

Mario Müller M.Sc (RWTH Aachen University)

Jannik Grätz M.Sc. (Kiefel Technologies)

Prof. Dr.-Ing. Mathias Hüsing RWTH Aachen University)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves (RWTH Aachen University)

# Flexibilisierung von Verarbeitungsprozessen mittels servogesteuerter Kurvengetriebe

## 1 Einleitung

In der Verpackungsindustrie werden Becher und Schalen u.a. mittels Druckluftformautomaten aus Folienbahnen geformt. Die Kiefel GmbH ist Hersteller solcher Anlagen zum Umformen aus Kunststoffhalbzeugen mittels Warmumformprozessen. Die Herausforderung an die Bewegungstechnik besteht bei diesem Prozess darin, die Taktzeiten möglichst gering zu halten und somit die Produktionsrate zu erhöhen.

In der KTR Baureihe der Kiefel GmbH wird die Werkzeugbewegung hauptsächlich über zwei Komponenten bestimmt. Die Geometrie der Bewegungsbahn wird über Kurvenscheiben vorgeschrieben. Der zeitliche Verlauf der Bahn wird über die Drehgeschwindigkeit der Kurvenscheiben mittels eines Servoantriebes variiert. Auch wenn die Kombination von Kurvenscheibe und Servoantrieb verschiedene Vorteile bietet, ist die optimale Synthese beider Komponenten noch unzureichend erforscht.

Innerhalb einer Kooperation vom Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik (IGMR) der RWTH Aachen University und der Kiefel GmbH wurde das Potential von servogesteuerten Kurvengetrieben für die Flexibilisierung des Tiefziehprozesses untersucht. Dabei sind neue Ansätze zur Auslegung des Gesamtsystems entstanden. Ergebnisse dieser Untersuchung werden innerhalb dieser Veröffentlichung dargestellt. Dabei wird zuerst auf den Thermoformprozess eingegangen, bevor das generelle Potential servogesteuerter Kurvengetriebe beschrieben wird. Anschließend wird ein kleiner Einblick in den gemeinsam entwickelten Auslegungsprozess gegeben.

## 2 Der Thermoformprozess - Herausforderungen und Möglichkeiten

Der Thermoformprozess erfolgt grundsätzlich immer in den in Bild 1 gezeigten Schritten:

1. **Aufheizen** des Halbzeugs auf Formtemperatur
2. **Umformen** und Abkühlen
3. **Ausstanzen** der Fertigteile
4. **Stapeln** der Fertigteile

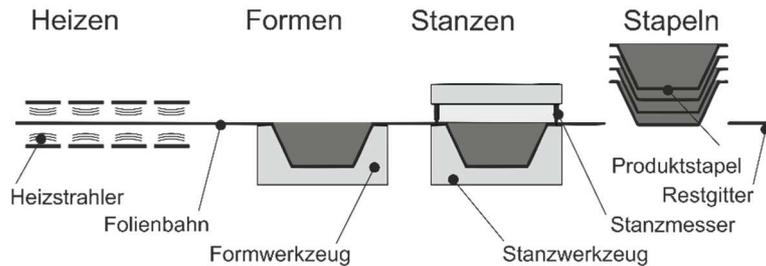


Bild 1: Schematische Darstellung des Thermoformprozesses

Dabei wird eine Folie durch die verschiedenen Stationen geführt und dort bearbeitet. Aus Produktsicht kann es sinnvoll sein, die beiden Prozessschritte *Formen* und *Stanzen* in einem Prozessschritt zusammenzufassen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Formteile einen glatten Rand benötigen. Erfolgen beide Schritte getrennt, sind die Formteile nach dem Formprozess mit der Folienbahn über Stege verbunden (vgl. Bild 2). Durch den Stanzprozess können diese Stege nicht komplett entfernt werden und bleiben zum Teil am fertigen Produkt zurück.

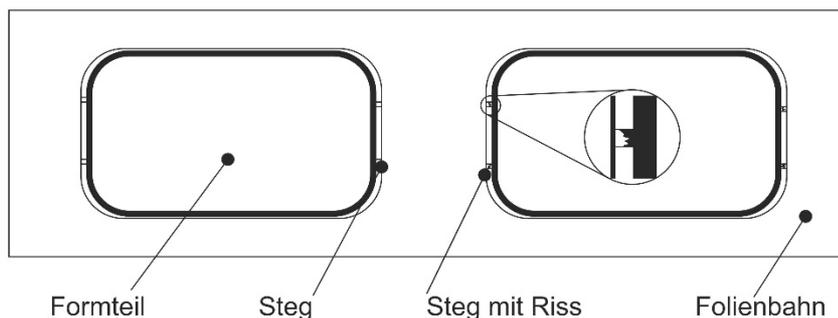


Bild 2: Stege an Formteilen bei Trennung der Prozessschritte Formen und Stanzen

Stege sind nicht nur aus ästhetischen Gründen unerwünscht. Ihre Rückstände können auch zu Verletzungen führen (z.B. Verletzung der Lippe durch einen Trinkbecher). Bei solchen Produkten wird daher das in Bild 3 gezeigte Verfahren verwendet. Bei diesem Verfahren werden die Formteile auf einer Kippmaschine direkt im Werkzeug geformt und gestanzt. Nach dem Formprozess erfolgt das Stapeln. Dazu muss das Formwerkzeug nicht nur linear geöffnet, sondern zusätzlich um einen bestimmten Winkel geschwenkt werden. Erst durch das Schwenken ist die Entnahme der Fertigteile möglich. Daher kann die Werkzeugbewegung nicht mehr mit einem einzelnen Linearantrieb realisiert werden. Vielmehr ist es notwendig, das Werkzeug mit einem ungleichförmig übersetzenden Getriebe zu bewegen. Dabei entstehen verschiedene Herausforderungen.

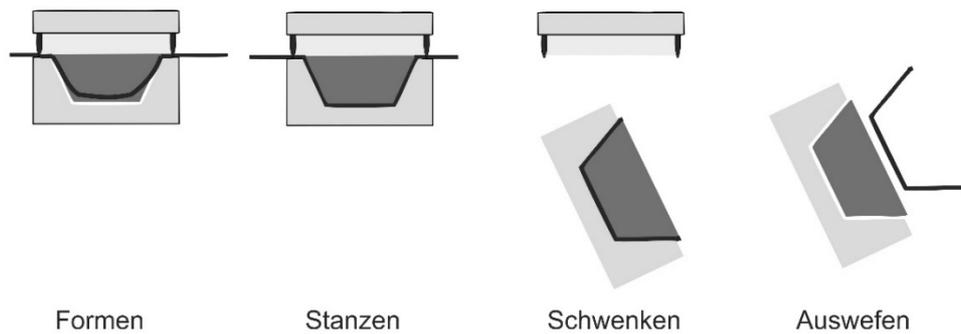


Bild 3: Schrittabfolge auf einer Kippmaschine

Um eine lange Standzeit der Werkzeuge zu ermöglichen, ist eine massive Bauweise mit gehärteten Schnittbuchsen aus Stahlwerkstoffen notwendig. Daraus ergeben sich Werkzeugmassen von ca. 1000 kg, die geeignet zu führen und hochdynamisch zu bewegen sind. Zusätzlich muss in der Stanzposition eine sehr große Kraft aufgebracht werden, um das Formteil mit einem zuverlässigen Schnitt von der Folienbahn zu trennen. Die Zeiten, welche die Maschine benötigt, um das Werkzeug in die Auswerfposition und wieder zurück in die Formposition zu bewegen, sind Nebenzeiten. Währenddessen können keine Produktivprozesse wie Formen, Stanzen und Stapeln stattfinden. Daher wird angestrebt, diese Zeiten möglichst kurz zu halten. Zusätzlich wird in der Stanzposition eine sehr genaue Führung benötigt, um den Verschleiß am Werkzeug zu reduzieren. Demnach bietet sich eine mechanische Synchronisation der Teilbewegungen *Heben* und *Schwenken* des Werkzeugs an.

Hierfür eignet sich ein kurvengesteuertes Koppelgetriebe, bei dem die Hubbewegung und die Schwenkbewegung mit unterschiedlichen Teilgetrieben realisiert wird. Gekoppelt sind beide Teilgetriebe durch miteinander synchronisierte Kurvenscheiben (siehe Bild 4). Das Koppelgetriebe bietet den Vorteil einer veränderlichen Übersetzung. Damit können die Übersetzungen auf die Prozessanforderungen angepasst werden. So kann beim Stanzen beispielsweise über den Kniehebel-Effekt eine höhere Übersetzung realisiert werden als beim Schwenken des Werkzeugs. Durch die mechanische Kopplung der Hub- und Schwenkbewegung ist die relative Lage der beiden Teilgetriebe festgelegt. Um flexibel auf die Produktanforderungen reagieren zu können, ist eine flexible Einstellung der Formzeit (Zeit vor dem Stanzen, in der die Form geschlossen ist) erforderlich. Daher werden die Kurvenscheiben mit einem Servoantrieb angetrieben.

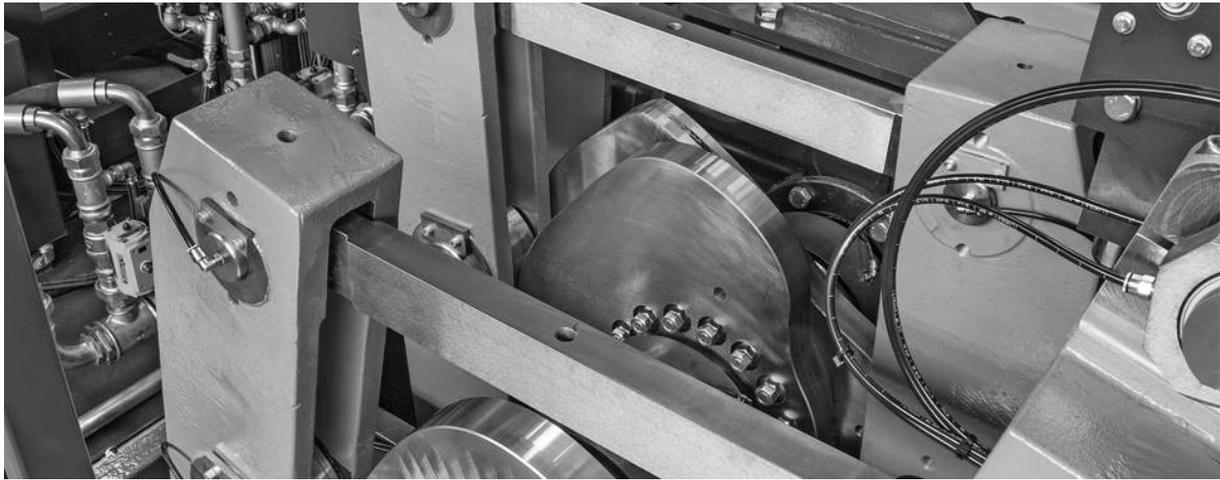


Bild 4: Darstellung der synchronisierten Kurvenscheiben

Die beschriebene Produktionsmaschine bietet gegenüber alternativen Maschinen, die eine direkte Synchronisation der beiden Bewegungen über zwei getrennte servoelektrische Antriebssysteme realisieren, verschiedene Vorteile. Der wichtigste Vorteil ist die Sicherheit gegen elektrische Fehlerfälle wie Geberausfälle, Stromausfälle oder Leitungsbrüche. Diese Fehler führen jeweils zu einer Verletzung der Toleranzgrenzen für die Positionierung der Werkzeughälften zueinander. Ein Verletzen dieser Toleranzen kann zur Zerstörung des Werkzeugs führen. Weiterhin kann bei geschicktem Bewegungsdesign eine Übertragung der Bewegungsenergie vom Schwenk- auf das Hubgetriebe bereits durch die mechanische Kopplung erfolgen. Hierdurch kann der benötigte Antrieb insgesamt kleiner dimensioniert werden.

### **3 Potentiale servogesteuerter Kurvengetriebe**

Die Idee, mittels einer ungleichmäßigen Antriebsbewegung die Eigenschaften eines Kurvengetriebes zu verbessern, hatte bereits ROTHBART im Jahre 1956 [4]. Er beschrieb, wie eine umlaufende Kurbelschleife dazu genutzt werden kann, die Geschwindigkeit einer Kurvenscheibe zu variieren. Dazu nutzte er den Aufbau, der in Bild 5 dargestellt ist. Die Kurbel (1) einer Kurbelschleife wird mit einer konstanten Geschwindigkeit angetrieben. Am Abtrieb (2) der Kurbelschleife ist die Kurvenscheibe befestigt. Diese dreht sich aufgrund der ungleichmäßigen Übersetzung der Kurbelschleife mit einer variablen Winkelgeschwindigkeit. Über den Eingriff der Rolle (4) wird der Stößel (5) angetrieben.

In [2] wurde die Getriebeanordnung nach Bild 5 bezüglich deren Verbesserungspotentials des Kraftübertragungswinkels für die in Bild 6 (links) dargestellte Stößelbewegung untersucht.

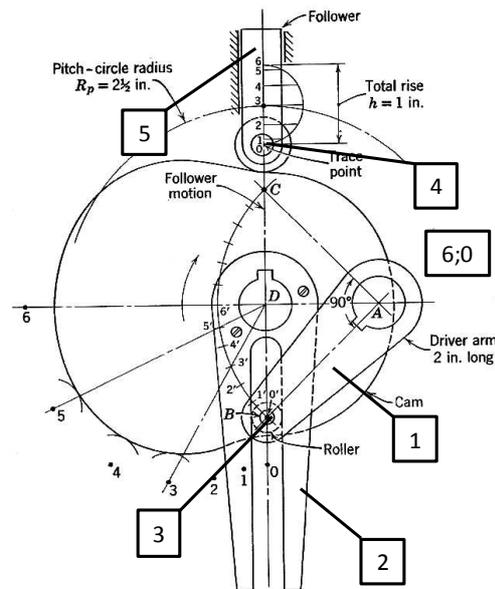


Bild 5: Umlaufende Kurbelschleife zum Antrieb einer Kurvenscheibe nach [4] mit Ergänzungen

Dabei wurde festgestellt, dass durch diese Art des Antriebes eine Verbesserung des Übertragungswinkels von ca.  $45^\circ$  auf  $64^\circ$  realisiert wurde (vgl. Bild 6 rechts  $\omega = konst$  und  $\omega = Rb$ ). Das entspricht einer Verbesserung um etwa 42%. Durch einen direkten Servoantrieb konnte der Übertragungswinkel sogar auf  $76^\circ$  angehoben werden (vgl. Bild 6 rechts  $\omega = Sv$ ). Dies hat den Grund, dass die Steuerung eines Servomotors weitere Freiheiten im Bewegungsdesign zulässt, welche durch die von ROTHBART verwendete Kurbelschleife nicht möglich sind.

Der Übertragungswinkel ist bei Getrieben ein weit verbreitetes Kriterium für die Kraftübertragungsgüte [3]. Die Kraftübertragung ist ideal, wenn der Übertragungswinkel  $90^\circ$  entspricht. Neben der Aussage über das Übertragungsverhalten wird der Übertragungswinkel bei Kurvengetrieben auch zur Bestimmung der kinematischen Hauptabmessungen des Kurvengetriebes mittels Hodographenverfahren oder Satz von Flocke genutzt [3]. Zu den kinematischen Hauptabmessungen gehören alle geometrischen Größen, die einen Einfluss auf die Dimension der Kurvenscheibe haben. Wird der Übertragungswinkel demnach erhöht, können die kinematischen Hauptabmessungen des Getriebes und damit der Bauraum der Kurvenscheibe verkleinert werden.

Neben der Verbesserung des Übertragungsverhalten und der Verkleinerung des Bauraums führt der Antrieb eines Kurvengliedes mit einer ungleichförmigen Bewegung im Idealfall zu einem weiteren positiven Nebeneffekt. Im Kontakt zwischen Kurvenscheibe und Eingriffsglied können sich die Hertzchen Pressungen aufgrund der veränderten Kurvenscheibenkrümmung so verändern, dass die Belastung des Materials verringert wird und sich somit die

Lebensdauer erhöht. Die Berechnung der Hertzischen Pressung und der Lebensdauer kann VDI 2142 [7] entnommen werden.

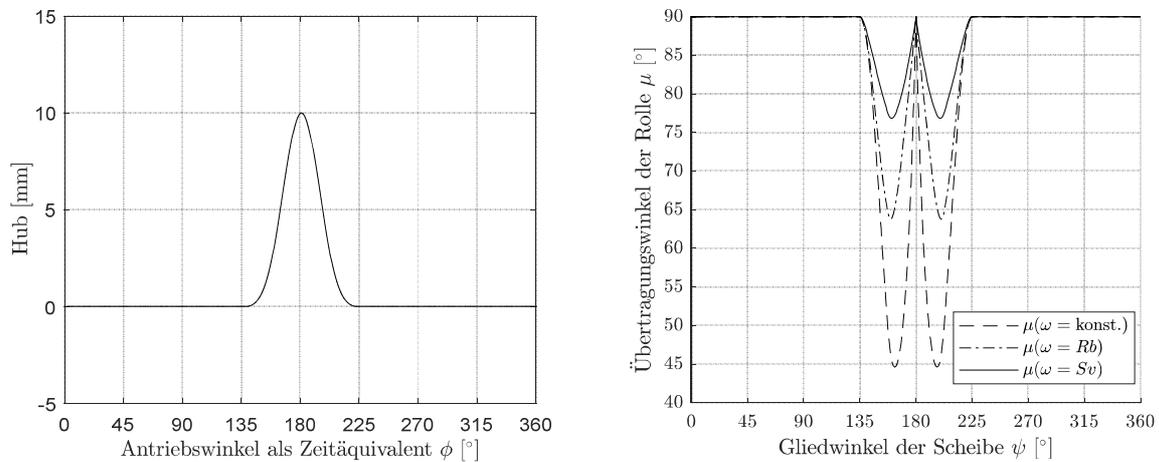


Bild 6: Bewegung des Stößels (links) und resultierende Verbesserung des Übertragungswinkels aufgrund der unterschiedlichen Antriebe der Kurvenscheibe (rechts) [2]

Sollte die Übertragung zwischen Kurvenscheibe und Eingriffsglied über einen Tellerstößel oder Flachhebel erfolgen, können über eine variable Antriebsdrehzahl stetige Kurven erzeugt werden, die bei einer konstanten Antriebsgeschwindigkeit unstetig wären (siehe Bild 7). In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass bei dem Getriebe links die schwarze Kurvenscheibe zwei unstetige Stellen hat (Kurvenkontur schneidet sich selbst). Die Unstetigkeit entsteht dadurch, dass der Kurvenscheibendrehpunkt zu nah am Abtriebsglied gelegen ist und die kinematischen Hauptabmessungen somit zu klein gewählt sind. Eine Möglichkeit die Unstetigkeit zu beseitigen ist somit eine Verlagerung des Drehpunktes. Dieses Vorgehen würde jedoch den Bauraum des Getriebes vergrößern. Daher wird eine weitere Variante berücksichtigt: die Variation der Antriebswinkelgeschwindigkeit. Das Ergebnis dieser Variante ist auf der rechten Seite von Bild 7 dargestellt. Dabei wird die Antriebswinkelgeschwindigkeit der Kurvenscheibe im Bereich der Unstetigkeit angehoben. Im Gegenzug muss die Winkelgeschwindigkeit in einem anderen Bereich abgesenkt werden. Das Absenken der Antriebswinkelgeschwindigkeit ist notwendig, um für dieselbe Bewegungsaufgabe die gleiche Taktzeit zu erhalten.

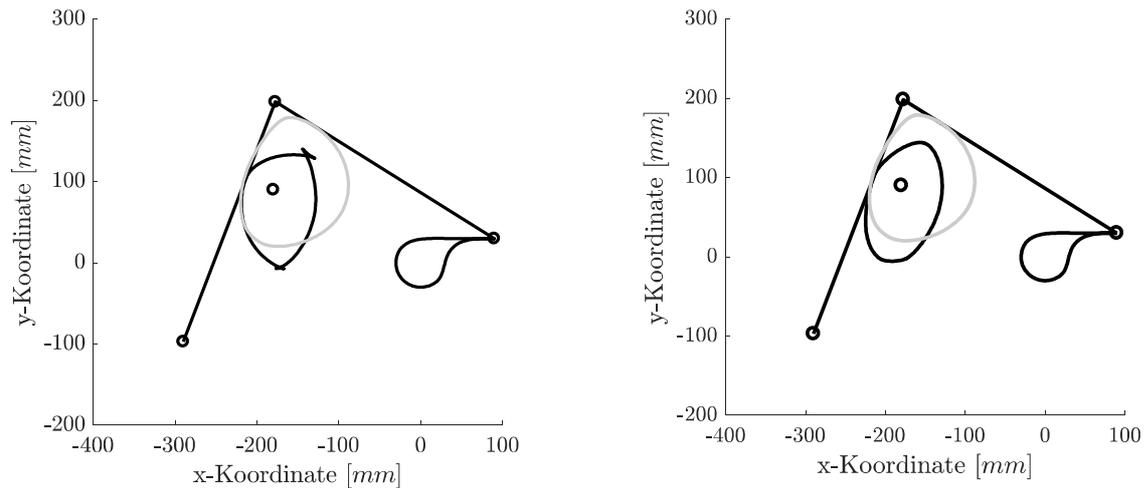


Bild 7: Unstetige Kurvenscheibe bei konstantem Kurvenscheibenantrieb (links) und stetige Kurvenscheiben bei variablen Kurvenscheibenantrieb (rechts)

Neben den oben genannten Vorteilen während der Synthese des Getriebes, bietet die Kombination von Kurvengetrieben mit Servoantrieben auch während des Betriebes erhebliche Vorteile. Zum einen besteht der offensichtliche Vorteil, dass durch die änderbare Antriebsgeschwindigkeit einer Kurvenscheibe der zeitliche Verlauf der Bewegung noch im Betrieb auf die aktuellen Anforderungen angepasst werden kann. So können beispielsweise Rasten, während des Betriebes durch Abbremsen des Antriebes verlängert werden. Zum anderen bietet die Kombination eines Mechanismus mit einem Servoantrieb generell die Möglichkeit, den Mechanismus in seiner Eigenbewegung zu betreiben. Die Eigenbewegung ist dabei die theoretische Bewegung, die der Mechanismus vollführt, wenn dieser bei Vernachlässigung von Dissipationseffekten mit einer gegebenen Anfangsenergie sich selbst überlassen wird [1]. Dabei kann gezeigt werden, dass für diese Art der Bewegung kein Antriebsmoment benötigt wird, um die bewegten Glieder zu beschleunigen oder abzubremesen [1]. Beispiele für die energieeffiziente Synthese ungleichförmig übersetzender Getriebe mit Hilfe der Eigenbewegung sind in [5] und [6] gezeigt. Es kann also durch den variablen Antrieb eines Mechanismus das maximale benötigte Antriebsmoment oder die Taktzeit bei gleichbleibendem maximalen Antriebsmoment reduziert werden.

Im Vergleich zu einer reinen Servoantrieb-Variante, bietet die Kombination mit einem Kurvengetriebe ebenfalls immense Vorteile. Zum einen ist die Variation der Antriebsgeschwindigkeit des Servomotors bei einer Kombination mit einer Kurvenscheibe geringer als die Variation der Geschwindigkeit ohne Kurvenscheibe. Dadurch fällt die maximale Motorbeschleunigung deutlich geringer aus. Zum anderen kann der Servomotor bei der Kombination mit einem Kurvengetriebe genau dann abgebremst werden, wenn das Kurvengetriebe in einer Rast ist. Zu diesem Zeitpunkt ist der Servoantrieb und die

Kurvenscheibe vom Prozess und dem Rest der Maschinen entkoppelt. Beim Abbremsen müssen demnach nur die Trägheitsmassen des Motors und der Kurvenscheiben überwunden werden. Prozesskräfte oder Massenkräfte der Maschine müssen nicht abgebremst werden. Beide Vorteile führen dazu, dass für ein servogesteuertes Kurvengetriebe ein deutlich kleinerer und somit günstigerer Antrieb verwendet werden kann. In einem computergestützten Syntheseprozess sollen diese Vorteile nun kombiniert und im Auslegungsprozess der Tiefziehpresse genutzt werden.

## 4 Synthese eines servogesteuerten Kurvengetriebes

Innerhalb dieses Kapitels wird ein kurzer Einblick in die Möglichkeiten gegeben, Kurvenkoppelgetriebe in Kombination mit einem Servomotor optimal zu synthetisieren. Dazu wird das Vorgehen anhand des gemeinsam entwickelten Getriebeauslegungstools (Screenshots in Bild 8) beschrieben. Auf die Darstellung des verwendeten Mechanismus wird aus Datenschutzgründen verzichtet.

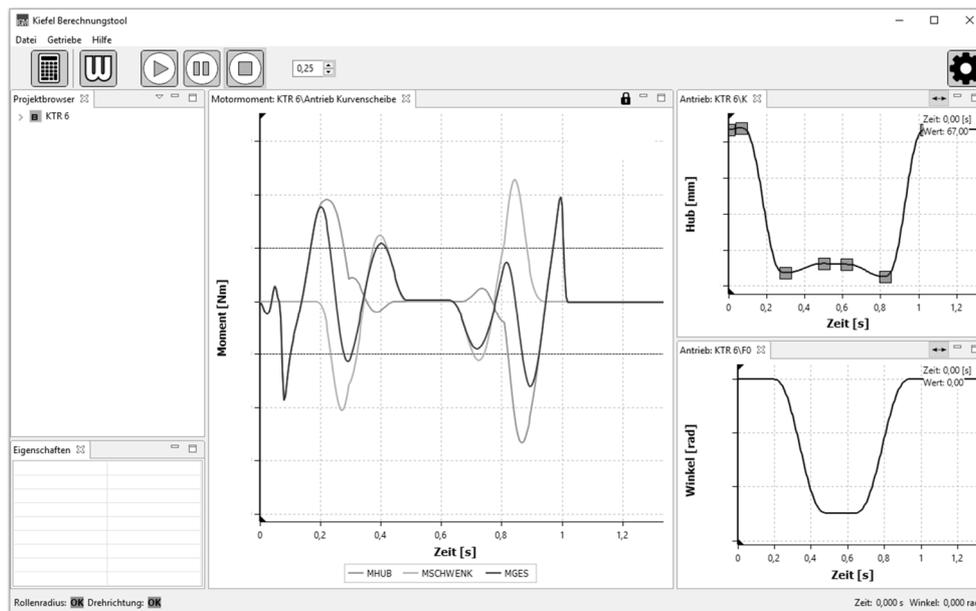


Bild 8: Screenshot des gemeinsam entwickelten Auslegungstools für servogesteuerte Kurvenkoppelgetriebe

In einem ersten Schritt wird die gewünschte Werkzeugbewegung vorgegeben. Dabei kann mit Hilfe eines Diagramms (Bild 8 rechts oben bzw. unten) die Bewegungsvorgabe interaktiv bearbeitet werden. Hier besteht die Bewegungsvorgabe wie bei allen Kurvengetrieben aus zwei unterschiedlichen Arten von Bewegungsbereichen. Der Prozess gibt Bereiche vor, die unbedingt einzuhalten sind. In Bezug auf den Prozess in Bild 3 sind diese einzuhaltenden Bereiche der Formprozess, der Stanzprozess und die Entladeposition. Die Bewegung

zwischen diesen Bereichen kann frei gewählt werden und liegt im Ermessen des Konstrukteurs. Dieser kann die Bewegung nun so einstellen, dass verschiedene Analyseparameter wie z.B. das benötigte Antriebsmoment optimiert werden. Steht die Werkzeugbewegung fest, dann ist auch die Bewegung des gesamten Koppelgetriebes definiert.

Bei einer Auslegung eines Kurvenkoppelgetriebes mit konstanter Antriebsgeschwindigkeit würde der Auslegungsprozess des Getriebes an dieser Stelle beendet sein. Die Software würde die für eine konstante Antriebsgeschwindigkeit benötigten Kurvenscheiben und die benötigten Antriebsmomente berechnen (Bild 8 Mitte). Durch den Antrieb der Kurvenscheiben mittels Servomotoren können nun jedoch die Antriebsmomente bei gleichbleibender Werkzeugbewegung weiter reduziert werden. Dazu kann über ein weiteres interaktives Diagramm die zeitliche Bewegung des Servomotors vorgegeben werden. Wie in Kapitel 3 beschrieben, kann somit der Servomotor während der Werkzeugrasten abbremesen und beschleunigen. Durch dieses Vorgehen ist eine zusätzliche Minimierung der benötigten Antriebsmomente möglich. Wird dieses Vorgehen iterativ durchgeführt, kann die optimale Lösung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen angenähert werden. Dadurch ist eine Verringerung der Taktzeit bei gleichbleibendem maximalen Antriebsmoment möglich.

## **5 Zusammenfassung**

Innerhalb dieser Veröffentlichung wurde gezeigt, welches Potential in der Kombination von Servomotoren mit Kurvengetrieben steckt. Die Vorteile eines servogesteuerten Kurvengetriebes führen zu neuen Möglichkeiten in der Getriebesynthese. Diese Kombination kann beispielsweise genutzt werden, um die benötigten Antriebsmomente zu reduzieren und somit ein energieoptimiertes Getriebe zu erhalten. Zum anderen ist es möglich, den benötigten Bauraum zu verringern und den gewünschten Mechanismus kompakter zu gestalten. Zudem wurden die Vorteile gegenüber Varianten mit Servoantrieb ohne Kurvenglieder aufgezeigt.

Als Beispiel für eine erfolgreiche Anwendung der Kombination aus Servoantrieb und Kurvengetriebe in der Praxis wurde die von der Kiefel GmbH entwickelten Thermoformmaschinen genannt. Dabei wurde verstärkt auf die Anforderungen des Thermoformprozesses an die Bewegung eingegangen. Es wurde ein Softwaretool entwickelt, das durch intuitive Bedienung und iteratives Vorgehen eine manuelle Optimierung der Maschine hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien ermöglicht. Das wichtigste Kriterium ist dabei die Reduzierung der Taktzeit der Maschine bei gleichbleibendem maximalen Antriebsmoment.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Dresig, H.; Holzweißig, F.  
*Maschinendynamik*  
Berlin: Springer, 2016, ISBN 3662527138.
- [2] Hoffmann, M.  
*Servomotoren als Antrieb von Kurvengetrieben, zur Optimierung des Übertragungsverhaltens*  
Masterarbeit, Aachen: RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 2017.
- [3] Kerle, H.; Corves, B.; Hüsing, M.  
*Getriebetechnik, Grundlagen, Entwicklung und Anwendung ungleichmässig übersetzender Getriebe*  
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 5. Auflage, 2015, ISBN 978-3-658-10056-8.
- [4] Rothbart, H. A.  
*Cams, Design, dynamics, and accuracy*  
Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 1956.
- [5] Schwarzfischer, F.; Hüsing, M.; Corves, B.  
*The Dynamic Synthesis of an Energy-Efficient Slider-Crank-Mechanism*  
In: International Symposium of Mechanism and Machine Science, Baku, Azerbaijan, 2017.
- [6] Schwarzfischer, F.; Hüsing, M.; Corves, B.  
*The Dynamic Synthesis of an Energy-Efficient Watt-II-Mechanism*  
In: Carvalho, J. C. M. et al. (Hrsg.), Multibody mechatronic systems, Cham: Springer, 2018, ISBN 978-3-319-67567-1, S. 213–222.
- [7] VDI 2142 Blatt 1  
*Auslegung ebener Kurvengetriebe - Berechnungsmodule für Kurven- und Koppelgetriebe*  
Norm, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.