Untersuchung von Kraftverlusten in der Antriebskinematik von Umformmaschinen

Armin Schleinitz, Henry Kirchner, André Sewohl, Holger Schlegel, Martin Dix
Technische Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP), Professur Produktionssysteme und –prozesse, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz

Servopressen erlauben die Beeinflussung der Antriebskinematik im Werkstückkontakt. Zu berücksichtigen sind dabei die Genauigkeitseigenschaften, welche maßgebend durch Spiele der im Kraftfluss liegenden Komponenten beeinflusst werden und sich daher auf die Kinetik des Stößels auswirken. In dem statisch überbestimmten System entstehen durch Verkippung des Stößels sowie Fertigungs- und Montageungenauigkeiten der Führungen hohe Verspannungen. Folglich werden Teile der Antriebskräfte über zusätzliche Lastpfade in das Maschinengestell abgeleitet. Die Verspannungen führen zu erhöhten Kräften, welche von den Antrieben zusätzlich aufzubringen sind. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen des Führungsspiels bei unterschiedlichen Lastfällen auf die resultierenden Leistungsverluste am Beispiel einer servoexzentrischen Presse untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen Ansätze liefern, um einen sicheren Prozess zu gewährleisten sowie die energetischen Verluste zu beschreiben und zu minimieren.

1. Einleitung

Unter steigenden ökonomischen, technischen, ökologischen und gesellschaftlichen Anforderungen sind Unternehmen gefordert, kundengerechte und qualitativ hochwertige Leistungen zeit- und kosteneffizient zu erbringen. Um dennoch mit einer stetigen Intensivierung des Wettbewerbs bei gleichzeitig steigenden Kundenanforderungen und kürzer werdenden Entwicklungs- und Produktionszeiten Schritt zu halten, stellen Prozess- und Kostenoptimierungen einen Ausweg dar [1]. Dazu sind jedoch tiefgreifende Kenntnisse über Abläufe und Prozesse zwingend notwendig. Aus diesem Spannungsfeld zwischen steigendem gesellschaftlichen sowie politischen Druck, ökologische Aspekte in der Fertigung stärker zu berücksichtigen und erschwerten wirtschaftlichem Umfeld, resultieren eine Vielzahl von Arbeiten, welche eine ressourcenschonende Produktion zum Ziel haben [2].

Im Bereich der Umformtechnik ergeben sich derartige Ansätze durch eine Erweiterung der Umformgrenzen bzw. eine Erhöhung der Prozesssicherheit mittels neuartiger innovativer Fertigungstechnologien und angepassten Regelungskonzepten. Dabei sind auch die Genauigkeitseigenschaften von Pressen zu berücksichtigen. Diese Genauigkeitseigenschaften werden maßgeblich durch Montage- und Fertigungsungenauigkeiten der im Kraftfluss liegenden Bauteile beeinflusst. Insbesondere bei schnellen Lastrichtungswechseln im Presswerk können diese zu Verlagerungen der werkzeugtragenden Flächen führen und damit die erreichbaren Werkstückgenauigkeiten limitieren. Die Führungen in derartigen Systemen haben demnach die Aufgabe, den Stößel in gewissen Grenzen parallel zum Tisch zu halten und Verkippungen zu vermeiden bzw. zu verringern. Infolge dessen werden Teile der Antriebskräfte über zusätzliche Lastpfade als die eigentliche Wirkstelle am Werkzeug in das Gestell abgeleitet (vgl. Abbildung 1). Außerdem treten bei der Montage der Führungen grundsätzlich gewisse Ungenauigkeiten auf, was bei einer konventionellen, indirekten Regelungsstrategie auf Motorgeberebene zwangsläufig zu einer Verkippung des Stößels führt. Zusätzliche, unvermeidbare Montageabweichungen verstärken diesen Effekt weiter. Mit Hilfe der direkten Regelung unter Einsatz von Lineargebern am Ende der kinematischen Kette, dem Stößel selbst, können auch diese Verkippungen ausgeregelt werden. In dem statisch überbestimmten System entstehen dadurch jedoch hohe Verspannungen, welche in Folge der Antriebsregelung zu erhöhten Spindelkräften führen.

In dieser Arbeit sollen deshalb die Auswirkungen des Führungsspiels bei unterschiedlichen Lastfällen auf die

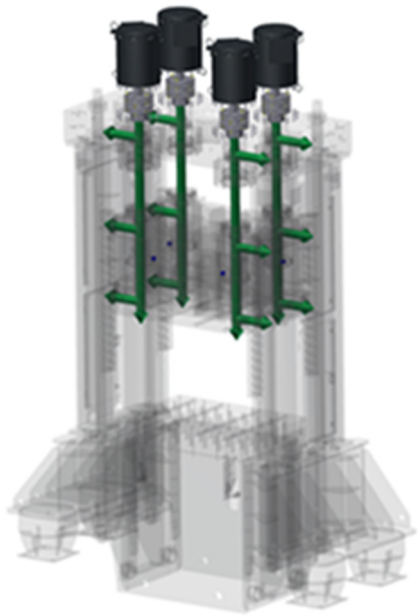

Abbildung 1: Lastpfade am Beispiel einer Servospindelpresse

resultierenden Leistungsverluste am Beispiel einer servoexzentrischen Presse untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen Ansätze liefern, um einerseits einen sicheren Prozess zu gewährleisten und andererseits die energetischen Verluste zu beschreiben und zu minimieren.

2. Stand der Technik

Das Fertigungsverfahren Umformen ordnet sich in die 2. Hauptgruppe der DIN 8580 ein. Darin werden Pressmaschinen nach ihren charakteristischen Kenngrößen in energiegebundene Maschinen (Fallhammer), kraftgebundene Maschinen (Hydraulik- und Servopressen) oder weggebundene Maschinen (Exzenter- und Kniehebelpressen) untergliedert. Auch Kombinationen dieser Funktions-prinzipien sind möglich (Servoexzenterpresse: kraft- und weggebunden) [3]. Eine für Pressen herausragende Kenngröße ist die erzielbare Genauigkeit, welche von der Steifigkeit der Maschine abhängig ist und direkte Auswirkung auf die zu fertigende Bauteilqualität besitzt [4]. Darüber hinaus zählt die Kraft bzw. die Kraftverteilung zu den wichtigsten Prozessparametern bei der Blechumformung. Dieser Kennwert eignet sich besonders für eine Regelung. Er besitzt ebenfalls Einfluss auf die Bauteilqualität und dient als Indikator für die Prozessstabilität [5]. Die Kraftverteilung hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie Werkzeuggeometrie, Werkzeugverschleiß oder Materialparametern. Neben prozessimmanenten Faktoren im Kontaktbereich von Werkstück und Werkzeug, haben auch konstruktive und strukturelle maschinenseitige Randbedingungen sowie die Steuerung und Antriebskomponenten einen nennenswerten Einfluss, insbesondere bei mehrachsigen Maschinen wie Servospindelpressen (SSP). Aufgrund der Elastizität der Systemmaschine / des Werkzeugs können die Position der resultierenden Krafteinleitung auf Werkstückebene und die Kraft-verteilung stark variieren. Das Spiel in den Führungselementen sowie die Steifigkeit im Antriebs-strang der Presse beeinflussen die Verschiebung der werkzeugtragenden Flächen während des Prozesses erheblich. Die erreichbare Werkstückgenauigkeit ist damit limitiert.

Aus der beschriebenen Problemstellung konnten bereits Ergebnisse hinsichtlich der Kraftverteilung, speziell in der Wirkebene erarbeitet werden [6]. Hierbei stellte sich u.a. heraus, dass die Führungselemente einen wesentlichen Einfluss auf den Kraftfluss im Pressensystem haben. Es zeigte sich, dass in Abhängigkeit der Spindelkraft zwischen 4% und 25% der durch die Antriebe aufgebrachten Kräfte nicht in die Wirkebene gelangten. Der dafür verwendete Versuchstand ist in seiner Nennkraft jedoch begrenzt. Um Rückschlüsse für Pressen mit größeren Nennkräften zu erhalten, erfolgten die aktuellen Versuche an einer Servoexzenterpresse am Fraunhofer IWU Chemnitz. Diese Presse zeichnet sich besonders durch die individuelle Einstellbarkeit der Rollenführungselemente am Stößel aus (vgl. Abbildung 2).

Der Fokus bei der Einrichtung eines Pressensystems und der damit verbundenen Einstellung des Führungsspiels zwischen Stößel und Führung wird in aller Regel auf die Genauigkeitsabweichung gelegt. Dies ist gleichbedeutend mit der Verhinderung/Minderung der Verkippung zwischen Stößel und Tisch. Im Allgemeinen wird deshalb ein möglichst kleines Führungsspiel empfohlen [4], [7], [8].

Darüber hinaus erzwingt eine außermittige Belastung ebenfalls eine Kippung zwischen Tisch und Stößel [9]. Diese horizontale Verlagerung zur Arbeitsrichtung (Versatz) besitzt hohe Relevanz auf die Genauigkeit einer Presse, dient als Kenngröße und ermittelt sich aus dem Abstand der Mittelsenkrechten des Stößels gegenüber der Mittelsenkrechten des Tisches und sollte in halber Distanz zwischen der Tischaufspannfläche und der Stößelfläche gemessen werden. Dieser Effekt ist unabhängig von der Gestellbauart.

Die aus der Verkippung resultierende Verlagerung und entstehende Verspannungen führen zu enormen Belastungen der Führungen [10], [11]. Um diese Verspannungen zu überwinden, erscheint es plausibel, dass auch erhöhte Antriebskräfte benötigt werden. Deshalb wird die Nennkraft F_n beispielsweise bei der Auslegung von Hochleistungsstanzautomaten stets höher gewählt, als die notwendige Stanzkraft F_S (kN) bzw. F_{dyn} (kN) [12].

3. Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Untersuchungen wurde eine Servoexzenterpresse des IWU-Chemnitz mit einer Nennkraft von 1000kN verwendet, die einen Arbeitsweg (Hub) von 250mm besitzt. Deren grundlegender Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Der linke Antrieb ist hinsichtlich der Regelung der Maschine als Master definiert. Der rechte Antrieb folgt diesem als Slave (motorgeberseitige Lagekoppelung). Darüber hinaus besitzt die Anlage ein nicht in der Zeichnung abgebildetes direktes Wegmesssystem zur Kontrolle der Verkippung des Stößels. Außerdem sind am Übergang der beiden Pleuel zum Stößel jeweils sechs Kraftmesssensoren (Dehnmessstreifen) verbaut. Diese DMS arbeiten im Verbund und ergeben die Gesamtkraft je Pleuel.

An dieser Presse sind 16 Rollenführungselemente, insbesondere die einzelnen Führungsrollen am Stößel, individuell einstellbar. Diese am Stößel montierten Führungselemente besitzen in X-Z-Ebene drei und in Y-Z-Ebene zwei Führungsrollen, welche durch exzentrische Führungsrollenaufnahmen individuell eingestellt werden können (vgl. Abbildung 2 mitte).

Die Durchführung der Messungen erfolgte an drei unterschiedlichen Positionen P1, P2 und P3 (vgl. Abbildung 2 rechts). Hierzu wurden jeweils mehrere Durchläufe als Einzelhub realisiert. Außerdem wurde die Stößelgeschwindigkeit in vier Stufen (4, 8, 16 und 32 Hübe/min) gestaffelt.

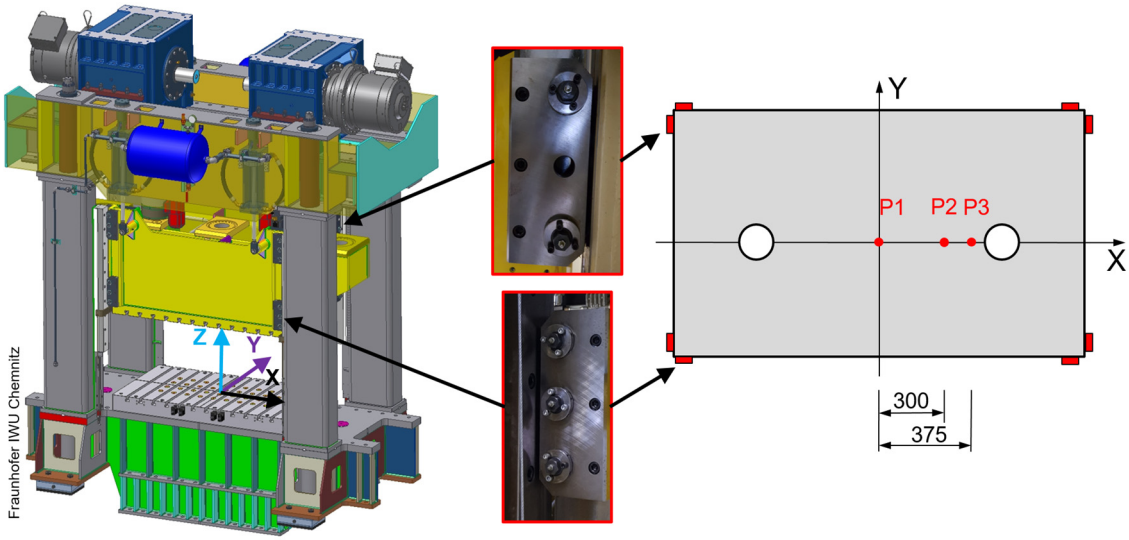

Abbildung 2: links: CAD-Modell einer Servoexzenterpresse; mitte: Ausführung der Führungselemente am Stößel; rechts: Position der Belastungsfälle in der Stößeldraufsicht

Um nun die Auswirkungen des Führungsspiels auf die Kraftverluste zu untersuchen, wurden zunächst die Führungsrollen mit einem Anzugsmoment von 30Nm an die Führungsschienen angestellt und somit **spielfrei** vorgespannt. Im zweiten Versuchsdurchlauf erfolgte die gleiche Vorgehensweise, jedoch mit dem Unterschied, dass zwischen den Führungsrollen und den Führungsschienen ein Abstand von 0,1mm eingestellt wurde. Dies wurde unter Zuhilfenahme entsprechender Stahllehren und gleichem Spannmoment arretiert. Die Ergebnisse dieses zweiten Versuchsdurchlaufes sind im Folgenden mit **„Zehntel“** bezeichnet.

Um die Kraftverluste in den Führungselementen untersuchen zu können, wurden die zeitgleich aufgenommenen Ergebnisse aus zwei Messsystemen miteinander verglichen. Die Kraftmessung innerhalb des Kraftflusses der Presse erfolgte am Übergang vom Pleuel zum Stößel mit den beschriebenen 12 DMS und wurde von dem Engineeringtool SimotionScout® aufgezeichnet. Die Messung in der Werkzeugebene erfolgte mit einer DMS-Kraftmessdose (KMD). Diese besitzt eine Nennkraft von 2000kN, was der doppelten Pressennennkraft entspricht. Um die notwendige Gegenkraft erzeugen zu können und Beschädigung der Presse entgegenzuwirken wurden elastische Kunststoffplatten zwischen Stößel und KMD positioniert.

Die Daten wurden für die Auswertung zeitlich synchronisiert und verglichen. Außerdem wurde der Einfluss des Rauschens durch mehrere Messungen begrenzt.

4. Ergebnisse

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Messungen aufgeführt. Hierbei handelt es sich um die gemittelten, maximalen Kraftwerte in kN, welche unter den entsprechenden Einstellungen gemessen wurden.

Sie zeigen zum einen, dass ein signifikanter Teil der aufgebrachten Antriebskräfte über die Führungen des Stößels in das Maschinengestell abgeleitet werden. Dies wird ersichtlich, da die Werte am Stößel (Scout) über denen in der Werkzeugebene (KMD) liegen, unabhängig von der Führungseinstellung.

Tabelle 1: Messergebnisse der maximalen und gemittelten Kraftwerte in kN

Stößelgeschwindigkeit		mittig		r_300		r_375	
Hübe/min		spielfrei	Zehntel	spielfrei	Zehntel	spielfrei	Zehntel
4	KMD	163,52	164,25	164,11	148,13	173,06	160,32
	Scout	167,71	166,76	167,70	149,97	177,75	162,87
8	KMD	165,06	163,22	165,02	151,57	169,99	161,84
	Scout	170,52	168,93	170,60	155,41	176,98	166,16
16	KMD	166,08	164,66	165,90	155,79	173,79	163,54
	Scout	172,55	169,14	172,40	160,34	181,51	167,64
32	KMD	168,88	167,85	168,88	163,14	178,35	171,55
	Scout	170,36	166,59	173,72	163,18	181,48	170,70

Bei der **spielfreien Einstellung** liegen die Kraft-verluste zwischen 2% bis 4,5%. Insbesondere bei einer hohen Hubzahl (16 Hübe/min) steigen die Kraftverluste deutlich an. Dass diese Unterschiede bei 32 Hüben/min geringer sind, ist mit der Mess-rate der Kraftmessdose zu erklären, welche bei 200Hz liegt. Dadurch ist es möglich, dass die Spitzenwerte nicht ausreichend genau detektiert wurden. Außerdem zeigt sich, dass im exzentrischen Lastfall die Kraftverluste höher sind als im zentrischen. Dies deutet darauf hin, dass mit steigender exzentrischer Belastung die Kraftverluste steigen.

Bei der Versuchsdurchführung mit dem durch die Lehren eingestellten Führungsspiel von 0,1mm („**Zehntel**") liegen die Stößelkräfte ebenfalls höher, als die der Kraftmessdose. Jedoch nur zwischen 1,5% und 3%. Auch hier lassen die Daten der Messung mit der Geschwindigkeit von 32 Hüben/min auf eine unzureichende Messfrequenz der Kraftmessdose schließen. Es ist überdies ersichtlich, dass auch bei exzentrischen Lastfällen die Kraftverluste in der gleichen Größenordnung im Vergleich zum zentrischen Lastfall bleiben.

Nun werden die Kraftverluste zwischen „spielfrei" und „Scout" mit „Zehntel" und „KMD" verglichen. Im zentrischen Lastfall weisen die Messdaten eine Abweichung zwischen 0,5% und 2,2% auf, wobei hier die höchsten Abweichungen bei hohen Hubzahlen auftreten. Diese Kraftverluste sind entsprechend als relativ gering zu bewerten. In den untersuchten exzentrischen Lastfällen werden die Kraftdifferenzen deutlich größer. Sie liegen in diesen Szenarien zwischen 3,5% und 10,6%. Daraus kann geschlossen werden, dass mehr als 10% der durch die Antriebe aufgewendeten Kräfte die Wirkebene nicht erreichen, sofern von einer spielfreien Führungseinstellung ausgegangen wird.

5. Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass die Erkenntnisse aus vorangegangenen Untersuchungen (vgl. [6]) auf Produktionssysteme übertragbar sind. Die Ergebnisse zeigen, dass Spielfreiheit oder gar ein Verspannen der Stößelführung zu vermeidbaren Kraftverlusten führt. In letzter Konsequenz folgern sich vermeidbare Betriebskosten durch den stärkeren Verschleiß der höher beanspruchten unteren Stößelführungselemente und im erhöhten energetischen Einsatz. Dies kommt insbesondere bei exzentrische Lastfällen zum Tragen.

Hieraus lassen sich folgenden Empfehlungen für einen wirtschaftlichen und qualifizierten Prozess ableiten:

- kleines Spiel zwischen den Führungselementen am Stößel und den Führungsleisten ist empfehlenswert und
- ein zentrischer Lastfall innerhalb der Werkzeugebene ist anzustreben.

Um die vorgestellten Ergebnisse weiter zu verfeinern, sollten zukünftig die Motorströme in weitere Analysen einbezogen werden.

Danksagung

Diese Forschung wird gefördert aus Landesmitteln des Freistaats Sachsen durch die "Sächsische Aufbaubank" (SAB) sowie durch die Europäischen Union aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) als Bestandteil des Projektes "Sensorplatte zur großflächigen Erfassung und Verwertung der Kraftverteilung in Pressen".

European Union

Europe funds Saxony.
EFRE
European Regional Development Fund

Quellen

[1] B. Schäppi, M. M. Andreasen, M. Kirchgeorg und F.-J. Radermacher, Handbuch Produktentwicklung, München Wien, Carl Hanser Verlag (2005).

[2] R. Neugebauer ed. all, Ressourceneffizienz: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft & Gesellschaft, Springer-Verlag (2016).

[3] A. Hirsch, Werkzeugmaschinen, 2. Auflage, S. 347ff, Springer, Wiesbaden (2012).

[4] E. Doege und B.-A. Behrens, Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen, Springer Berlin Heidelberg (2007).

[5] S. Rittmeier, Systemunterstütze Umformung, Dissertation, Technische Universität Dresden (2007).

[6] A. Schleinitz, A. Sewohl, H. Schlegel and M. Putz, "Detection of the Force Distribution Close to the Effective Site in Forming Machines for a Force Control," 7th International Conference on Control, S. 216-220, Mechatronics and Automation (ICCMA), Delft, Netherlands (2019).

[7] H. Tschätsch, Praxis Der Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge, 10. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden, Vieweg + Teubner (2010).

[8] Ch. Brecher, Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1: Maschinenarten Und Anwendungsbereiche. 9. Auflage, Berlin, Springer Vieweg (2019).

[9] B. Bender und D. Göhlich. Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen, Springer Berlin Heidelberg (2020).

[10] S. Teichrib, V. Salfeld, R. Krimm, B.-A. Behrens, Untersuchung der Stößelführungsbelastung an Pressen, Verlag Meisenbach GmbH, Bamberg (2013).

[11] M. Ahrens, Ermittlung der Belastungs-kräfte zur Auslegung von Stößelführungen mit Profilschienen, Dissertation, Universität Hannover, IFUM (2009).

[12] M. Kolbe, Spanlose Fertigung Stanzen: Stanzteile - Feinstanzteile - Hochleistungsstanzwerkzeuge - Hochleistungs- und Feinstanzpressen, Wiesbaden, Springer Vieweg (2018).