

# Untersuchung der Eignung von Interpolationsmethoden zur Erstellung energieeffizienter Stößelkinematik von Servopressen

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens, Dr.-Ing. Richard Krimm, M. Sc. Thang Nguyen

Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen,  
An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

nguyen@ifum.uni-hannover.de

*Schlagwörter: Umformmaschinen, Servopressen, Interpolation, Mehrkörpersimulation, Stößelkinematik*

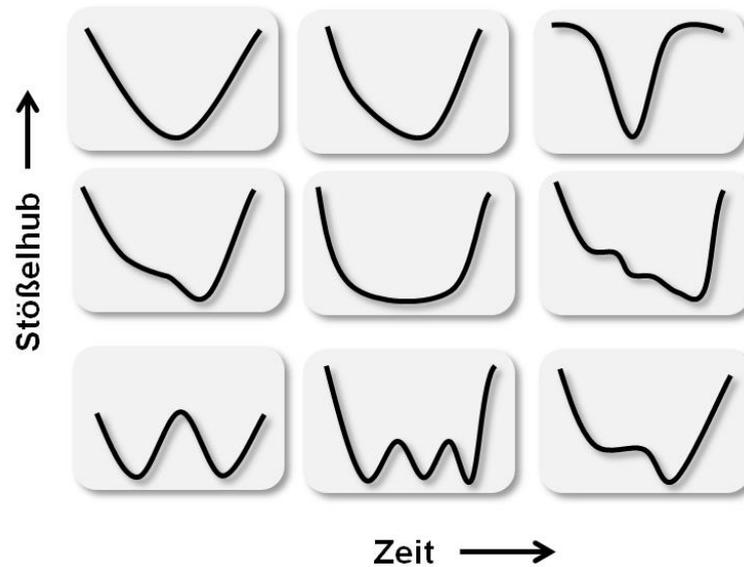
## Kurzfassung:

Die Verwendung von Servomotoren als Pressendirektantrieb eröffnet für Pressenanwender neue Perspektiven hinsichtlich der Erstellung von prozessangepassten Stößelbewegungsprofilen, um damit die Prozessqualität zu erhöhen. Über die Pressensteuerung hat der Bediener die Möglichkeit, individuelle Stützpunkte einzugeben, welche mittels eines bereits hinterlegten Berechnungsansatzes zu einem vollständigen Stößelweg-Zeit-Verlauf interpoliert werden. In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Interpolationsmethoden zur Erstellung von Stößelkinematik auf Basis von vorgegebenen Stützpunkten verwendet und deren Einflüsse auf das elektrische Antriebssystem anhand eines Mehrkörpersimulationsmodells untersucht.

## 1. Einleitung

Servopressen haben sich aufgrund der hohen Dynamik bereits seit langer Zeit in der Umformtechnik etabliert. Bei dieser Pressenart werden leistungsstarke hochpolige Servomotoren als Pressenantrieb verwendet, welche oftmals mit Hilfe geeigneter Getrieben mit der Exzenterwelle verbunden werden. Durch die Kopplung zwischen Antrieb und Exzenterwelle und den Wegfall des trägen Schwungrads kann die Stößelbewegung nahezu beliebig programmiert werden. In Abbildung 1 sind einige beispielhafte Stößelweg-Zeit-Verläufe dargestellt, welche von einer Servopresse ausgeführt werden können. Durch die Erstellung von spezifischen Stößelbewegungsprofilen für verschiedene Umformverfahren kann die Prozessqualität erheblich verbessert werden. Beispielsweise kann die Stößelgeschwindigkeit unmittelbar vor dem Schneidvorgang verringert werden, um den Auftreffstoß zwischen Werkzeug und Blechmaterial zu reduzieren. Nach der Materialtrennung wird der Stößel im Rückhub stark beschleunigt, um eine hohe Hubzahl zu gewährleisten. Beim Tiefziehen kann die prozessangepasste Stößelkinematik ebenfalls zur Steigerung der Umformqualität beitragen. Durch die vertikale Taumelbewegung des Stößels während des Ziehvor-

gangs kann das Blechmaterial besser nachfließen. Infolge dessen können Rissbildungen vermieden und größere Ziehlänge erzielt werden [1].

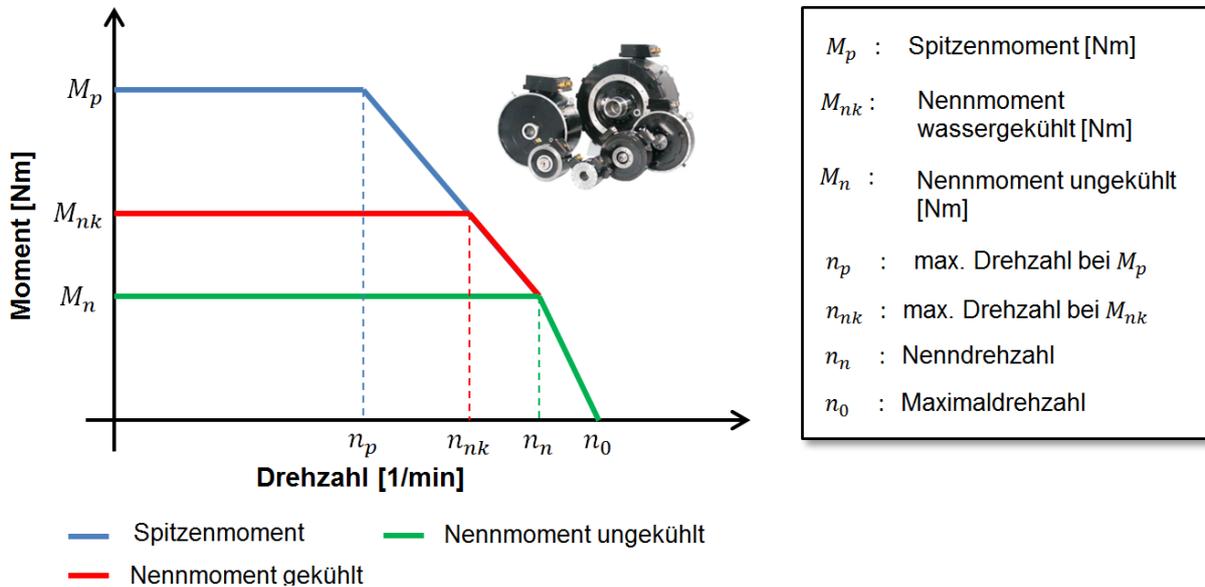


**Abbildung 1:** beispielhafte Stößelweg-Zeit-Verläufe einer Servopresse

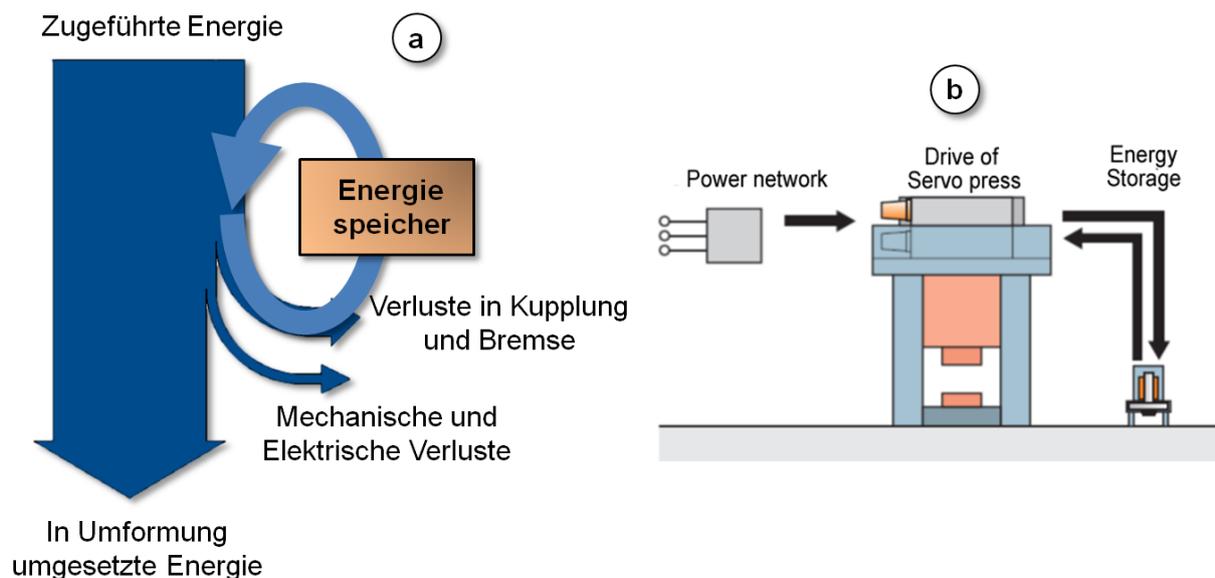
Um die erforderlichen Sollkinematikvorgaben zu verfahren und die Umformkräfte bereitzustellen sind hohe Anforderungen an das elektrische Antriebssystem der Servopresse gestellt. Für den Pressendirektantrieb werden bevorzugt Torquemotoren eingesetzt [2]. Es handelt sich dabei um speziell entwickelte Synchronmaschinen, die aufgrund der relativ hohen Anzahl von Polen hohe und stabile Dynamik aufweisen [3]. Der charakteristische Verlauf der Drehmoment-Drehzahl Kennlinie von Torquemotoren (Abbildung 2) ist für die meisten umformtechnischen Anwendungen vorteilhaft, da das maximale Motormoment bereits bei niedrigen Drehzahlbereichen zur Verfügung steht. Erst beim Überschreiten der Nenndrehzahl nimmt das verfügbare Drehmoment annähernd linear ab, da bei hohen Drehzahlen nicht ausreichend Strom in die Motorwicklungen eingepreßt werden kann. Mit dem Wegfall des bei mechanischen Exzenterpressen erforderlichen Schwungrads ist die Servopresse von der Weggebundenheit losgelöst. Im Gegenzug muss jedoch die nicht mehr verfügbare kinetische Energie des Schwungrads durch die elektrische Energie des Antriebs ersetzt werden. Deshalb ist die Antriebsdimensionierung bei Servopressen häufig das Vielfache der vergleichbaren mechanischen Pressen.

Im Betrieb der Servopressen treten während des Beschleunigungs- und des Umformvorganges häufig hohe Leistungsspitzen auf, welche starke Belastungen für das Stromnetz darstellen. Aus diesem Grund werden Servopressen mit Energiespeichersystemen ausgestattet, die sich bei Bremsvorgängen aufladen und das Netz bei Bedarf entlasten (Abbildung 3). Häufig werden Schwungräder als mechanische oder Kondensatoren als elektrische Energiespeicher eingesetzt. Bei der Kopplung dieser

Systeme mit dem Hauptantrieb der Servopressen können bis zu 60% bzw. 70% der netzseitigen Anschlussleistungen abgedeckt werden [6].



**Abbildung 2:** Drehmoment-Drehzahl Kennlinie von Torquemotoren [4]



**Abbildung 3:** a) Energieverbrauch bei Servopressen, b) Anschluss der Servopresse mit Energiespeicher [5]

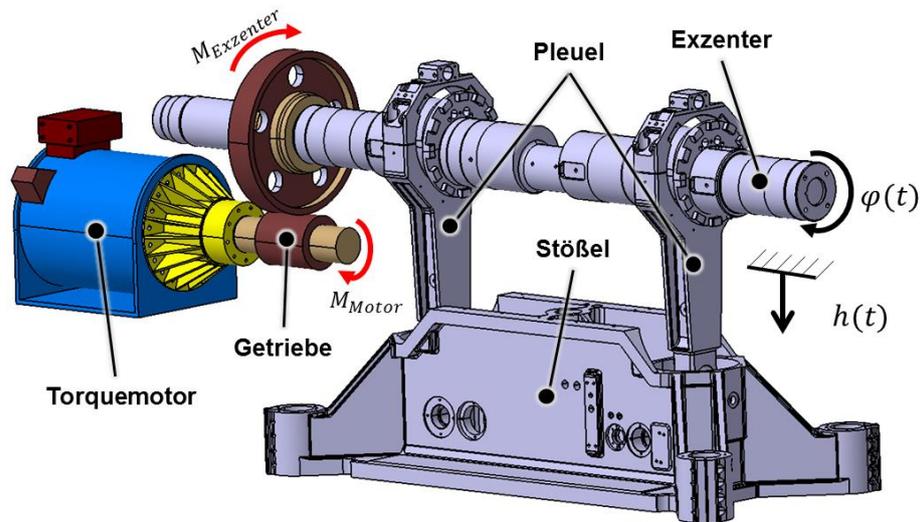
Trotz der Anwendung von Energiespeichern ist das Potential hinsichtlich des energieeffizienten Betriebs nicht vollständig ausgeschöpft, wenn die Eingangskinetik suboptimal ist. Bei Eingabe einer ungünstigen Sollkinematik kann es zu unnötigen Belastungen des Netzes kommen. Der Grund hierfür ist das Übersetzungsverhältnis zwischen der rotierenden Exzenterwelle und dem translatorisch bewegten Stößel, welches veränderlich und vom Exzenterwinkel abhängig ist. Bei ungünstiger Position

der Exzenterwelle lassen sich selbst geringe Beschleunigungen des Stößels nur mit extremen Drehzahländerungen der Exzenterwelle realisieren. Es besteht demnach Forschungsbedarf hinsichtlich der Optimierung der Eingangskinetik, um ungewünschte netzseitige Belastungen zu vermeiden. Daher wurde in Rahmen dieser Arbeit die Eignung verschiedener Interpolationsmethoden zur Erzeugung von energieeffizienten Stößelweg-Zeit-Verläufen auf Basis von vorgegebenen Stützpunkten anhand einer Mehrkörpersimulation untersucht.

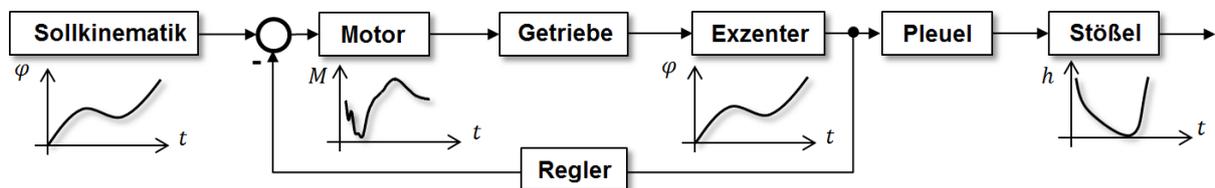
## 2. Erstellung eines Mehrkörpersimulationsmodells

Die Mehrkörpersimulation (MKS) hat sich in der Ingenieurwissenschaft als nützliches Werkzeug erwiesen, um die während des Betriebs dynamisch wirkenden Kräfte und Momente auf die Maschinenkomponente im zeitlichen Verlauf abzubilden. Die mathematischen Grundlagen zur Erstellung der MKS-Modelle haben Newton, Euler, d'Alembert, Lagrange und Hamilton geschaffen [7]. Mit Hilfe der Mehrkörpersimulation kann das dynamische Verhalten von Maschinen bei unterschiedlichen Betriebszuständen vor der eigentlichen Inbetriebnahme relativ kostengünstig untersucht werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit vorgesehenen Untersuchungen wurde der Antriebsstrang einer servoelektrisch angetriebenen Presse mittels des kommerziellen Softwarepakets LMS.Virtual Lab aufgebaut (Abbildung 4).

Über die Definition der Gelenke und Kontaktpunkte werden die einzelnen Komponenten des Antriebsstrangs miteinander verbunden. Es handelt sich dabei um ein Längswellenantriebskonzept, bei dem zwei Pleueln parallel in Längsrichtung der Exzenterwelle angeordnet sind. Mittels der Pleuel wird die rotatorische Bewegung der Exzenterwelle in die translatorische Bewegung des Stößels übersetzt. Über ein Getriebe wird die Exzenterwelle von einem Torquemotor angetrieben. Zur Gewährleistung der Sollkinematik wird ein PID-Regler verwendet, welcher anhand der aktuell vorliegenden Abweichung zwischen Drehwinkelsollwert und Istkinematik ein passendes Drehmomentsignal für den Motor berechnet (Abbildung 5).



**Abbildung 4:** Simulationsmodell des Antriebsstrangs einer Servopresse



**Abbildung 5:** Regelkreis zur Gewährleistung der Sollkinematik

Ausgehend von dem Drehmomentsignal kann der zeitliche Verlauf der Leistung sowie die zur Durchführung der Sollkinematik erforderliche Antriebsenergie pro Hub gemäß der Gleichungen 1.1 bzw. 1.2 berechnet werden.

$$P(t) = M(t) * \omega \quad (1.1)$$

$$E(t) = \int_0^{t_1} P(t) dt = \int_0^{t_1} M(t) * \omega dt \quad (1.2)$$

$E(t)$  : Antriebsenergie

$P(t)$  : Leistung

$M(t)$  : Drehmoment

$\omega$  : Drehwinkelgeschwindigkeit

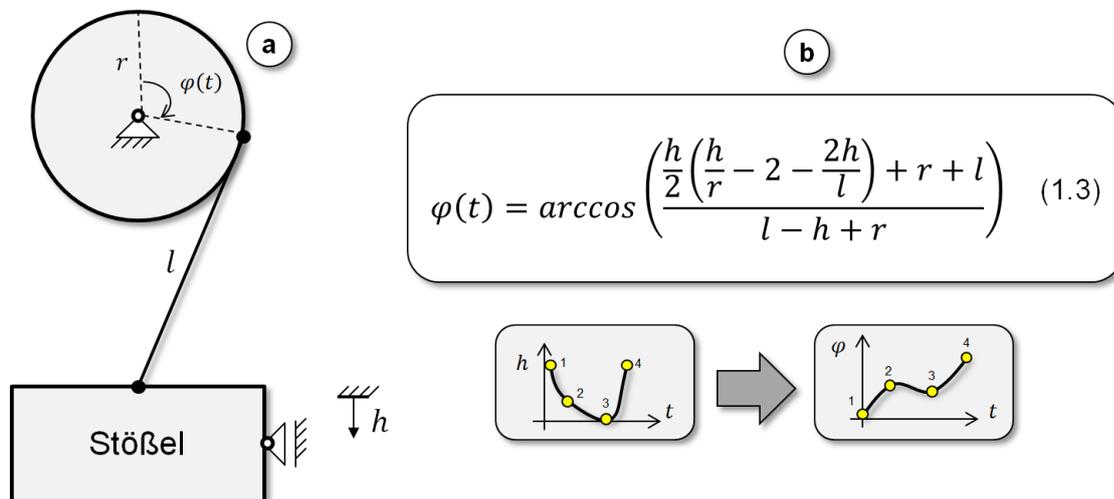
$t_1$  : Ende des Hubes

Die maximal auftretenden Moment- bzw. Leistungsspitzen sowie das zeitliche Verhalten der Antriebsenergie liefern Anhaltspunkte für die Auslegung des elektrischen Antriebssystems bestehend aus Motor, Umrichter und Energiespeicher. Werden diese Spitzenwerte vom Antrieb nicht bereitgestellt, kommt es häufig während des Betriebs, aufgrund der fehlenden Dynamik, zu einer Abweichung von dem vorgegebenen Stößelweg-Zeit-Verlauf, welche unter Umständen die Prozessqualität beeinträchtigt.

### 3. Verwendung unterschiedlicher Interpolationsmethoden zur Erstellung der Stößelweg-Zeit-Verläufe

Anhand des im vorherigen Kapitel vorgestellten Simulationsmodells können die unterschiedlichen Interpolationsmethoden zur Generierung von Stößelweg-Zeit-Verläufen erprobt werden. Über die Pressenbedienoberfläche kann der Bediener bis zu 6 Stützpunkte eingeben, welche mittels eines in der Pressensteuerung hinterlegten Berechnungsansatzes zu einem vollständigen Stößelweg-Zeit-Verlauf interpoliert werden. Für die Berechnung der Stößelbewegungskurve werden mindestens 3 Punkte benötigt: Der Hubanfang, das Erreichen des unteren Totpunkts und das Hubende. Häufig wird ein zusätzlicher Stützpunkt unmittelbar vor dem Auftreffen des Werkzeugs auf das Blechmaterial definiert, um die Stößelgeschwindigkeit vor dem Umformprozess anzupassen.

Aus der vorangegangenen Arbeit vom IFUM [8] geht hervor, dass die Reduktion des Drehmoments bzw. der Leistung an der Antriebswelle einen stetig differenzierbaren Drehwinkelverlauf voraussetzt. Um die Stetigkeitsbedingung zu erfüllen werden die Stützpunkte, welche als Stößelpositionen angegeben sind, in Winkelgrade der Exzenterwelle umgerechnet. In Abbildung 6 ist der mathematische Zusammenhang zwischen Exzenterwinkel und Stößelhub dargestellt. Mittels der Gleichung 1.3 lässt sich jede Stößelposition in Winkelgrad der Exzenterwelle überführen. Anschließend werden diese neu errechneten Stützpunkte zu einem Drehwinkel-Zeit-Verlauf interpoliert.



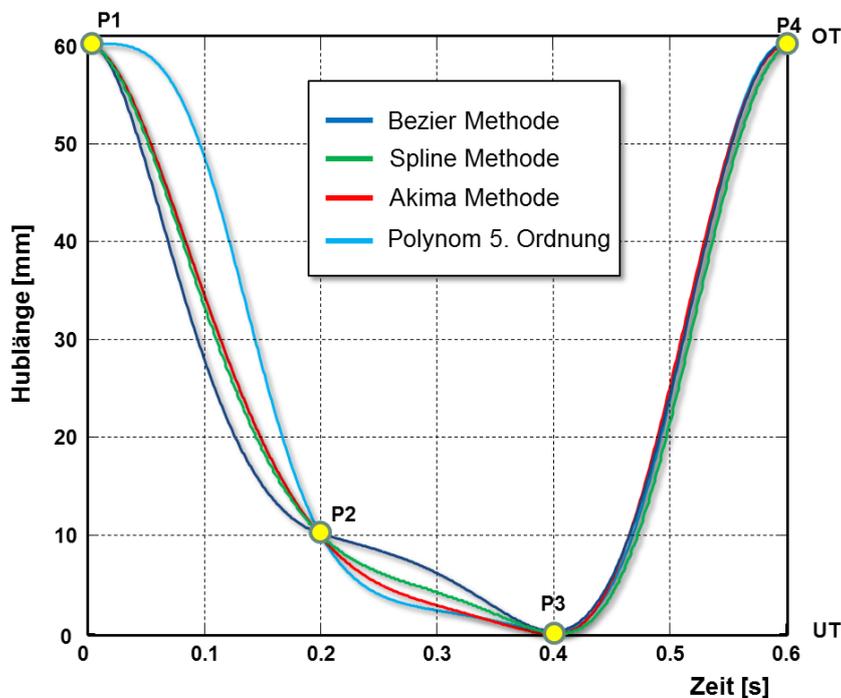
**Abbildung 6:** Zusammenhang zwischen Exzenterdrehwinkel  $\varphi$  und Stößelhub  $h$

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 4 Interpolationsmethoden angewendet:

- Polynom 5. Ordnung [9]
- Akima Methode [10]
- Bezier Methode [11]

- Spline Methode [12]

Aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsansätze und Randbedingungen wurden ausgehend von vier identischen Stützpunkten vier Drehwinkel-Zeit-Verläufe generiert, die als Eingangskinetik für die Mehrkörpersimulation verwendet werden. In Abbildung 7 sind die daraus resultierenden Stößelweg-Zeit-Verläufe aufgetragen.



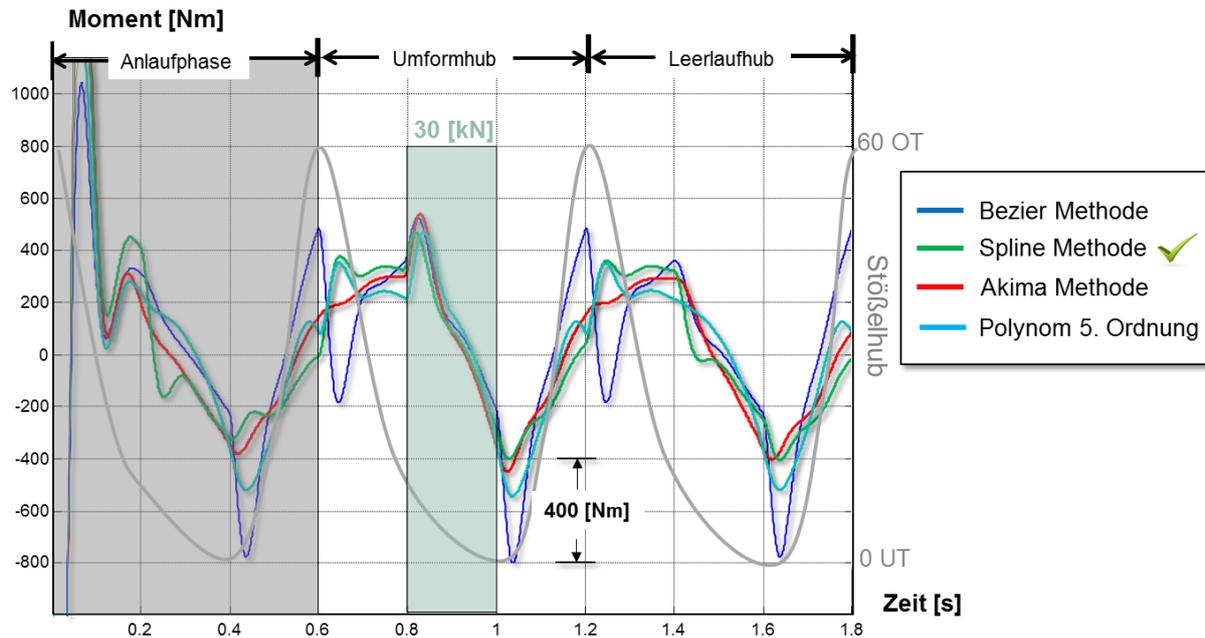
**Abbildung 7:** Unterschiedliche Stößelweg-Zeit-Verläufe

#### 4. Einfluss der Kinematik-Kurven auf das elektrische Antriebssystem

Das elektrische Antriebssystem einer Servopresse muss neben der Bereitstellung der Prozesskraft vor allem ein hohes Beschleunigungsvermögen des Stößels gewährleisten, da das Verfahren der gewünschten Stößelkinematik oft mit hohen Geschwindigkeitsänderungen verbunden ist. Im Falle eines zu klein dimensionierten Motors können die erforderlichen Leistungsspitzen nicht zur Verfügung gestellt werden. Als Folge der fehlenden Dynamik treten Abweichungen zu Sollkurven auf, die gegebenenfalls zur Herstellung von Ausschussprodukten führen. Ist der Motor dagegen zu groß dimensioniert, kann es negativ auf die Energieeffizienz der Servopresse auswirken, da die große Trägheit des Motors mit dem Antriebsstrang gekoppelt ist. Zudem richten sich die Strombeschaffungskosten nach der Höhe der Anschlussleistungen, sodass die Überdimensionierung des Antriebssystems zusätzliche Kosten für den Pressenbetreiber darstellt.

Durch die Anwendung der vier Stößelweg-Zeit Verläufe, welche mit Hilfe der vier oben genannten Interpolationsmethoden erstellt wurden, wird das Antriebssystem unterschiedlich beansprucht. In Abbildung 8 sind die zeitlichen Verläufe des Dreh-

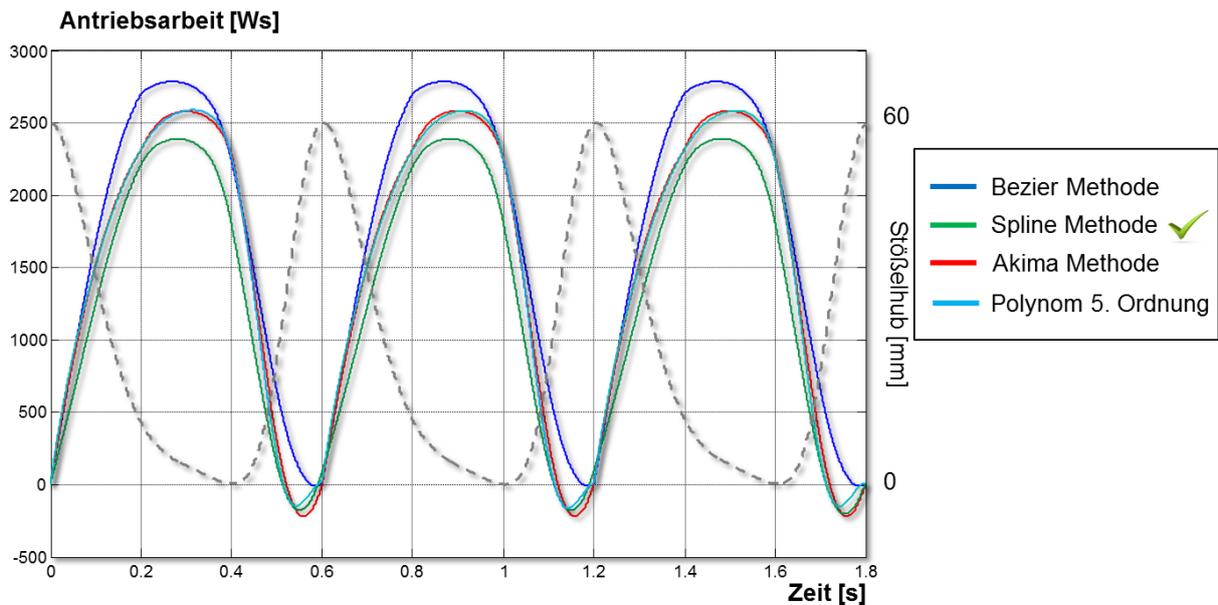
moments zur Ausführung der jeweiligen Stößelkinematik über einen Hubdauer von 0,6 s aufgetragen.



**Abbildung 8:** Zeitlicher Verlauf des Drehmoments bei Hubzahl 60/min

Es ist zu erkennen, dass die größten Momentenspitzen für den Rückhub benötigt werden. Während bei mechanischen Pressen, aufgrund der großen Trägheit des Schwungrads, der Richtungswechsel des Stößels im Rückhub geringe Einflussnahme auf den Drehmomentverlauf hat, treten bei Servopressen bei großen Geschwindigkeitsänderungen des Stößels hohe Moment- bzw. Leistungsspitzen auf. Hinsichtlich der Anwendung von verschiedenen Interpolationsmethoden liegen somit in der Rückhubphase die meisten Optimierungspotentiale vor. Anhand der Ergebnisse aus der Simulation ist es ersichtlich, dass zur Ausführung der Stößelkinematik, welche mittels des Polynoms 5. Ordnung interpoliert wurde, die größte Momentenspitze (ca. 800 Nm) benötigt wird. Durch die Anwendung der Spline-Methode können die Momentenspitzen auf ca. 400 Nm im Rückhub reduziert werden

Neben der motortypischen Kenngröße Drehmoment spielt das zeitliche Verhalten der Antriebsenergie eine elementare Rolle bei der Antriebsdimensionierung von Servopressen. Der maximale Betrag der Antriebsenergie liefert Anhaltspunkte über die Größe des Energiespeichers. Um den Pressenhauptantrieb bei Spitzenlast mit ausreichend elektrischer Energie zu versorgen muss das Energiespeichersystem den maximal errechneten Energiebetrag jederzeit zu Verfügung stellen. In Abbildung 9 sind die zeitlichen Verläufe der Antriebsenergie über drei Stößelhübe aufgetragen.



**Abbildung 9:** Zeitlicher Verlauf der Antriebsenergie bei Hubzahl 60/min

Der Energiebetrag liegt am Anfang und Ende jedes Stößelhubes bei null, da es sich bei der Simulation um ein ideales starres Mehrkörpermodell handelt. Die für jede Hubbewegung zugefügte Antriebsenergie wird beispielsweise nicht in Form elastischer Federarbeiten, Wärme umgewandelt, sondern wird wieder vollständig aus dem System herausgeführt. Hinsichtlich der energetischen Betrachtung liefert die Spline-Methode im Vergleich mit den anderen drei Methoden wieder das beste Ergebnis. Zwischen der Bezier- und der Spline-Methode liegt ein Energiedifferenz von ca. 0,4 kWs.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Eignung unterschiedlicher Interpolationsmethoden zur Generierung der Stößelweg-Zeit-Verläufe ausgehend von definierten Stützpunkten untersucht. Auf Basis eines Simulationsmodells wurden die Anforderungen an das Antriebssystem einer Servopresse unter Verwendung vier Interpolationsmethoden untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit geht hervor, dass für einen energieeffizienten Betrieb von Servopressen die Spline-Methode zur Generierung der Stößelweg-Zeit-Verläufe verwendet werden soll. Aufgrund der Anwendung von Polynomen dritter Ordnung (Spline-Methode) bei der Berechnung können stetige Kinematikkurven mit reduzierten Geschwindigkeitsprofilen generiert werden. Diese Untersuchung ist zunächst auf Servopressen mit längsgeführter Exzenterwelle fokussiert. Da zahlreiche Konzepte von Servopressen auf dem Markt existieren, wären weitere Untersuchungen notwendig, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Antriebskonzepte von Servopressen zu gewährleisten.

## 6. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17954N des Vereins Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken der AiF und dem VDW für die Förderung. Weiterer Dank gilt den Mitgliedsunternehmen des projektbegleitenden Ausschusses und Ihren Vertretern für die Unterstützung des Projektes und die gute Zusammenarbeit.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Osakada, K. ; Mori, K. ; Altan, T. ; Groche, P. : Mechanical servo press technology for metal forming, Elsevier Editorial System for CIRP Annals- Manufacturing Technology Manuscript Draft, Vol. 60/2 2011
- [2] Schuler Pressen GmbH: Servopressen in Motorblockweise Kompakt, flexibel und wirtschaftlich ServoDirekt Technologie, Broschüre 2012
- [3] Torquetec GmbH: Torquemotoren direct drive technology, Katalog
- [4] Fischer Elektromotoren GmbH: Torquemotoren genutzt und eisenbehaftet, Technische Dokumentation, S.8, 2010
- [5] Boden,J.: Entwicklung bei Servopressen in der Massivumformung, Schuler Pressen GmbH, Hannover Messe, S. 16, 2013
- [6] König, M.: Energy-Efficient Drive Solutions Increase Productivity, Münchener Kolloquium- Innovation für die Produktion, Utz Verlag, 2008
- [7] Rill, G.; Schaeffer, T. : Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN-Nr. 978-3-8348-0888-2, 2010
- [8] Behrens, B.-A.; Krimm, R.; Wager, C.: Reduktion der Antriebsleistung von Servopressen infolge einer virtuell optimierten Stößelkinematik, Tagungsband zum 31. Verformungskundlichen Kolloquium, S.45-50, Montanuniversität Leoben, Plannersalm, ISBN-Nr. 978-3-902078-17-9, 2012
- [9] Richter, B.: Gleichung 5. Grades, Nacht des Wissens 2013
- [10] Akima, H.: A New Method of Interpolation and Smooth Curving Fitting Based on Local Procedures, ESSA Research Laboratories, Boulder, Colorado, Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 17, No. 4, October 1970
- [11] Prautzsch, H.; Boehm, W.; Paluszny, M.: Bezier- and B-spline techniques, March 26, 2002
- [12] Späth, H.: Exponential Spline Interpolation, Computing 4, Karlsruhe, 1969