	34
4.2.4	Geschwindigkeitsgesteuerte Vorschubbewegung	36
4.2.5	Synchronisierte schrittweise Vorschubbewegung	38
5	Versuchsanlage	40
5.1	Auslegung des Vorschubsystems	40
5.1.1	Berechnung der kinematischen Größen des Knetwerks	40
5.1.2	Berechnung der kinetischen Größen des Knetwerks	41
5.1.3	Auswahl des Antriebs	42
5.1.4	Abschätzung der Ausgleichsbewegung	43
5.2	Ausführung der Versuchsanlage	45
5.2.1	Gesamtaufbau der Versuchsanlage	45
5.2.2	Knetwerk und Spannzange	46
5.2.3	Linearvorschubsystem	47
5.2.5	Anlagensteuerung	49
5.3	Messtechnische Einrichtungen zur Erfassung von Prozessgrößen	51
5.3.1	Bewegungsgrößen am Vorschub	51
5.3.2	Umform- und Reaktionskräfte	52
5.3.3	Werkstückbewegung	54
5.3.4	Drehzahl des Knetwerks	56
5.3.5	Prozessdatenerfassung	57
5.4	Signaltechnik zur Synchronisation	58
5.4.1	Erfassung des Werkzeugzustands	60
5.4.2	Aufbereitung der Sensorsignale	62
5.4.3	Zusammenfassung Signalfluss	64

6	Experimentelle Untersuchungen	65
6.1	Versuchsplanung	65
6.1.1	Material und Probenvorbereitung	65
6.1.2	Variation der Einflussgrößen	65
6.2	Analyseverfahren und Auswertung	66
6.2.1	Auswertung von Prozessgrößen	66
6.2.2	Ermittlung und Auswertung der Werkstückgeometrie	71
6.3	Untersuchungen bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit	73
6.3.1	Messungen bei geschwindigkeitsgesteuertem Vorschub	73
6.3.2	Messungen bei synchronisiertem Vorschub	74
6.4	Abstimmung der Synchronisation	75
6.4.1	Synchronisation unter Berücksichtigung von Signallaufzeiten	75
6.4.2	Verhalten beim Rückzug des Werkstücks	77
6.4.3	Mittlere Geschwindigkeit für den synchronisierten Vorschub	78
6.5	Ergebnisse der Prozessdatenmessung	83
6.5.1	Ausweichbewegung	84
6.5.2	Axialkraft	85
6.5.3	Systemsteifigkeit	85
6.5.4	Anzahl der Werkzeughübe	87
6.5.5	Drehzahlabfall am Knetwerk	87
6.6	Ergebnisse der geometrischen Bauteilmessung	88
6.6.1	Durchmesser	88
6.6.2	Rundheit	89
6.6.3	Zylindrizität	90
6.6.4	Stirnseitiger Einzug	91
6.7	Geometrische Einflüsse und Verfahrensfehler	93
6.7.1	Praktische Grenzen der Vorschubgeschwindigkeit	93
6.7.2	Verfahrensgrenze und Bauteilfehler	95
6.7.3	Fehlerbetrachtung und Gültigkeitsbereich	98
7	Steigerung der Antriebs- und Systemsteifigkeit	100
7.1	Konstruktive Lösungen	102
7.1.1	Formschlüssige Rücklaufsperrn	104
7.1.2	Reibschlüssige Rücklaufsperrn	105
7.2	Ausführung eines Funktionsmusters	107
7.3	Wirkungsweise und Einfluss auf die Ausweichbewegung	108
8.	Zusammenfassung und Ausblick	110
9.	Literatur	113

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
a	m/s^2	Beschleunigung
A_A	mm^2	Querschnittsfläche Ausgangsmaterial
A_E	mm^2	Querschnittsfläche im reduzierten Bereich
A_{kal}	mm^2	wirksame Fläche im Kalibrierbereich
a_{kont}	m/s^2	konstante Beschleunigung
A_{red}	mm^2	Wirksame Fläche im Reduzierbereich
a_{sync}	m/s^2	Beschleunigung für den synchronisierten Vorschub
$A_{z,eff}$	mm^2	wirksame Kolbenfläche
$C_{s,l}$	kN/mm	Systemsteifigkeit
D_A	mm	Ausgangsdurchmesser Werkstück (vor der Umformung)
D_E	mm	Enddurchmesser Werkstück (nach der Umformung)
D_m	mm	mittlerer Durchmesser
DMS_1, DMS_2	V	Signale der Dehnungstransmitter 1 und 2
$DMS_{1,2 anl}$	V	analoges Summensignal der Dehnungstransmitter
$DMS_{1,2 dig}$	V	digitalisiertes Summensignal der Dehnungstransmitter
$D_{v,1}$	V	Freigabesignal
d_{zP}	mm	Dicke der Zwischenplatte
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
ED_{syn}	%	Einschaltdauer für den synchronisierten Betrieb
F	N	Kraft
F_a	N	Beschleunigungskraft
$F_{a,l}$	m/s^2	Beschleunigungskraft bezogen auf $F_{Rw,l}$
$F_{a,II}$	m/s^2	Beschleunigungskraft bezogen auf $F_{Rw,II}$
$F_{a,kont}$	m/s^2	erforderliche Beschleunigungskraft (kontinuierlich)
$F_{a,sync}$	m/s^2	erforderliche Beschleunigungskraft (synchronisiert)
$F_{a,T}$	m/s^2	Beschleunigungskraft zur Überwindung der Trägheit
F_{ax}	N	Axialkraft
$F_{ax,max}$	N	maximale Axialkraft
F_{kal}	N	Werkzeugkräfte im Kalibrierbereich
F_{max}	N	Motorspitzenkraft
F_N	N	Motornennkraft
F_r, F_s	N	Reibkraft im Führungssystem
$F_{r,kal}$	N	Reibkraft im Kalibrierbereich
$F_{r,red}$	N	Reibkraft im Reduzierbereich
F_{red}	N	Werkzeugkräfte im Reduzierbereich
$F_{red,ax}$	N	axiale Kraftkomponente im Reduzierbereich
$F_{red,rad}$	N	radiale Kraftkomponente im Reduzierbereich
F_{RW}	N	Rückweiskraft
$F_{Rw,l}$	N	Rückweiskraft (Reduzierbereich)
$F_{Rw,II}$	N	Rückweiskraft (Reduzier- und Kalibrierbereich)
F_s	N	Störkraft (äußere Last)

$F_{T,s}$	N	Trägheitskraft des Schlittens
$F_{umf,ges}$	N	gesamte radiale Umformkraft
F_v	N	Vorschubkraft
g	m/s^2	Fallbeschleunigung
H	mm	Hubhöhe
$h(t)$	mm	Hubhöhe als Funktion der Zeit
HZ	Hz	Hubzahl
I_{max}	A	maximaler Motorstrom
I_N	A	Motornennstrom
K_{fe}	N/mm^2	untere Fließgrenze
K_{fm}	N/mm^2	mittlere Fließgrenze
K_n	-	Maschinenkonstante
L	H	Induktivität
l	mm	Ausgangslänge
L_{kal}	mm	Länge des Kalibrierbereichs
L_{red}	mm	Länge des Reduzierbereichs
L_Z, L_K, L_R	mm^3	Längen der Teilbereiche bei der Grundkörperzerlegung
m	kg	Masse
m_{ges}	A	Gesamtmasse
m_s	kg	Schlittenmasse
$m_{Sz}, m_{hyd}, m_{PT}, m_K$	kg	Komponentenmassen
n	-	Anzahl der Werkzeuge
n_{HA}	min^{-1}	Hauptdrehzahl
n_{zr}	-	Anzahl der Zylinderrollen
OT		oberer Umkehrpunkt
R_a	mm	Innenradius des Außenrings
R_i	mm	Wälzkreisradius der Grundbacken mit den Zylinderrollen
s	mm	Weg
$s(t)$	mm	Weg in Abhängigkeit von der Zeit t
S_H	mm	Eindringtiefe
S_{inkr}	mm	inkrementeller Vorschubweg
$S_{inkr,max}$	mm	maximaler inkrementeller Vorschubweg
S_{Ist}, S_{Soll}	mm	Positions-Ist- und Positions-Sollwert
$S_{max,theo}$	mm	theoretisch maximaler Zustellweg zwischen zwei Hüben
S_R	mm	rückwärtiger Weg
$S_{R,max}$	mm	maximaler rückwärtiger Weg
t	s	Zeit
t_0	ms	Schließzeit der Werkzeuge
t_{Abtast}	ms	Abtastzeit
$t_{Abtast,dig}$	ms	Abtastzeit am Umrichtereingang
t_{Frei}	ms	Freigabezeit
T_H	ms	Periodendauer der Hubfolge
T_K	ms	Kontaktzeit Werkzeug / Werkstück
$T_{K,max}$	ms	maximale Kontaktzeit Werkzeug / Werkstück
$t_{max,Wst}$	mm	maximale Einzugtiefe an der Stirnseite der Proben
$T_{Positionier}$	ms	Positionierzeit

T_{Reaktion}	ms	Reaktionszeit im Umrichter
$T_{\text{Soll-Vorgabe}}$	ms	Zeit für die Lagesollwertvorgabe
t_{RW}	s	Wirkdauer der Rückweiskraft
t_v	ms	Vorschubzeit
$T_{v,\text{kont}}$	s	maximale Zeit für die Vorschubbewegung (kontinuierlich)
$T_{v,\text{sync}}$	s	maximale Zeit für die Vorschubbewegung (synchron)
$T_{\text{Weiterschaltung}}$	ms	Zeit für die Satzweitschaltung
U_q	V	Querspannung
UT		unterer Umkehrpunkt
$v(t)$	m/min	Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit t
V_A	mm ³	Werkstückvolumen vor der Umformung
$v_{a,\text{max}}$	mm/s	maximale Vorschubgeschwindigkeit
$v_{a,\text{max,mittel}}$	mm/s	mittlere Vorschubgeschwindigkeit
V_E	mm ³	Werkstückvolumen nach der Umformung
$v_{\text{einst,sync}}$	mm ²	eingestellte Geschwindigkeit für sync. Vorschubmodus
v_{Grenz}	mm/s	Grenzvorschubgeschwindigkeit
$v_{\text{Ist}}, v_{\text{Soll}}$	Mm/s	Geschwindigkeitsist- und Geschwindigkeitssollwert
$v_{\text{max,mittel,theo}}$	mm/s	maximale theoretische Vorschubgeschwindigkeit
v_{Wst}	m/min	Geschwindigkeit des Werkstücks
v_{Wst}	m/min	Geschwindigkeit der Werkzeuge
V_Z, V_K, V_R	mm ³	Werkstückvolumina der Teilbereiche
ΔD	mm	Durchmesserdifferenz
Δl	mm	Längenänderung
Δn_{PI}	min ⁻¹	Drehzahlschwankung
$\Delta s_{\text{I,max}}$	mm	maximale Positionsabweichung in Phase I
Δs_{III}	mm	Positionsabweichung in Phase III
Δs_{max}	mm	maximale Positionsabweichung
Δt_{PI}	s	Zeit bis zur Ausregelung Drehzahlschwankung
α	°	Reduzierwinkel am Werkzeug
α_s	°	Schließwinkel der Werkzeuge
β_{Trag}	°	Tragwinkel zwischen Werkzeug und Werkstück
ε	-	Dehnung
ε_{F}	-	Formänderung
$\varepsilon_{\text{Rück}}$	-	elastische Rückfederung
μ_{G}	-	Gleitreibungskoeffizient
μ_{H}	-	Haftreibungskoeffizient
μ_{kal}	-	Reibungskoeffizient im Kalibrierbereich
μ_{red}	-	Reibungskoeffizient im Reduzierbereich
$\mu_{\Phi\sigma}$	-	Reibung im Führungssystem
σ_s	N/mm ²	Streckgrenze, Fließgrenze
ω_{Kw}	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit der Knetwelle
ω_{rel}	s ⁻¹	relative Winkelgeschwindigkeit
ω_{RK}	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit des Rollenkäfigs