

# Effiziente Erzeugung von Rasten hochdynamischer Getriebe in der Produktentwicklung

## Efficient generation of dwells in highly dynamic mechanisms during product development

Thomas Knobloch\* M.Sc., Knobloch@igmr.rwth-aachen.de

Mathias Hüsing\*, Prof. Dr.-Ing., Huesing@igmr.rwth-aachen.de

Burkhard Corves\*, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., Corves@igmr.rwth-aachen.de

\*RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 52062 Aachen, Deutschland

### Kurzfassung

Mehr als ein Drittel der weltweit bereitgestellten Energie entfällt auf den Industriesektor. Daher besteht ein langfristiger Ansatz zur Nachhaltigkeit darin, die Produktionsprozesse durch eine effiziente Prozessgestaltung zu verbessern. Die Senkung des Stromverbrauchs ist besonders wichtig und steht im Einklang mit dem Hauptziel der EU, die Energieeffizienz zu steigern. Ein Ansatz aus der klassischen Schwingungstechnik, mit welchem Mechanismen energieeffizient und materialsparend betrieben werden können, ist der Betrieb in der Eigenbewegung. Hierbei wird der Mechanismus in einer niederfrequenten Eigenmode angeregt, wodurch Resonanz entsteht. Um diese komplexe, periodische Anregung zu erzeugen, werden Servoantriebe eingesetzt. Obwohl dieser Ansatz im Stand der Technik etabliert ist, findet sich noch keine Übertragung dieses Prinzips auf Rastgetriebe. Bei Rastgetrieben werden fast ausschließlich Kurvengetriebe verwendet. Getriebe, die in hochdynamischen Maschinen wie beispielsweise Webmaschinen, Druckmaschinen oder Verpackungsmaschinen zu finden sind, laufen häufig im Mehrschichtbetrieb. Daher bietet sich dort hohes Potential zum Einsparen von Energie. In diesem Beitrag werden Ansätze zur Erhöhung der Energieeffizienz von Rastgetrieben vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Eigenbewegung gelegt.

### Abstract

Motion design is a fundamental task in product development and aims at developing solutions to fulfil motion tasks. Often, non-uniformly translating mechanisms are used to generate these movements. With the industrial sector accounting for more than one-third of the world's energy supply, a long-term approach to sustainability is to improve production through efficient process design. Reducing electricity consumption is particularly important and in line with the EU's main goal of increasing energy efficiency. Due to rising energy prices in Germany, reducing electricity consumption is becoming increasingly relevant from an economic point of view. If the so-called eigenmotion of a mechanism is utilised, energy consumption can be significantly reduced. In this paper, approaches for increasing the energy efficiency of dwell mechanisms are presented. Special attention will be paid to the eigenmotion.

## 1 Einleitung

Bewegungsdesign ist eine grundlegende Aufgabe in der Produktentwicklung und zielt auf die Entwicklung von Lösungen zur Erfüllung von Bewegungsaufgaben ab. Häufig werden zur Erzeugung dieser Bewegungen ungleichförmig übersetzende Getriebe eingesetzt. Da mehr als ein Drittel der weltweit bereitgestellten Energie auf den Industriesektor entfällt, besteht ein langfristiger Ansatz zur Nachhaltigkeit darin, die Produktion durch eine effiziente Prozessgestaltung zu verbessern [1]. Die Senkung des Stromverbrauchs ist besonders wichtig und steht im Einklang mit dem Hauptziel der EU, die Energieeffizienz zu steigern [2]. Aufgrund der steigenden Energiepreise in Deutschland wird die Reduzierung des Stromverbrauchs auch aus wirtschaftlicher Sicht immer relevanter [3].

Traditionell werden ungleichmäßig übersetzende Getriebe

mit einer konstanten Geschwindigkeit angetrieben. Durch die Entwicklung von Servomotoren wird das Ausführen beliebiger, nicht konstanter Eingangsbewegungen mit einer hohen Genauigkeit möglich. Die sogenannte Eigenbewegung beweist, dass das Antreiben eines Mechanismus mit einer nicht konstanten Eingangsbewegung Vorteile hat. Bei der Eigenbewegung handelt es sich um eine nicht konstante Eingangsbewegung, weshalb Servoantriebe zum Einsatz kommen. Durch Ausnutzen der Eigenbewegung kann der Energieverbrauch erheblich gesenkt werden [4].

Eine wesentliche Bewegungsaufgabe bei ungleichmäßig übersetzenden Getrieben ist die Erzeugung von Rastbewegungen, d. h. der Erzeugung von Verweilzeiten der gewünschten Ausgangsbewegung. Hierbei werden fast ausschließlich Kurvengetriebe verwendet, besonders bei meist im Mehrschichtbetrieb laufenden, hochdynamischen Maschinen wie beispielsweise Webmaschinen, Druckmaschi-

DOI: 10.17185/duerpublico/77387



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz.

nen oder Verpackungsmaschinen.

Der Antrieb eines klassischen Kurvengetriebes mit einer konstanten Eingangsgeschwindigkeit ist bei Rastbewegungen üblich, da die Kurvenscheibe eine nahezu willkürliche Bewegung des Abtriebsglieds zulässt und gleichzeitig ziemlich robust ist. Dennoch ist auch die Kombination der Servoantriebstechnik mit Kurvengetrieben bei der Anpassung der Rastdauer bekannt [6]. Bislang fehlen Methoden, die Eigenbewegung von Kurvengetrieben durch Servoantriebstechnik im Hinblick auf Energieeffizienz, insbesondere bei der Rasterzeugung, zu nutzen. Auch auf Koppelgetrieben basierende Rastgetriebe sollen in diesem Rahmen untersucht werden.

In diesem Beitrag werden Ansätze zur Erhöhung der Energieeffizienz von Rastgetrieben vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Eigenbewegung gelegt. Der Betrieb eines Mechanismus in der Eigenbewegung ist die energiesparendste Methode, einen Mechanismus anzutreiben [7]. Das liegt daran, dass beim Betrieb eines Mechanismus in seiner Eigenbewegung keine Energie verbraucht wird, sofern nur Trägheitskräfte und potenzielle Kräfte überwunden werden müssen [8]. Um Prozess- und Reibungskräfte zu überwinden, muss allerdings zusätzliche Energie aufgewendet werden.

Verglichen mit einem beliebigen Getriebe, welches mit einer konstanten Antriebsgeschwindigkeit betrieben wird, liegt bei demselben Getriebe unter Betrieb in der Eigenbewegung eine veränderte Abtriebsgeschwindigkeit vor. Über einen iterativen Optimierungsprozess werden die Getriebeparameter des Getriebes in Eigenbewegung so angepasst, dass die Abtriebsbewegung an die gewünschte Abtriebsbewegung des Ausgangsgetriebes angeglichen wird. Zwischen der optimierten Abtriebsbewegung und der gewünschten Abtriebsbewegung besteht üblicherweise eine minimale Abweichung.

Falls diese Abweichung während bestimmter Abschnitte des Bewegungsverlaufes nicht erwünscht ist, muss in diesen Segmenten von der Eigenbewegung abgesehen und stattdessen der gewünschte, exakte Verlauf gewählt werden. Dadurch, dass der Betrieb während des exakten Verlaufes nicht mehr in der Eigenbewegung stattfindet, ist dieser energetisch gesehen nicht mehr als optimal zu bewerten. Für diesen Fall, dass ein Betrieb in der Eigenbewegung nicht ausschließlich gewährleistet werden kann, sollen in diesem Beitrag mögliche Ansätze diskutiert werden, um die Energieeffizienz, sowohl während dieser Bereiche, als auch allgemein über den gesamten Bewegungsverlauf, weiter zu erhöhen. Diese Ansätze umfassen die Rekupe-ration, das Ändern der potenziellen Energie während der Bewegung sowie das dynamische Auswuchten.

Die Herausforderung in Bezug auf den Stand der Technik besteht darin, eine variable Antriebsbewegung während des Syntheseprozesses von Rastgetrieben zu berücksichtigen. In diesem Forschungsprojekt werden am Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik (IGMR) der RWTH Aachen University diesbezüglich Methoden entwickelt, die sowohl die Synthese des Mechanismus als

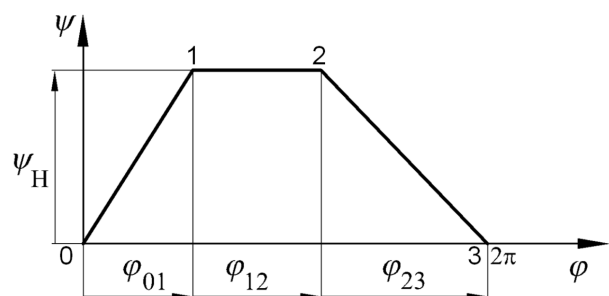
auch den Entwurf der Antriebsbewegung umfassen, die beide voneinander abhängig sind. Bei der Synthese des Rastgetriebes werden nicht nur kinematische Parameter, sondern auch Masseparameter berücksichtigt, da diese den Servoantrieb und die Dynamik beeinflussen. Es werden die Möglichkeiten aufgezeigt, elektrische und mechanische Komponenten optimal zu kombinieren. Ziel des Projekts ist, Methoden zu entwickeln, um energieeffiziente Rastgetriebe auslegen zu können, damit deren Anzahl in Produktionsmaschinen zukünftig erhöht wird. Um die Ergebnisse auf andere Anwendungen übertragen zu können, werden die entwickelten Methoden so allgemein wie möglich formuliert.

Bevor die Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz von Rastgetrieben in Abschnitt 4 diskutiert werden, wird in Abschnitt 2 zunächst ein kurzer Überblick über zwei Varianten von Rastgetrieben gegeben. Im Anschluss wird in Abschnitt 3 auf die Eigenbewegung und deren Vorteile eingegangen.

## 2 Rastgetriebe

Als Rastgetriebe wird ein Mechanismus bezeichnet, dessen Abtriebsglied in mindestens einer Position keine Bewegung, d. h., eine Rast, aufweist. Rastgetriebe sind in vielen industriellen Anwendungen zu finden, beispielsweise in Textil- und Verpackungsmaschinen, um komplizierte Bewegungen schnell und präzise auszuführen [9].

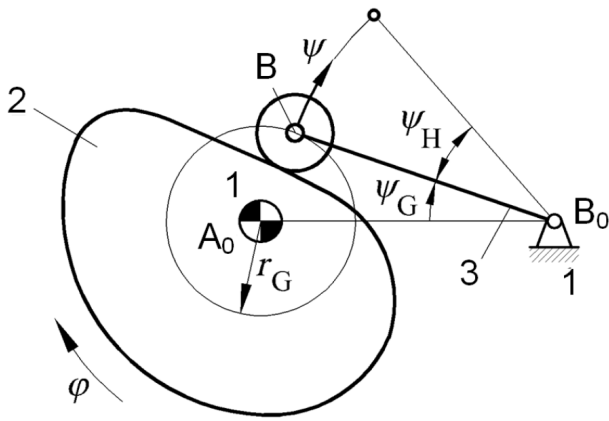
In **Bild 1** wird ein Beispiel für einen Bewegungsplan mit temporärer Rast gezeigt. Im Bewegungsplan ist die Bewegung des Abtriebsglieds  $\psi$  in Abhängigkeit von der Bewegung des Antriebsglieds  $\varphi$  aufgetragen. Im Bereich der Antriebswinkelbewegung  $\varphi_{12}$  wird der Winkel des Abtriebsglieds  $\psi(\varphi)$  konstant gehalten.  $\psi_H$  kennzeichnet diesen Rastwert.



**Bild 1** Bewegungsplan nach [5]

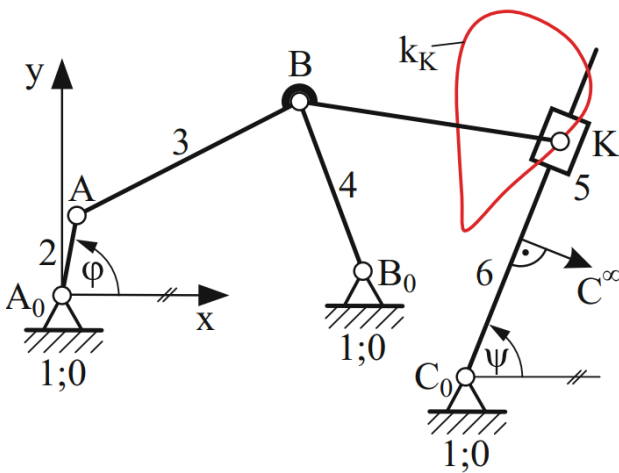
Grundsätzlich kann zwischen zwei Arten von Rastgetrieben unterschieden werden. Zum einen kann aus dem Bewegungsplan aus Bild 1 ein Kurvengetriebe bestehend aus einem Maschinengestell (1), der Kurvenscheibe (2) und einem Stößel (3) entwickelt werden, wie in **Bild 2** zu sehen ist.

Die Kurvenscheibe kann bei vorgegebener Antriebsbewegung  $\varphi$  so dimensioniert werden, dass der Stößel die Bewegung  $\psi(\varphi)$  exakt ausführt.



**Bild 2** Kurvengetriebe nach [5]

Zum anderen kann ein Rastgetriebe auch auf Basis eines Koppelgetriebes synthetisiert werden, siehe **Bild 3**.



**Bild 3** Doppelrastmechanismus mit geradliniger Führung [10]

Dieses Koppelkurvenrastgetriebe besteht aus sechs Gliedern, sechs Drehgelenken und einem Schubgelenk. Die Verwendung von sechs Gliedern ist bei auf Koppelgetrieben basierenden Rastgetrieben üblich [11]. Allerdings können mit einem auf einem Koppelgetriebe basierenden Rastgetriebe keine exakten Rasten erzeugt werden [12]. Dies bedeutet, dass die Geschwindigkeit des Abtriebsgliedes nicht null, sondern ausschließlich hinreichend klein ist. Ist diese sogenannte Rastabweichung zulässig für den gewünschten Bewegungsablauf, ist ein Koppelkurvenrastgetriebe einem Kurvenscheibenrastgetriebe aus Kosten- und Verschleißgründen vorzuziehen [9]. Beide Arten von Rastgetrieben sollen im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersucht werden.

### 3 Die Eigenbewegung

Die theoretischen Grundlagen der Eigenbewegung existieren bereits seit einigen Jahren [4]. Doch erst seit der Entwicklung von Servomotoren ist es möglich, die nicht konstante Geschwindigkeit der Eigenbewegung vorzugeben. Die Eigenbewegung eines Mechanismus beschreibt diejenige Bewegung, die sich bei einem konstanten Energiemoment

stellt. Sie ist sowohl von den kinematischen und dynamischen Parametern eines Getriebes abhängig und kann als Winkelgeschwindigkeit verstanden werden.

Die theoretische, verlustfreie Eigenbewegung  $\dot{\varphi}_e(\varphi)$  ergibt sich aus der Annahme, dass die Summe aus potenzieller und kinetischer Energie zu jedem Zeitpunkt konstant ist. Sie kann formuliert werden als:

$$\dot{\varphi}_e(\varphi) = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}J_{red}(\varphi_0) \cdot \dot{\varphi}_0^2 + E_{pot}(\varphi_0) - E_{pot}(\varphi)}{\frac{1}{2}J_{red}(\varphi)}} \quad (1)$$

Hierbei bezeichnen  $J_{red}$  das auf die Antriebswelle reduzierte Massenträgheitsmoment und  $E_{pot}$  die potentielle Energie. Der Anfangszustand wird mit  $\varphi_0$  angegeben. Grundsätzlich besitzt jeder Mechanismus mit mindestens einem umlaufenden Getriebeelement eine Eigenbewegung [13]. Die reale Eigenbewegung ist zusätzlich durch ihre Abhängigkeit von Reibungsverlusten und Nutzmomenten gekennzeichnet. Sie kann entweder rechnerisch über den um die entsprechenden Momente erweiterten Zusammenhang aus **Gleichung 1** oder experimentell durch das Messen der Antriebswinkelgeschwindigkeit während des Auslaufvorgangs bestimmt werden [4]. Je näher ein Mechanismus im Bereich der Eigenbewegung betrieben wird, desto weniger Energie wird bei dessen Betrieb verbraucht [4].

Das Antreiben eines Mechanismus in seiner Eigenbewegung hat weitere Vorteile. Zum einen kann der Servomotor verkleinert werden. Zum anderen kann die Rast verlängert werden, indem der Antrieb während der Ruheposition der Mechanik abgebremst wird. Dieser Effekt kann wiederum genutzt werden, um die Maße der Kurvenscheibe zu verringern oder die Übertragungswinkel zu vergrößern und so das erforderliche Übertragungsdrehmoment zu minimieren.

Obwohl die Grundlagen der Eigenbewegung längst dem Stand der Technik angehören, gibt es wenige Anwendungen, in denen die Eigenbewegung zum Einsatz kommt. Dies liegt häufig daran, dass die Methoden zum Auslegen von energieeffizienten Getrieben noch relativ neu und daher noch nicht in der Industrie verbreitet sind. Zum anderen ist die Auslegung eines energieeffizienten Mechanismus komplizierter als die Auslegung eines Mechanismus mit konstanter Antriebswinkelgeschwindigkeit. Daher ist es wichtig, die Erkenntnisse aus der Forschung den Ingenieur\*innen langfristig verfügbar zu machen.

Am IGMR wurden bereits einige Forschungen zur Eigenbewegung von Mechanismen durchgeführt und veröffentlicht. In [14] wurde die Eigenbewegung am Beispiel einer Schubkurbel untersucht, in [15] wurde ein energieeffizienter Watt-II-Mechanismus entwickelt.

Im folgenden werden Ansätze zur Erhöhung der Energieeffizienz von Rastgetrieben vorgestellt und diskutiert.

### 4 Ansätze zur Energieeffizienz von Rastgetrieben

Wird die Eigenbewegung eines Mechanismus bestimmt, entspricht die Bewegung des Abtriebsgliedes nicht mehr der gewünschten Abtriebsbewegung des zugrundeliegenden

Getriebes. Durch einen iterativen Prozess werden die Getriebeparameter so optimiert, dass die Abtriebsbewegung des Getriebes in Eigenbewegung möglichst wieder mit der gewünschten Abtriebsbewegung übereinstimmt. Bei der in [14] untersuchten Schubkurbel weist die Abtriebsbewegung des Mechanismus in Eigenbewegung leichte Abweichungen vom ursprünglichen Getriebe auf. Ist diese Abweichung für den gewünschten Bewegungsverlauf an bestimmten Stellen zu groß, muss an diesen Stellen von der Eigenbewegung abgesehen werden.

Bei Rastgetrieben sind üblicherweise die Rastpositionen, die Dauer der Rasten sowie die Zeiten zwischen den Rasten relevant, der exakte Bewegungsverlauf zwischen den Rasten ist jedoch frei wählbar und liegt im Ermessen der Konstrukteur\*in. Bei auf Koppelgetrieben basierenden Rastgetrieben ist es ein sinnvoller Ansatz, diejenigen Bewegungsbereiche, welche nicht exakt durchlaufen werden müssen, durch die Eigenbewegung darzustellen und in denjenigen Bereichen, in denen eine exakte Bewegung gefordert ist, von der Eigenbewegung abzusehen. In diesem Fall ist die Energieeffizienz des Rastgetriebes geringer als die desselben Mechanismus, der komplett in der Eigenbewegung betrieben wird.

Da Kurvengetriebe beliebige Bewegungsverläufe exakt ausführen können, existiert ausgehend von einem frei wählbaren Kurvengetriebe theoretisch eine exakte Lösung für ein auf einem Kurvengetriebe basierendes Rastgetriebe, welches über den gesamten Bewegungsverlauf in Eigenbewegung betrieben werden kann. Es ist zu untersuchen, ob und wie schnell diese Lösung ermittelt werden kann.

Falls ein Bewegungsbereich prozessbedingt nicht durch die Eigenbewegung beschrieben oder es keine zufriedenstellende Lösung für ein Kurvengetriebe in Eigenbewegung gefunden werden kann, sollen im Folgenden verschiedene Ansätze diskutiert werden, die die Energieeffizienz dieser Mechanismen weiter erhöhen können.

## 4.1 Rekuperation

Für den Fall, dass die Eigenbewegung aufgrund von kinematischen und prozesstechnischen Randbedingungen nicht vollständig umgesetzt und damit das Energieniveau nicht vollständig konstant gehalten werden kann, kann die Energieeffizienz des Gesamtsystems durch den Einsatz von Rekuperationsverfahren gesteigert werden. Zur Realisierung der Rekuperation erweisen sich insbesondere elektrische Speichersysteme als geeignet. Arbeitet der Servomotor als Generator, kann die umgewandelte Energie in einem Akkumulator oder einem (Super-)Kondensator gespeichert werden [16]. Die gespeicherte Energie kann nachfolgend zur Unterstützung des Motors verwendet werden. Aufgrund der geringen typischen Lastwechselzeit erscheint eine Implementierung in hochdynamischen Anwendungen denkbar [17]. Die elektrische Leistung  $P_{el}$  eines Servomotors kann nach [18] durch folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$P_{el} = \frac{2}{3} R \cdot \left( \frac{M_{An}}{z_p \cdot \psi_{pm} \cdot i_g} \right)^2 + \omega \cdot M_{An} \quad (2)$$

Hierbei bezeichnen  $\psi_{pm}$  den konstanten Fluss,  $R$  den Widerstand der Statorwicklung,  $z_p$  die Polzahl,  $M_{An}$  das Antriebsmoment,  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit und  $i_g$  das Übersetzungsverhältnis. Über die elektrische Leistung kann dann bei einer gegebenen Zeit  $t$  auf die insgesamt vom System benötigte Energie geschlossen werden.

Auch eine Kombination aus mechanischen und elektrischen Lösungen ist möglich. Hierbei wird die überschüssige Energie verwendet, um einen zweiten Servomotor zu beschleunigen. Am Rotor des zweiten Servomotors ist ein Schwungrad befestigt. Die überschüssige Energie wird in Form von kinetischer Energie im Schwungrad gespeichert und kann später wieder in elektrische Energie umgewandelt werden, um den primären Servomotor anzutreiben [19].

Es ist zu untersuchen, ob die Energieeffizienz mithilfe dieser Ansätze sinnvoll erhöht werden kann.

## 4.2 Änderung des Niveaus der potenziellen Energie

Das Energieniveau des Bewegungssystems hängt von der im System gespeicherten kinetischen und potenziellen Energie ab. Da es nicht immer möglich ist, das Energieniveau des Systems für eine gewünschte Bewegung vollständig durch Änderung des Verlaufs der kinetischen Energie zu glätten, müssen andere Optionen in Betracht gezogen werden. Es sollen verschiedene Möglichkeiten untersucht werden, die das Niveau der potenziellen Energie während der Bewegung verändern. Die Praktikabilität von Ansätzen wie dem Anbringen von Federn und Magneten oder der Energiespeicherung in flexiblen Verbindungen soll durch Simulationen analysiert werden. Basierend auf dieser Analyse sollen realisierbare Optionen identifiziert werden.

## 4.3 Dynamisches Auswuchten

Beim dynamischen Auswuchten werden sowohl die kinematischen als auch die Massenparameter der Mechanik berücksichtigt. Dynamisches Auswuchten umfasst Massenausgleich, Gelenkkräftenausgleich und Leistungsausgleich. Der Massenausgleich beinhaltet die Reduzierung der Gestellkräfte und -momente. Gelenkkräftenausgleich bezeichnet die Veränderung der Kräfte, die in einem oder mehreren Gelenken des Mechanismus wirken. Verschiedene Ziele wie die Minimierung der absoluten Gelenkkräftewerte oder die Vermeidung des Kontaktverlustes der Gelenkpaare können berücksichtigt werden. Der Leistungsausgleich bewirkt die Spitzenglättung des Eingangsdrehmoments und der Eingangsleistung des Mechanismus. Dies kann durch das Modifizieren des Eingangsdrehmoments erreicht werden, welches benötigt wird, um den Mechanismus anzutreiben und potenzielle Kräfte, Reibung und mögliche Prozesskräfte zu überwinden. Ziele sind die Erhöhung der Energieeffizienz des Mechanismus durch das Senken des Energieverbrauches oder durch die reduzierte Anregung von Torsionsschwingungen der Antriebswelle. Die einfachste Methode ist die Verwendung eines Schwungrads. Durch Erhöhung des Massenträgheitsmoments der Antriebswelle wird die relative Schwankung der Energie verringert.

Die verschiedenen Maßnahmen des dynamischen Auswuchtens sollen zunächst simulativ und im späteren Verlauf des Projektes an einem Prüfstand untersucht werden.

## 5 Zusammenfassung

Mithilfe der in diesem Beitrag diskutierten Ansätze soll die Energieeffizienz von Rastgetrieben erhöht werden. Durch das Berücksichtigen des Antriebsbewegungsdesigns und der Getriebesynthese wird eine effiziente Erzeugung von Rastbewegungen in hochdynamischen Maschinen möglich. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen sollen die entwickelten Methoden zukünftig an einem Prüfstand validiert werden. Die Integration der Methoden in ein bestehendes Softwaretool soll zur Auslegung energieeffizienter Rastmechanismen ohne große Fachkenntnisse befähigen. Die Ergebnisse dieses Projekts sollen dazu beitragen, eine höhere Anzahl energieeffizienter Rastmechanismen in hochdynamischen Produktionsmaschinen zu etablieren.

## 6 Literatur

- [1] McKane, A.; Prince, L.; de la Rue du Can, S.: *Policies for Promoting Industrial Energy Efficiency in Developing Countries and Transition Economies*. In: Sustainable Industrial Development, Commission for Sustainable Development. (2007) 1-2, ISSN 1867-2590, S. 11-22.
- [2] European Commission: *EU climate action*. [https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu\\_en](https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_en). Zugriff am 22. November 2022.
- [3] Janson, M.: *Energie deutlich teurer als vor einem Jahr*. <https://de.statista.com/infografik/26152/verbraucherpreisindizes-fuer-energie-in-deutschland/>, 15. März 2022. Zugriff am 22. November 2022.
- [4] Dresig, H.; Vul'fson, I. I.: *Dynamik der Mechanismen*. Wien, New York: Springer, 1989. ISBN 978-3-7091-9036-4.
- [5] VDI-Richtlinie 2142, *Auslegung ebener Kurvengetriebe – Grundlagen, Profilberechnung und Konstruktion*. Standard, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [6] Müller, M.; Grätz, J.; Hüsing, M.; Corves, B.: *Flexibilisierung von Verarbeitungsprozessen mittels servogesteuerter Kurvengetriebe*. In: *Verarbeitung & Verpackung 4.0: VVD 2018 - Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik: Tagungsband: 15./16. März 2018, Dresden/Radebeul / Technische Universität Dresden, VDMA, Fraunhofer IVV*.
- [7] VDI-Richtlinie 2149, *Blatt 1: Getriebedynamik: Starrkörper-Mechanismen*. Standard, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [8] Dresig, H.; Holzweißig, F.: *Maschinendynamik*. Berlin: Springer, 2016, ISBN 978-3-662-52712-2.
- [9] Norton, R. L.: *Design of Machinery*. McGraw-Hill Education (ISE Editions), 2004, DOI 10.1115/1.1605770.
- [10] Kerle, H.; Corves, B.; Hüsing, M.: *Getriebetechnik: Grundlagen, Entwicklung und Anwendung ungleichmässig übersetzender Getriebe*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 5. Auflage, 2015, ISBN 978-3-658-10056-8.
- [11] Shiakolas, P. S.; Koladiya, D.; Kebrle, J.: *On the optimum synthesis of six-bar linkages using differential evolution and the geometric centroid of precision positions technique*. In: *Mechanism and Machine Theory*, 2005, DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2004.07.005.
- [12] Shimojima, H.; Ji, G. L.: *Dimensional Synthesis of Dwell Function Generators (On 6-Link Stephenson Mechanisms)*. JSME international journal, 1987, Volume 30, Issue 260, Pages 324-329. DOI 10.1299/jsme1987.30.324.
- [13] Dresig, H.; Fidlin, A.: *Schwingungen mechanischer Antriebssysteme: Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2014. DOI 10.1007/978-3-662-59137-6.
- [14] Schwarzfischer, F.; Hüsing, M.; Corves, B.: *The Dynamic Synthesis of an Energy-Efficient Slider-Crank Mechanism*. In: *Proceedings of the International Symposium of Mechanism and Machine Science*, 2017, DOI 10.1007/978-3-319-79111-1.
- [15] Schwarzfischer, F.; Hüsing, M.; Corves, B.: *The Dynamic Synthesis of an Energy-Efficient Watt-II-Mechanism*. In: *Carvalho, J. C. M. et al., Multi-body Mechatronic Systems*, Cham: Springer International Publishing, 2018, DOI 10.1007/978-3-319-67567-1\_20.
- [16] McCluer, S.; Christin, J.-F.: *Comparing Data Center Batteries, Flywheels, and Ultracapacitors*. In: *White Paper 65 Revision 2*, Schneider Electric, 2011.
- [17] Sardar, A.; Dey, R. K.; Muttana, S. B.: *A Deep Dive into Kinetic Energy Recovery Systems - Part II*. In: *Auto Tech Review*, 4 (2015) 7, pp. 20–25, DOI 10.1365/s40112-015-0942-5.
- [18] Lorenz, M.; Paris, J.; Schöler, F.; Barreto, J.-P.; Mannheim, T.; Hüsing, M.; Corves, B.: *Ansatz zur energieeffizienten Bahnplanung und Maßkonfiguration für den fünfgliedrigen Roboter RePlaLink*. In: *Bertram, T.; Corves, B.; Janschek, K. (Eds.), Fachtagung Mechatronik 2017, Dresden: Technische Universität, 2017, ISBN 3000558322*.
- [19] Trzesniowski, M.: *Rennwagentechnik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme*. Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 2012, DOI 10.1007/978-3-8348-2209-3.

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

In: Neunte IFToMM D-A-CH Konferenz 2023

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/77387

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20230314-143648-3



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz (CC BY-SA 4.0) genutzt werden.