

Barej, Martin, Dipl.-Ing.  
Mannheim, Tom, Dipl.-Ing.  
Kurtenbach, Stefan, Dipl.-Ing.  
Mbarek, Taoufik, Dr.-Ing.  
Hüsing, Mathias, Dr.-Ing.  
Pelzer, Stefan, Dipl.-Ing.  
Corves, Burkhard, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.

# **Leistungssteigerung einer Verpackungsmaschine durch anwendungsorientierte Getriebeauslegung**

## **1 Einleitung**

Getrieben durch einen rapid wachsenden Verbrauchermarkt für Lebensmittel und Getränke, insbesondere in Schwellenländern wie China, Brasilien und Indien, werden an den Verpackungssektor hohe Anforderungen hinsichtlich der Verpackungsqualität und -formen und nicht zuletzt der Stückzahl gestellt. Bei der Entwicklung von Verpackungssystemen stellt die Leistungssteigerung das vorrangige Ziel für die Verpackungsmaschinen- und Packstoffhersteller dar. Die SIG Combibloc Systems GmbH, einer der weltweit führenden Systemanbieter von Packstoff und entsprechenden Füllmaschinen für Getränke und Lebensmittel, hat sich als Ziel gesetzt, die Leistung eines ihrer Verpackungssysteme um 50 % zu steigern. Dabei soll die Stückzahl von 24.000 auf 36.000 Verpackungen pro Stunde erhöht werden, ohne dabei die Zahl der gleichzeitig befüllten Verpackungen und damit die Breite der Maschine zu verändern.

Für die angestrebte hohe Taktzeit wurde die Baugruppe „Boden-Längsfaltergetriebe“ als einschränkender Faktor identifiziert. Diese neigt aufgrund der hohen Dynamik zu Schwingungen und kann bei der zu erzielenden Leistungssteigerung einen stabilen Prozess nicht mehr gewährleisten. Daher war es Ziel eines gemeinsamen Projektes der SIG Combibloc Systems GmbH mit dem Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik der RWTH Aachen eine alternative Lösung für das Längsfaltergetriebe zu entwickeln, die das Potential dazu hat, eine deutliche Leistungs- bzw. Taktzeitsteigerung zu ermöglichen. Dazu wurden zunächst neue kinematische Strukturen und Antriebsvarianten zur Lösung der Bewegungsaufgabe identifiziert und anschließend durch geeignete Maßsyntheseverfahren notwendige Getriebeparameter ermittelt.

## 2 Aufgabenstellung und Analyse der Bewegungsaufgabe

Das Faltmuster und die Verpackungsform sind durch Falzen bzw. Längs- und Querrillen bestimmt, die bei der Fertigung der Verpackungsmäntel eingepreßt werden. Während des Faltvorgangs ist der Karton auf einen Dorn aufgestülpt und wird durch dessen Rotation in den Arbeitsbereich von Längsfalter und Bodenpresse eingebracht. Dabei wird die vordefinierte Form am Verpackungsboden zunächst durch sogenannte Querfalter initiiert. Exakt in dem Moment, in dem der Karton mit der ersten Kante der Bodenpresse in Kontakt kommt, trifft auf der Rückseite das Längsfalterblech genau in die vorgesehene Falz. Ab hier bewirken die präzise aufeinander abgestimmten Bewegungen des weiterdrehenden Dornrades und des eintauchenden Längsfalters in Verbindung mit dem Umklappen an der Bodenpresse den erwünschten Faltprozess. Zum Schluss wird das Längsfalterblech wieder zurückgezogen, sodass die Bodenpresse hochfahren und den Boden versiegeln kann. Die für den Prozess maßgeblichen Komponenten sind in Bild 1 dargestellt.

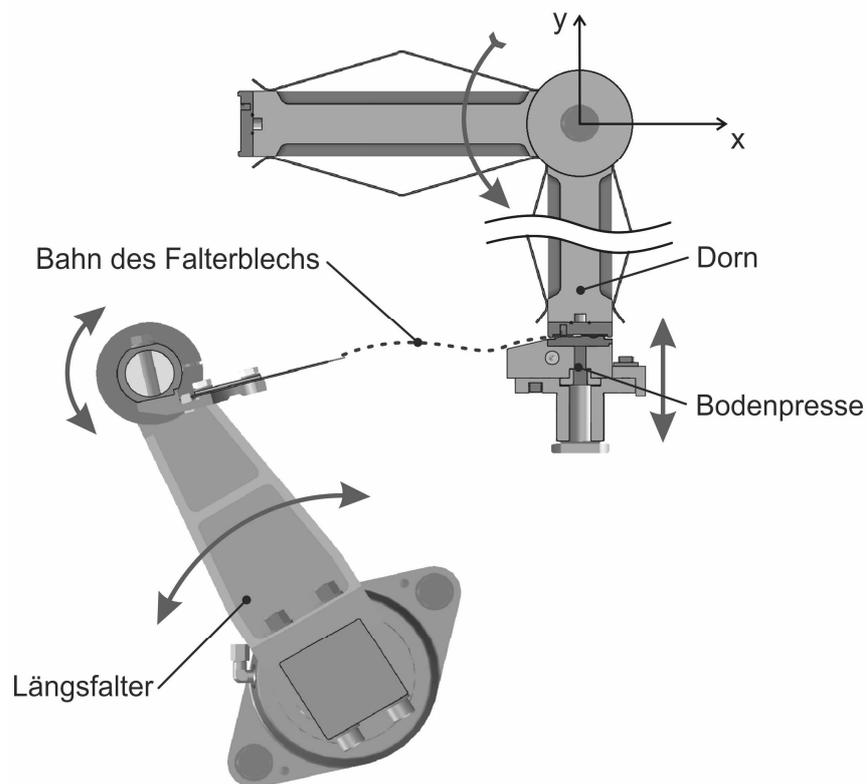


Bild 1: Längsfaltergetriebe Schnittdarstellung

Eine alternative Lösung für das vorhandene Längsfaltergetriebe muss in die bestehende Anlage integriert werden. Daher werden an den zu entwickelnden Mechanismus sehr strikte Anforderungen gestellt, einerseits bezüglich der Geometrie und Kinematik und andererseits bezüglich der zeitlichen Synchronisierung mit den anderen Komponenten. Für die anstehende Struktursynthese ist es zweckmäßig die Anforderungen in diese zwei Gruppen zu unter-

teilen. Damit bietet sich die Möglichkeit zunächst die geometrischen und kinematischen Herausforderungen der Bewegungsaufgabe zu lösen und anschließend auf dieses Teilgetriebe zugeschnittene Lösungen für die zeitliche Abstimmung zu suchen.

In Bild 2 ist der derzeitige Verlauf der x,y-Koordinaten der Längsfalterspitze dargestellt. Anhand dieser Koppelpunktcurve und an CAD-Modellen durchzuführender Bauraumuntersuchungen ergeben sich die folgenden geometrischen Anforderungen:

- Bauraum und Bewegungsraum sind durch die Anlage und darin befindliche bewegliche Komponenten (z.B. Dornrad) vorgegeben
- Ausgangsbasis für die Führungsaufgabe ist die aktuelle Bewegung des Längsfalterblechs, eine genäherte Kreispunktführung um eine bewegte Faltachse
- eine Punktführung ist ausreichend sofern die Orientierungsänderungen gering bleiben, sodass Prozesskräfte in erforderlicher Wirkrichtung aufgebracht werden können und keine Kollisionen auftreten
- die Kontaktstelle (eingeprägte Falz) muss exakt getroffen werden
- ab der Kontaktstelle ist in der Vorwärtsbewegung die vorgegebene Koppelkurve innerhalb eines Toleranzbandes von +0,02/-0,00 mm in y-Richtung einzuhalten
- die Koppelkurve soll möglichst gespitzt sein, um die Rückwärtsbewegung aus dem gefalteten Karton heraus zu ermöglichen
- in der Rückwärtsbewegung sind alternative Bahnen zulässig, es ist jedoch auf Kollisionsfreiheit zu achten

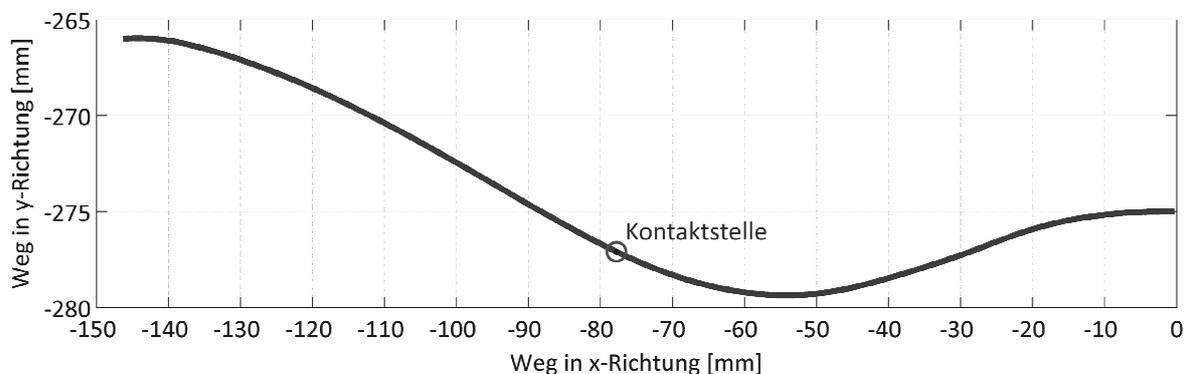


Bild 2: Koppelpunktcurve der Längsfalterspitze

Die zeitlichen Anforderungen und damit das benötigte Bewegungsprofil resultieren aus der erwünschten Leistungssteigerung sowie der erforderlichen Synchronisierung des Längsfalters mit dem Dornrad und der Bodenpresse. Als erster Schritt soll jedoch zunächst das aktuelle Bewegungsprofil der Längsfalterspitze (Bild 3) abgebildet werden.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- die Taktzeit beträgt 900ms
- das Längsfalterblech muss zu dem Zeitpunkt auf die Kontaktstelle treffen, zu dem die Rückseite des Kartons an der Bodenpresse anschlägt (Kontaktpunkt in Bild 3)

- ab dem Kontaktzeitpunkt bis zum Erreichen des Umkehrpunktes muss die Bewegung des Längsfalters synchronisiert mit dem Dornrad ablaufen

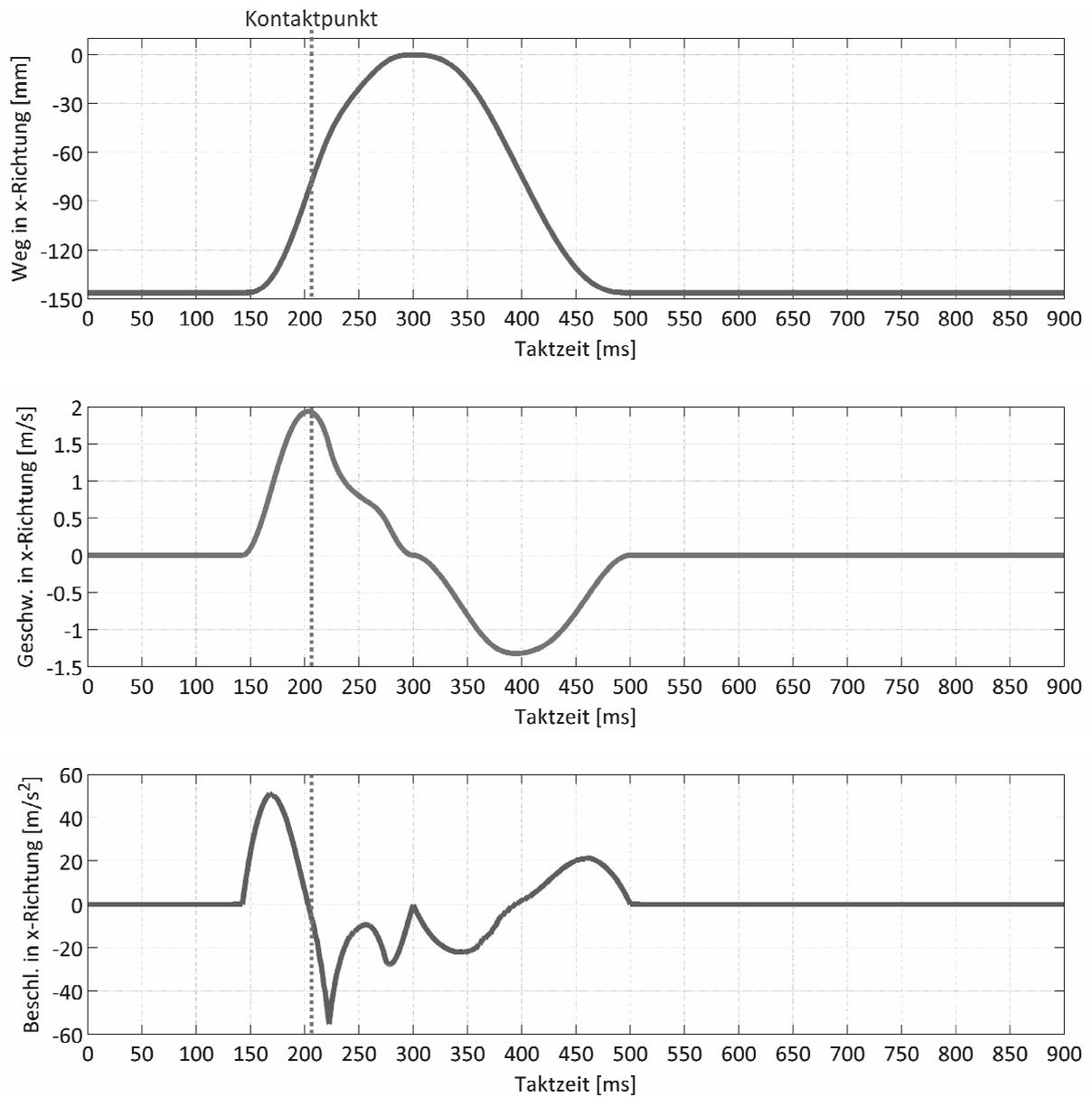


Bild 3: Bewegungsprofil der Längsfalterspitze in x-Richtung

### 3 Struktursynthese

Nachdem die Aufgabenstellung geklärt ist und die Anforderungen an die zu entwickelnde Lösung formuliert sind, besteht der nächste Schritt darin, geeignete kinematische Strukturen zu identifizieren. Dabei werden die Aufgaben des Längsfaltergetriebes, wie schon bei den Anforderungen, in Realisierung der geometrischen sowie der zeitlichen Vorgaben aufgeteilt.

Die Identifikation geeignet erscheinender Strukturen erfolgt primär anhand der Frage, ob die erforderliche Bewegung der Längsfalterspitze durch die Struktur grundsätzlich realisierbar erscheint. Die Koppelkurve der Längsfalterspitze wurde durch langjährige Prozessanpassung als geeignet identifiziert. Prinzipiell kann das Längsfaltergetriebe im Gestell, am Dornrad oder an der Bodenpresse angebracht werden (Bild 4). Da eine konstruktive Veränderung von Dornrad bzw. Bodenpresse vom Anlagenhersteller zunächst ausgeschlossen ist, wird allein eine Lagerung im Gestell betrachtet.



Bild 4: Variation des Bauraums

Die kinematischen Strukturen werden schrittweise aus den in Bild 5 zusammengestellten Strukturkomponenten aufgebaut. Diese Strukturkomponenten umfassen das geführte Glied, angeschlossene Glieder oder Gliedergruppen sowie Gelenktypen. Ausgangspunkt der vorgeschlagenen **sukzessiven Struktursynthese** ist das geführte Glied, mit dem die Längsfaltung erzeugt wird. Grundsätzlich kann dieses mit einem, zwei, drei oder weiteren Gelenken ausgestattet sein (Bild 5, Zeile 1). Bei Ausstattung mit einem Gelenk spricht man von einem singulären Glied. Weitere Gelenke führen zu binären und ternären Gliedern usw.. An jedem Gelenk des geführten Gliedes kann ein Glied oder eine Gliedergruppe entsprechend der 2. Zeile in Bild 5 angeschlossen werden. Natürlich weisen auch die Glieder und Gliedergruppen Gelenke auf, wobei Gelenke zum Anschluss an das geführte Glied mit A und Gestellgelenke mit G gekennzeichnet sind. Ein Sonderfall besteht, wenn das geführte Glied direkt im Gestell gelagert wird. Hier ist entsprechend der vorgestellten Vorgehensweise „kein Glied“ auszuwählen. Das Anschlussgelenk A dient dann auch gleichzeitig als Gestellgelenk G. Der Gelenktyp für jedes Gelenk wird entsprechend Zeile 3 in Bild 5 festgelegt.

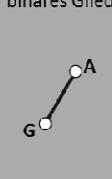
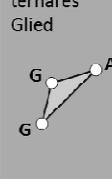
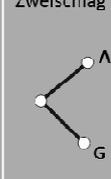
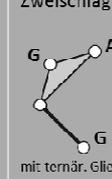
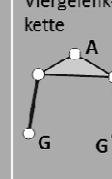
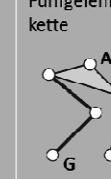
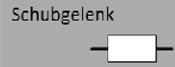
<b>geführtes Glied</b>	singuläres Glied 	binäres Glied 	ternäres Glied 	...				
<b>Glieder und Gliedergruppen</b>	kein Glied $A = G$ 	binäres Glied 	ternäres Glied 	Zweischlag 	Zweischlag mit ternär. Glied 	Viergelenk- kette 	Fünfgelenk- kette 	...
<b>Gelenktypen</b>	Drehgelenk 	Schubgelenk 		Kurvengelenk 	Wälzgelenk 			

Bild 5: Strukturkomponenten für die sukzessive Struktursynthese

Ein noch nicht berücksichtigter Aspekt ist die Wahl der Antriebsart. Bei dem momentanen, hohen Abstraktionsgrad ist eine Diskussion über Kurvenscheiben und Servomotoren oder die Möglichkeit der direkten Kopplung an den Maschinenantrieb noch nicht zweckmäßig. Stattdessen soll zunächst festgelegt werden, welcher Gelenktyp als Antriebsgelenk fungieren soll (Bild 6).

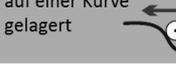
<b>Antriebs- gelenktyp</b>	drehend 	schiebend 	auf einer Kurve gelagert 	wälzend 
--------------------------------	---	---	--	---

Bild 6: Antriebsgelenktypen für die sukzessive Struktursynthese

Damit läuft die sukzessive Struktursynthese in den folgenden Schritten ab:

1. Wahl des geführten Gliedes (Zeile 1, Bild 5)
2. Wahl der anzuschließenden Glieder und Gliedergruppen entsprechend der Anzahl der Gelenke des geführten Gliedes (Zeile 2, Bild 5)
3. Wahl der Gelenktypen entsprechend der Gesamtzahl der Gelenke (Zeile 3, Bild 5)
4. Wahl der Antriebsgelenktypen entsprechend dem Laufgrad des Mechanismus (Bild 6)
5. Variation der möglichen Anordnungen

Die ersten vier Schritte der Synthese liefern einen Baukasten, dessen Inhalt noch auf unterschiedliche Weisen zusammengesetzt werden kann. Dies geschieht im 5. Schritt, der anhand eines Beispiels erläutert wird. Für die Auswahl

- binäres geführtes Glied,
- zwei binäre Glieder,
- drei Drehgelenke und ein Schubgelenk sowie
- drehender Antrieb

ergeben sich nach entsprechender Variation der möglichen Anordnungen sechs Lösungen. In Bild 7 sind diejenigen drei Lösungen dargestellt, die über einen im Gestell gelagerten Antrieb verfügen. Drei weitere Varianten sind möglich, wenn mitbewegte Antriebe in Betracht gezogen werden.

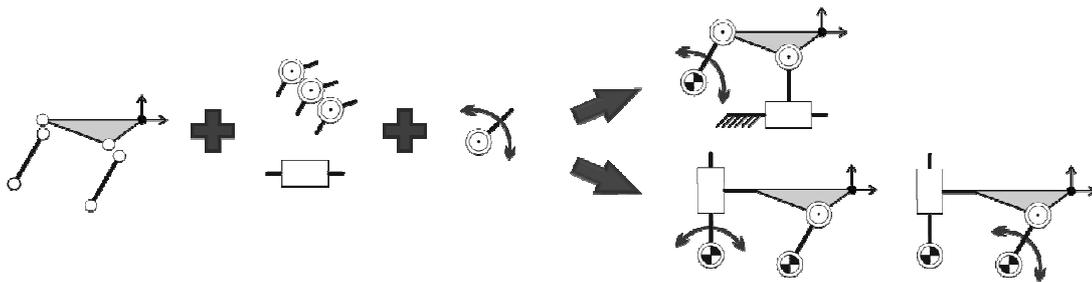


Bild 7: Variation der Anordnung

Durch die entstehende Vielfalt an Varianten wird deutlich, dass die Erfahrung des Konstrukteurs und Kenntnisse der Getriebetechnik erforderlich sind, um die Lösungsmenge einzuschränken. Bereits eine qualitative Prüfung ergibt, welche Lösungen die kinematischen Anforderungen nicht erfüllen können oder technisch nicht sinnvoll sind. So konnte die Lösungsmenge für die vorliegende Aufgabe durch die qualitative Prüfung auf 82 mögliche Strukturen eingeschränkt werden. Ausgewählte Beispiele sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Koppelgetriebe offene kinematische Ketten		
Koppelgetriebe hybride kinematische Ketten		
Koppelgetriebe geschlossene kinematische Ketten		
Kurvengetriebe		
Räderkoppelgetriebe		

Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse der Struktursynthese

Für eine ausführliche Bewertung und Auswahl von Strukturen für die spätere Maßsynthese muss das Lösungsfeld weiter reduziert werden. Die Eignung einer Struktur wird sich erst nach erfolgter Maßsynthese zeigen. Die Strukturen können aber schon zum jetzigen Zeitpunkt auf folgende potentielle Nachteile untersucht werden:

- zu viele Glieder
- zu viele Antriebe
- zu viele Gestellgelenke
- enthält Schubgelenke
- enthält Kurvengelenke
- enthält Wälzgelenke
- am Schubglied angetrieben
- am kurvengeführten Glied angetrieben
- am wälzenden Glied angetrieben

Da nicht alle Nachteile den gleichen Einfluss auf die Bewertung der Struktur haben, wird deren Gewichtung ermittelt. Eine einfache und bewährte Methode dazu ist der paarweise Vergleich mit Hilfe einer Dominanzmatrix /PAHL2007/. In der anschließenden qualitativen Bewertung werden den Strukturen für jedes Kriterium 0-4 Punkte vergeben, wobei 0 Punkte der besten und 4 Punkte der schlechtesten Struktur im Feld entsprechen. Die erstellte Bewertungstabelle ist auszugsweise in Bild 8 dargestellt.

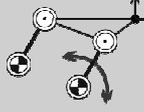
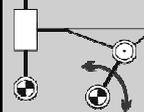
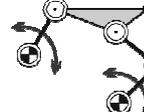
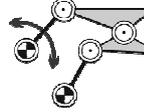
Lösungsbezeichnung	4G-1		4G-5		5G-1		6G-1		
									
Lösungsabbildung					...				
Bewertungskriterien	Gew. Faktor	ohne Gew.	mit Gew.	ohne Gew.	mit Gew.	ohne Gew.	mit Gew.	ohne Gew.	mit Gew.
zu viele Glieder	0,2	2	<b>0,4</b>	2	<b>0,4</b>	3	0,6	4	0,8
zu viele Antriebe	0,25	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	2	0,5	0	0
zu viele Gestellgelenke	0,1	2	<b>0,2</b>	2	<b>0,2</b>	2	0,2	4	0,4
Verw. von Schubgelenken	0,05	0	<b>0</b>	2	<b>0,1</b>	0	0	0	0
Verw. von Kurvengelenken	0,05	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	0	0
Verw. von Wälzgelenken	0,05	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	0	0
Antrieb am Schubglied	0,1	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	0	0
Antrieb am kurvengef. Glied	0,1	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	0	0
Antrieb am wälzenden Glied	0,1	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	0	0
<b>Σ</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>0,6</b>	<b>6</b>	<b>0,7</b>	<b>7</b>	<b>1,3</b>	<b>8</b>	<b>1,2</b>

Bild 8: Bewertungsdurchführung

Das Bewertungsergebnis stellt aufgrund der strukturierten und nachvollziehbaren Vorgehensweise eine belastbare Aussage darüber dar, welche Strukturen weiterverfolgt werden sollten. Die quantitativen Ergebnisse liegen jedoch zum Teil sehr dicht beieinander. Sicher-

heit gegen eventuelle Fehleinschätzungen bietet die Sensibilitätsanalyse /BREI1997/, die Aufschluss über die Robustheit der Bewertung gegenüber veränderten Gewichtungsfaktoren oder vergebenen Punkten gibt. Bild 9 stellt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für das Kriterium „zu viele Glieder“ dar.

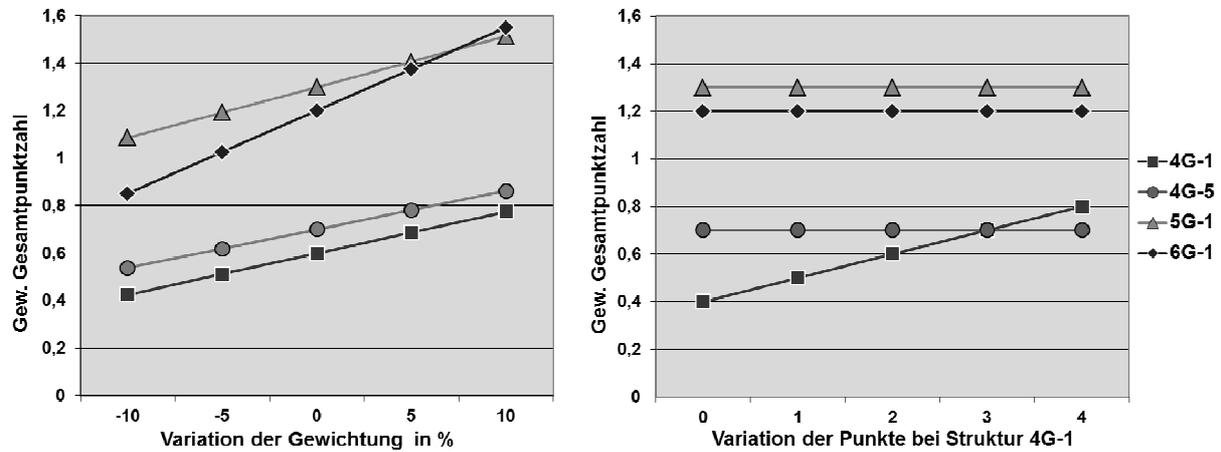


Bild 9: Sensibilitätsanalyse für das Kriterium „zu viele Glieder“

Im Zweifelsfall kann auch die detaillierte Betrachtung der Ergebnisse zweier Strukturen eine weitere Differenzierung ermöglichen. So ist beispielsweise auf Erfahrungsbasis zu entscheiden, ob bei gleichem Bewertungsergebnis eine Struktur mit gleichmäßig verteilten kleinen Schwächen oder eine Struktur mit ausgeprägten Stärken und Schwächen den Vorzug erhält. Dazu kommen strategische Aspekte wie der Vorzug bestimmter Bauformen und Strukturen, weil auf bestehende Erfahrungen zurückgegriffen werden kann oder auch die bewusste Entscheidung für ein neuartiges Konzept, welches das bestehende Portfolio erweitern kann.

Für die Neuentwicklung des Längsfaltergetriebes wurden zwei viergliedrige Strukturen ausgewählt. Die mit 4G-1 bezeichnete Struktur (Bild 8) weist vier Drehgelenke auf und wird je nach Ergebnis der Maßsynthese zu einer Kurbel- oder Doppelschwinge führen. Die Struktur 4G-5 (Bild 8) enthält ein mitbewegtes Schubgelenk und damit ein Schleifenglied.

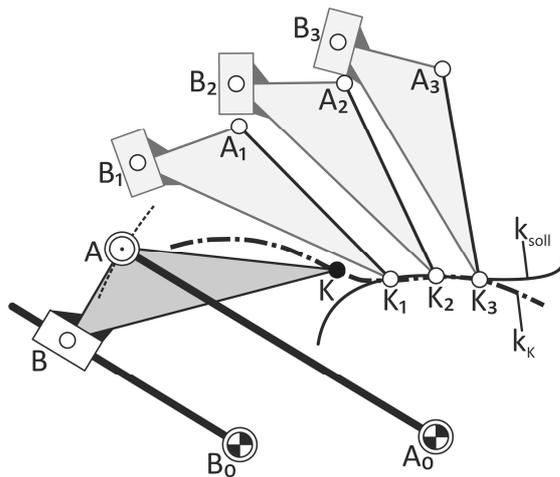
## 4 Maßsynthese

Nachdem im vorhergehenden Arbeitsschritt zwei Strukturen ausgewählt wurden, ist es Aufgabe der Maßsynthese die kinematischen Abmessungen für die ausgewählten Strukturen zu finden. Dazu werden grafische Maßsyntheverfahren verwendet, die auf dynamisch-interaktive Weise mit Hilfe des Geometriewerkzeugs GeoGebra /www01/ umgesetzt werden. Durch dieses Vorgehen kann der Konstrukteur mit seinem Erfahrungswissen in die Optimierung einbezogen werden, sodass auch unscharfe Anforderungen wie „kompakter Bauraum“ oder „geringe Änderungen der Koppelorientierung“ berücksichtigt werden können.

Um die Qualität der Maßsyntheseergebnisse beurteilen zu können, werden zunächst der verfügbare Bau- und Bewegungsraum, die erwünschte Koppelkurve und der zulässige Toleranzband in GeoGebra abgebildet. Die Koppelkurve kann dazu durch eine Fourierreihe angenähert und als analytische Funktion eingegeben werden. Anschließend wird für die Struktur 4G-5 der Maßsyntheseansatz über die Genauлагensynthese eingesetzt, während für die Struktur 4G-1 der Ansatz über die Vorgabe der Krümmung der Bahnkurve an einer definierten Stelle gewählt wird.

Für die Maßsynthese der Struktur 4G-5 werden drei ausgewählte Punkte der Koppelkurve ( $K_1, K_2, K_3$ ), die Geometrie des Koppelgliedes sowie die Lage des Gestellgelenks  $B_0$  vorgegeben (Bild 10). Dabei bietet bereits die Positionierung der zu durchfahrenden Punkte innerhalb des Toleranzbands großes Potential für die anschließende Optimierung der kinematischen Abmessungen. Die Vorgabe der Koppelgeometrie erfordert drei geometrische Parameter, zum Beispiel zwei Längen und einen Winkel, deren Wahl zunächst frei ist. In der grafischen Konstruktion ist lediglich darauf zu achten, dass die Koppel ihren Winkel zum Schleifenglied nicht ändern darf, da das Gelenk B keinen rotatorischen Freiheitsgrad, sondern einen translatorischen entlang der Verbindung  $B_0B$ , aufweist. Die Position des Gestellgelenks  $B_0$  ist innerhalb des Bauraums frei wählbar. Das Verfahren liefert drei Lagen  $A_1, A_2$  und  $A_3$  des Punktes A aus denen sich das noch fehlende Gestellgelenk  $A_0$  konstruieren lässt.

Anschließend sind durch Parametervariation die kinematischen Abmessungen so zu bestimmen, dass die Koppelkurve im relevanten Bereich das Toleranzband nicht verletzt, alle Glieder den Bewegungsraum des Dornrades verlassen können und Bauraumvorgaben eingehalten werden. Durch die dynamisch interaktive Modellierung führt die Veränderung einer Vorgabe automatisch zur Anpassung aller abhängigen kinematischen Abmessungen.



Vorgabe:

- 3 Punkte der Koppelkurve  $K_1, K_2, K_3$
- Geometrie des Koppelgliedes
- Lage des Gestellgelenks  $B_0$

Ausgabe:

- Lage des Gestellgelenks  $A_0$
- Koppelpunktkurve  $k_k$

Bild 10: Maßsyntheverfahren: 3 Punkte einer Koppelkurve

Die Ergebnisse der durchgeführten Maßsynthese bestätigen, dass Struktur 4G-5 grundsätzlich geeignet ist, die erwünschte Koppelkurve zu realisieren. Sie zeigen jedoch auch, dass sie die Summe der geometrischen Anforderungen nicht erfüllen kann. So sind bei den Syntheseergebnissen neben Bauraumverletzungen (Bild 11 links) und Kollisionen mit dem Dornrad auch große Orientierungsänderungen der Koppel (Bild 11 mitte) sowie eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Toleranzen feststellbar. Rechts in Bild 11 ist ein Ergebnis gezeigt, bei dem die Koppelkurve nicht geschlossen ist und im Bewegungsbereich des Dornrades endet. Die Fortführung der Koppelkurve gehört zur zweiten Zusammenbaulage des Getriebes. Damit ist die Struktur 4G-5 nur mit Einschränkungen verwendbar.

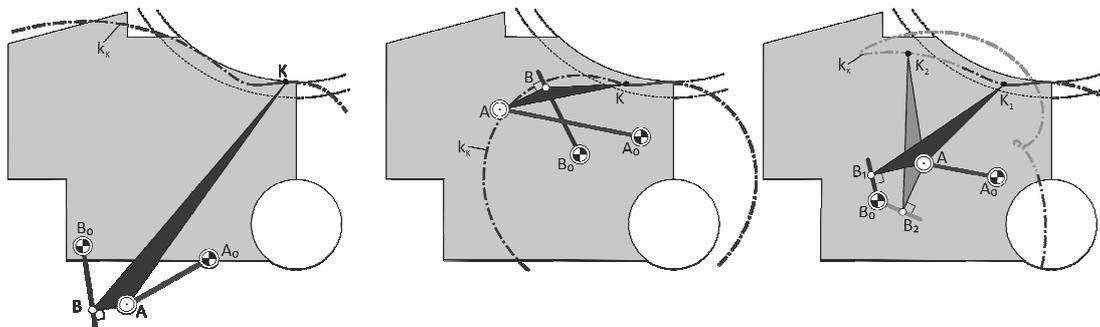
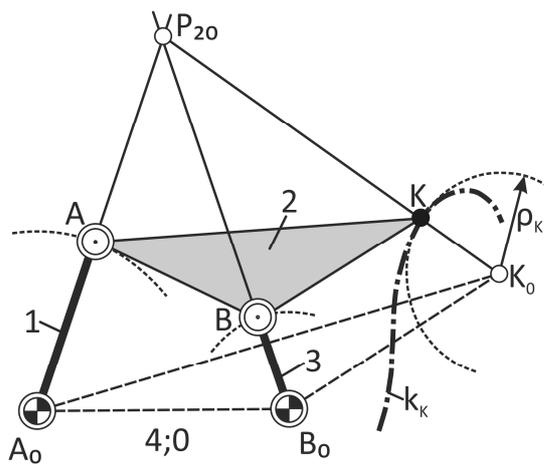


Bild 11: Maßsyntheseergebnisse der Struktur 4G-5

Für die Maßsynthese der Struktur 4G-1 werden für eine Stellung die Position des Koppelpunktes  $K$ , der zugehörige Krümmungsmittelpunkt  $K_0$ , die Lage der beiden Gestellgelenke  $A_0$  und  $B_0$  sowie die Lage des Koppelgelenks  $A$  vorgegeben. Durch die Vorgabe von  $K$  und  $K_0$  ist der Krümmungsradius  $\rho_k$  festgelegt. Die noch fehlenden Längen werden durch die Konstruktion nach Bobillier /KERL2011/ grafisch bestimmt (Bild 12). Damit sind alle kinematischen Parameter des Lösungsgetriebes festgelegt. Dieses ermöglicht eine kinematische Analyse des Getriebes. Jetzt kann die Einhaltung der geforderten Bahngenaugkeiten untersucht werden.



Vorgabe:

- Mittelpunkt des Krümmungsradius  $K_0$
- Berührungspunkt der Kreisbahn
- Lage der Gestellgelenke  $A_0$  und  $B_0$
- Lage des Koppelgelenks A

Ausgabe:

- Lage des Koppelgelenks B
- Koppelpunktcurve  $k_K$

Bild 12: Maßsyntheseverfahren: Krümmung der Bahnkurve, Satz von Bobillier

Durch Anpassung des Krümmungsradius  $\rho_K$  kann die Bahnkurve an die geforderte Koppelkurve angeschmiegt werden (Bild 13). Hiermit und durch die Vorgabe von Gestellgelenken  $A_0$ ,  $B_0$  und Koppelgelenk A wird dem Anwender eine anschauliche interaktive Anpassung des Getriebes an die Randbedingungen Bahngenauigkeit und Bauraum ermöglicht. Dabei kann das zur Verfügung stehende Toleranzband maximal ausgenutzt werden.

Die Änderung der Orientierung der Koppel kann auch bei diesem Verfahren erst im nach hinein beurteilt werden.

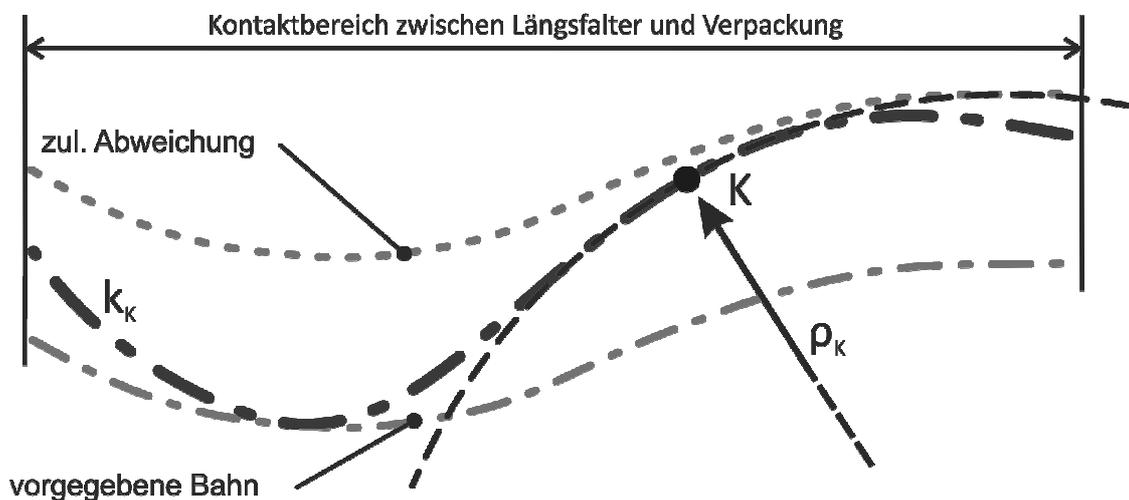


Bild 13: Ausnutzung des Toleranzbandes

Wie die in Bild 14 zusammengestellten Lösungen belegen, können für die Struktur 4G-1 kinematische Abmessungen gefunden werden, die die Aufgabenstellung unter Berücksichtigung aller Anforderungen erfüllen. Durch Variation der Vorgaben entstehen kinematisch unterschiedliche Lösungen, die noch untereinander verglichen werden müssen. So hat die

mittig dargestellte Lösung durch ihre Kompaktheit einen Vorteil gegenüber den beiden anderen. Weiterhin kann, verglichen mit der Lösung links in Bild 14, der größere Abstützhebel Vorteile bei der Kräfteinleitung bieten. Die rechts dargestellte Lösung hingegen hat den Vorteil, dass sie im betrachteten Bereich nur eine geringe Orientierungsänderung der Koppel erzeugt.

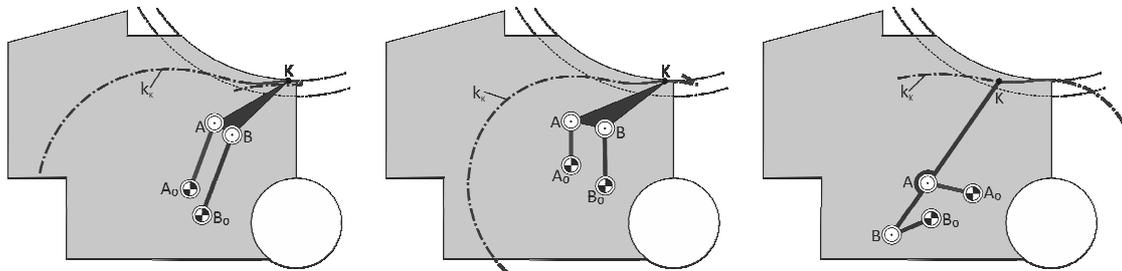


Bild 14: Maßsyntheseergebnisse der Struktur 4G-1

Aufgrund der kompakten Abmessungen und in Folge dessen geringen bewegten Massen, stellt die mittig in Bild 14 dargestellte Variante zu diesem Zeitpunkt die günstigste Lösung dar. Für eine abschließende Bewertung der Strukturen muss eine Analyse der dynamischen Eigenschaften und der Empfindlichkeit gegenüber Fertigungstoleranzen erfolgen.

Sind geeignete kinematische Abmessungen ermittelt, muss in den nachfolgenden Auslegungsschritten sichergestellt werden, dass der Mechanismus die Stützpunkte der Bahn zu den gewünschten Zeitpunkten erreicht. Dafür ist entweder der Einsatz eines Servomotors oder eines vorgeschalteten Kurvengetriebes zum Antrieb notwendig.

## 5 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Entwicklung von Bodenlängsfalter-Mechanismen für eine Getränke- und Lebensmittelfüllmaschine vorgestellt. Bei der Struktur- und Maßsynthese wurden strikte Anforderungen in Hinsicht auf die kinematische Struktur des Längsfalter-Mechanismus und die Bewegungstrajektorie des Längsfalterbleches eingehalten. Der Beitrag zeigt einen maßgeschneiderten Syntheseprozess, bestehend aus sukzessiver Struktursynthese und dynamisch-interaktiver Maßsynthese.

Im Rahmen weiterer Arbeiten sollen die bestbewerteten Strukturen einer kinetostatischen und dynamischen Analyse unter Berücksichtigung der Prozesskräfte unterzogen werden. Für den vielversprechendsten Längsfalter-Mechanismus sollen Strategien zum Massen- und Leistungsausgleich ausgearbeitet werden. Abschließend soll die Leistung des entwickelten Längsfalter-Mechanismus an einem rekonfigurierbaren Versuchsstand nachgewiesen werden.

## Literatur:

- /BREI1997/ BREIING, A.; KNOSALA, R.: Bewerten technischer Systeme.  
Berlin, Springer, 1997
- /KERL2011/ KERLE, H.; CORVES, B.; HÜSING, M.: Getriebetechnik.  
Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2011
- /PAHL2007/ PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre.  
Berlin, Springer, 2007
- /www01/ <http://www.geogebra.org/>