

Maßsynthese für Mechanismen

Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. Rainer Nolte,
Nolte NC-Kurventechnik GmbH, Bielefeld

Kurzfassung:

Zur Maßsynthese von Mechanismen gehören in der Praxis sicherlich sowohl numerische Methoden als auch ein strategisches Vorgehen. Numerische Methoden haben den Vorteil, daß beliebige Optimierungskriterien berücksichtigt werden können und nicht nur solche, die zu einem Lösungsweg der klassischen Getriebesynthese kompatibel sind. Andererseits bergen numerische Ansätze die Gefahr, daß man gar keine oder nur suboptimale Lösungen für eine Aufgabenstellung findet. Mit diesem Beitrag soll an Hand eines typischen Beispiels aus der Praxis eine numerisch orientierte Strategie zur Ermittlung der kinematischen Abmessungen von Mechanismen vorgestellt werden, wie sie seit vielen Jahren bei Nolte NC-Kurventechnik zum Einsatz kommt. Sie besteht im wesentlichen aus drei Schritten: Einflußgrößenberechnung zur Ermittlung der für die Zielfunktion relevanten Parameter, Suchfeldberechnung zur Ermittlung von Bereichen guter Lösungen im Parameterraum, Numerische Optimierung der Parameter zur Ermittlung der lokalen Optima im Parameterraum. Ein wichtiger Aspekt bei der Mechanismensuche ist die Formulierung der Zielfunktion, da oft mehrere konkurrierende Optimierungskriterien gleichzeitig berücksichtigt werden müssen und angemessen zu gewichten sind. Da die Formulierung der Zielfunktion oft nicht trivial ist, wird sie selbst zum Objekt einer Optimierung.

Abstract:

Finding the right dimensions for a mechanism is a matter of both numerical calculations and strategic decisions in practice. With numerical methods you may take arbitrary optimization criteria into account and not only those supported by classical synthesis methods. On the other hand there is no guarantee that you find the best possible solution or a solution at all with numerical methods. This article demonstrates a numerically oriented strategy for finding mechanism dimensions how it is practised by Nolte NC-Kurventechnik for many years: sensitivity analysis for finding the parameters relevant to the target function, searchfield calculation for finding areas of good solutions in the parameter room, numerical optimization of the parameters to find local optima. The target function as the quality measure for given dimensions is an important aspect because mostly there are several contradictory criteria for the optimization. So the target function itself is an object of the optimization.

1 Aufgabenstellung

Ein Produktabschieber mit der Masse 2 kg soll im Ex-Bereich Ausschußprodukte aussondern. Dafür ist ein Horizontalweg von 100 mm erforderlich. Der Ausschiebeweg hin und zurück muß innerhalb von 0.2s beendet sein. Der Abschieber soll möglichst horizontal bewegt werden, die zulässige vertikale Abweichung beträgt ± 0.5 mm. Er muß dabei auch senkrecht gehalten werden. Der Antrieb soll über einen Servomotor mit einer einfachen Steuerung erfolgen, die Lagesollwerte über Drehzahlrampen erzeugt. Um die Gelenke gut kapseln zu können, sollte der gesuchte Mechanismus nur Drehgelenke enthalten. Am Antrieb sollten möglichst kleine Antriebsmomente auftreten.

2 Mechanismenstruktur und -anordnung

Das Finden der am besten geeigneten Mechanismenstruktur und –anordnung ist vom Prinzip her die schwierigste Teilaufgabe bei der Mechanismensynthese, weil es immer viele unterschiedliche Ansätze gibt, eine bestimmte Bewegung auszuführen. Dieser Teilschritt ist nicht per Computer automatisiert, sondern erfordert Recherche oder Kreativität:

- Durcharbeiten von Mechanismenkatalogen (z.B. VDI-Richtlinie 2727 [2])
- Rückblick auf früher bearbeitete Projekte (Erfahrungsschatz)
- Anwenden fortgeschrittener Methoden der klassischen Getriebesynthese, die jedoch die allerwenigsten Praktiker beherrschen
- Nachdenken und schrittweises Entwickeln einer Mechanismenstruktur mit Hilfe einer Kinematiksoftware [1]

Für dieses Beispiel wurde aus der VDI-Richtlinie 2727, Blatt 2, der Mechanismenotyp Nr. 77 ausgewählt, mit dem angenäherte Geradfürungen erzeugt werden können.

Um den Mechanismus für die Berechnung zugänglich zu machen, sind die Glieder geeignet anzuordnen, und es sollten zu Beginn manuell kinematische Abmessungen so vorgegeben werden, daß die Gliedlagen des Mechanismus im vorgesehenen Bewegungsbereich berechenbar sind und der Mechanismus ganz grob seine Aufgabe erfüllt. Dabei dürfen die vorgegebenen Toleranzen aus der Aufgabenstellung noch deutlich überschritten werden.

3 Aufbau des Simulationsmodells

Mit der Software OPTIMUS MOTUS ® wird für diese erste Ausgangsanordnung ein kinematisches und kinetostatisches Simulationsmodell aufgebaut (Bild 1).

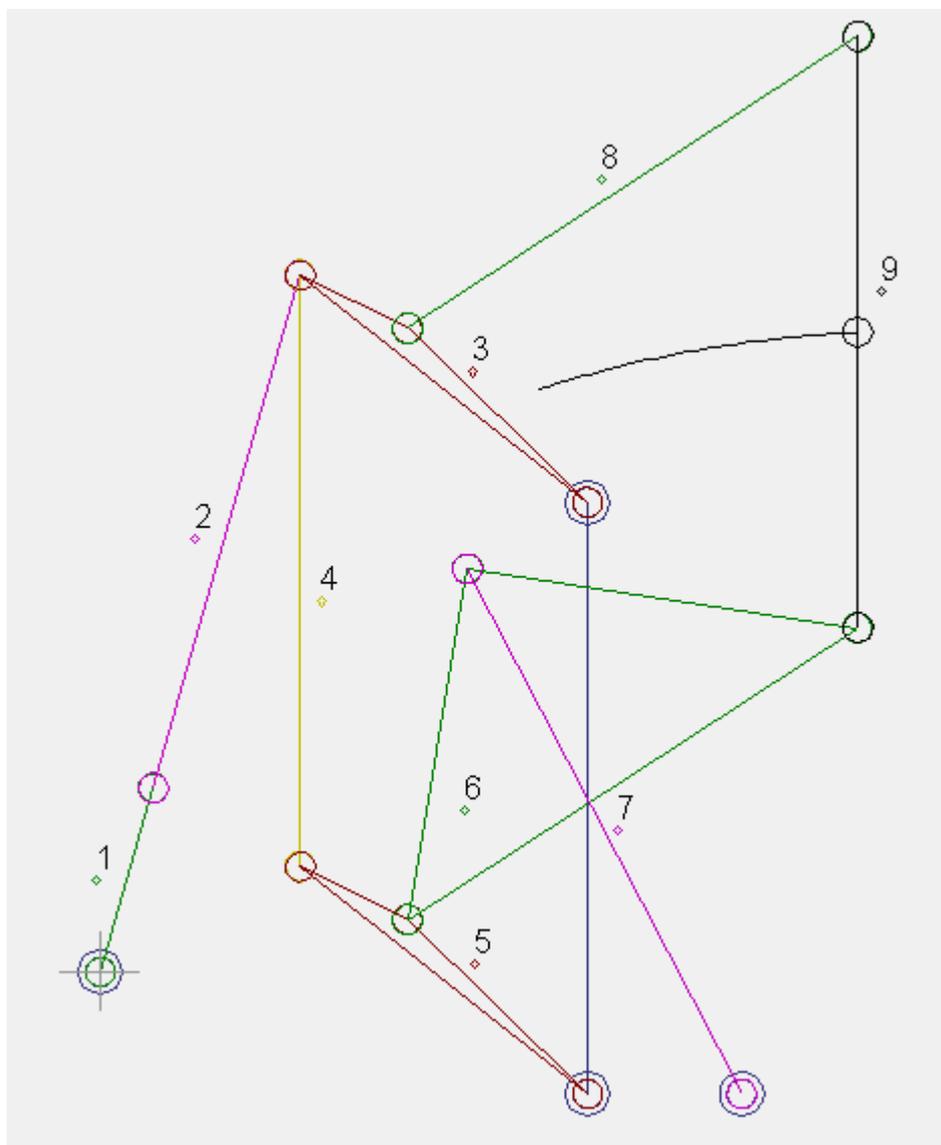


Bild 1: Mechanismenmodell nach Getriebekatalog VDI 2727

Sobald dieses vorläufige Modell mit konkreten Abmessungen läuft, werden für alle für die Optimierung denkbar relevanten kinematischen Abmessungen bzw. Einflußgrößen Parameter eingeführt (Bilder 2, 3a, 3b, 5). So entsteht zunächst eine große Anzahl von Parametern. Die Aufgabenstellung und die spezielle Art des Mechanismus geben Abhängigkeiten zwischen den Parametern vor, die bei dem Aufbau des parametrischen Simulationsmodells berücksichtigt werden

müssen, so daß nicht alle Parameter des Simulationsmodells frei für die Optimierung sind.

Datensatz: UDI_Aachen2005_Masssynthese_Mechanismen_Abschieber-2

Hinweise:

Konkrete Zahlenwerte sind nur vorläufige Zwischenwerte.

Parameter ohne Formeln sind freie Optimierungsparameter (markiert durch *).

```

Parameter 1: erw_alpha = atan(yd0/xd0) = 44.197903
Parameter 2: erw_beta1 = acos((erw_l*erw_l+(12+11)*(12+11)-14*14)/(2*(12+11)*erw_l)) = 29.916272
Parameter 3: erw_beta2 = acos((erw_l*erw_l+(12-11)*(12-11)-14*14)/(2*(12-11)*erw_l)) = 18.069284
Parameter 4: erw_l = sqrt(xd0*xd0+yd0*yd0) = 227.717806
Parameter 5: erw_phi1 = erw_alpha+erw_beta1 = 74.114174
Parameter 6: erw_phi2 = erw_alpha+erw_beta2+180 = 242.267107
* Parameter 7: geradenanteil1 = 0.3
* Parameter 8: geradenanteil2 = 0.3
* Parameter 9: phiumkehr = 180
* Parameter 10: l1 = 64.675604 mm
* Parameter 11: l2 = 180.293071 mm
* Parameter 12: dw1 = 5.752228 Grad
* Parameter 13: l4 = 123.139686 mm
* Parameter 14: l5 = 84.306716 mm
Parameter 15: erw_l3 = sqrt((xd0-xb0)*(xd0-xb0)+(yd0-yb0)*(yd0-yb0)) = 200 mm
Parameter 16: erw_dw1a = dw1 = 5.752228 Grad
Parameter 17: erw_l4a = l4 = 123.139686 mm
Parameter 18: erw_l5a = l5 = 84.306716 mm
* Parameter 19: dw2 = 47.255302 Grad
Parameter 20: erw_l6a = l6 = 180.293071 mm
* Parameter 21: l7 = 120.287181 mm
* Parameter 22: l8 = 200 mm
* Parameter 23: l6 = 180.293071 mm
Parameter 24: erw_l3a = erw_l3 = 200 mm
* Parameter 25: xb0 = 163.259122 mm
* Parameter 26: xc0 = 215.037897 mm
* Parameter 27: xd0 = 163.259122 mm
* Parameter 28: yb0 = -41.249069 mm
* Parameter 29: yc0 = -41.249069 mm
* Parameter 30: yd0 = 158.750931 mm

```

Bild 2: Mechanismenparameter

In diesem Beispiel bleiben 18 freie Parameter übrig, die sowohl die kinematischen Abmessungen des Mechanismus als auch die Gestaltung des Bewegungsdiagramms (Geradenanteile in den Übergängen, Lage des Umkehrpunktes) betreffen.

Das Simulationsmodell enthält auch die Massenträgheiten. Für die in ihren Abmessungen noch nicht festliegenden Getriebeglieder werden Massen und Massenträgheitsmomente für die folgenden Optimierungsschritte geschätzt. Sobald der optimierte Mechanismus später detailliert konstruiert ist, sollte er mit den konkreten Trägheiten nachgerechnet werden. Bei größeren Abweichungen wäre dann noch einmal in die Optimierungsphase einzusteigen.

Außer Trägheiten sind bei diesem Mechanismus keine weiteren Lasten zu berücksichtigen.

Weiterhin muß das Simulationsmodell kinematische Größen als Ausgangspunkte

4 Manuelle Voroptimierung

Um die Eigenheiten des Mechanismenstyps kennenzulernen und um die numerische Optimierung zu vereinfachen, empfiehlt es sich, eine grobe Voroptimierung der kinematischen Abmessungen von Hand zu versuchen.

Notwendig ist dieser Schritt jedoch nicht. Wenn noch keine konkretere Vorstellung davon vorliegt, welche groben kinematischen Abmessungen der Mechanismus haben muß, ist man auf das systematische Absuchen des Lösungsraums (Suchfeldberechnung) angewiesen.

Wird keine manuelle Voroptimierung durchgeführt, so ist der Suchbereich in der späteren Suchfeldberechnung entsprechend weit zu fassen.

Im konkreten Fall werden die Kurbellänge l_1 und die Lage x_{C0}/y_{C0} des Gestellpunkts rechts unten manuell so angepaßt, daß die Koppelkurve des Kontrollpunkts nach dem Augenschein eine Gerade mit der Länge ca. 100 mm beschreibt. Bei der manuellen Optimierung erkennt man beispielsweise, daß die Kurbellänge wesentlichen Einfluß auf die Länge der Geradföhrung hat und die Lage des Punktes C_0 auf die Geradheit der Koppelkurve.

5 Festlegen einer Zielfunktion

Grundlage für jede numerische Suche nach günstigen Parameterkombinationen für ein Mechanismenmodell ist ein skalares Qualitätskriterium für eine bestimmte Parameterkombination. Dieses Qualitätskriterium wird meist „Zielfunktion“ genannt. Die Zielfunktion wird in zweckmäßiger Weise aus den Parametern selbst und aus den Ergebnissen der kinematischen und kinetostatischen Analyse berechnet.

Was „zweckmäßig“ dabei bedeutet, legt der Berechnungsingenieur fest. In die Zielfunktion gehen in der Regel mehrere, oft auch konkurrierende Bewertungskriterien ein. Überschreiten Kontrollgrößen festgelegte Grenzen, so können diese Grenzwertverletzungen durch Straffunktionen berücksichtigt werden. Die für die Optimierung verwendete Zielfunktion ist dann eine Summe oder ein Produkt der geeignet gewichteten Einzelbewertungen und Straffunktionen. Werden die Teil-Zielfunktionen für die einzelnen Bewertungskriterien ungünstig formuliert, oder werden die Gewichtungen für die Bewertungskriterien unpassend verteilt, erhält man bei den numerischen Optimierungen zunächst leicht völlig ungeeignete Lösungen. Aus den Ergebnissen, die der Optimierungsprozeß mit den Zielfunktions-Prototypen erzielt, zieht man Schlüsse, wie die Komponenten

der Zielfunktion für den nächsten Optimierungsdurchlauf zu verbessern wären.

Das Festlegen der Zielfunktion ist der komplizierteste Teil der numerischen Maßsynthese von Mechanismen.

Der Optimierungsprozeß in OPTIMUS MOTUS ® minimiert dann den Betrag des Zielfunktionswerts.

Bild 4 zeigt die für diese Mechanismenoptimierung verwendete Zielfunktion.

```
dt=2
my_grenze=40
geradfuehrungstoleranz=1
geradfuehrungslaenge=100
# ----- Gerade durch lineare Regression feststellen
combine xy t x(t) y(t) 0 360 dt
linreg xy steigung yoffset
steigungswinkel=atan(steigung)
# ----- Gerade in die Horizontale drehen
# ----- Nach der Optimierung kann der gesamte Mechanismus so verschoben und
# ----- gedreht werden, daß die Geradfuehrung passend liegt
cw=cos(-steigungswinkel)
sw=sin(-steigungswinkel)
fn_xh t x(t)*cw-y(t)*sw 0 360 dt
fn_yh t x(t)*sw+y(t)*cw 0 360 dt
# ----- Länge der Geradfuehrung
xmax=max(t,0,360,xh(t))
xmin=min(t,0,360,xh(t))
lgerade=xmax-xmin
fehler1=lgerade-geradfuehrungslaenge
zielfn1=fehler1*fehler1
# ----- Quadratisches Mittel als Bewertung für die Geradfuehrungsgüte
# ----- Straffunktion für die Toleranzüberschreitung
ymax=max(t,0,360,yh(t))
ymin=min(t,0,360,yh(t))
ym=(ymax+ymin)/2
dy=ymax-ymin
fehler2a=integral(t,0,360,(yh(t)-ym)*(yh(t)-ym))
fehler2b=(dy-geradfuehrungstoleranz)*(dy>geradfuehrungstoleranz)*100
zielfn2=fehler2a+fehler2b
# ----- Effektivwert des Antriebsmoments ist meist wichtiger als das Maximalmoment
meff=sqrt(integral(t,0,360,kto_m1(t)*kto_m1(t))/360)
zielfn3=meff
# ----- Übertragungswinkel sollten jeweils möglichst nah an 90 Grad liegen
# ----- unterhalb von 40 Grad sehr unerwünscht
fehler4a=max(t,0,360,1/Fabs(sin(my1(t))))
zielfn4a=fehler4a*(1+100*(fehler4a>1/sin(my_grenze)))
fehler4b=max(t,0,360,1/Fabs(sin(my2(t))))
zielfn4b=fehler4b*(1+100*(fehler4b>1/sin(my_grenze)))
fehler4c=max(t,0,360,1/Fabs(sin(my3(t))))
zielfn4c=fehler4c*(1+100*(fehler4c>1/sin(my_grenze)))
fehler4d=max(t,0,360,1/Fabs(sin(my4(t))))
zielfn4d=fehler4d*(1+100*(fehler4d>1/sin(my_grenze)))
zielfn4=zielfn4a+zielfn4b+zielfn4c+zielfn4d
# ----- Baugroesse
groessenwert=11(0)+12(0)+16(0)
zielfn5=groessenwert
# ----- Gesamtzielfunktion
zielfn=-zielfn1*1-zielfn2*1-zielfn3*0.2-zielfn4*1-zielfn5*0.2
```

Bild 4: Zielfunktion

6 Eingrenzen der Optimierungsparameter

Je größer die Anzahl von Optimierungsparametern, desto schwieriger ist es meist, die besten Lösungen zu finden. Zunächst sollte also die Zahl der Optimierungsparameter so weit wie möglich eingegrenzt werden. Dafür gibt es zwei Ansätze: logisches Schlußfolgern und eine numerische Einflußgrößenberechnung.

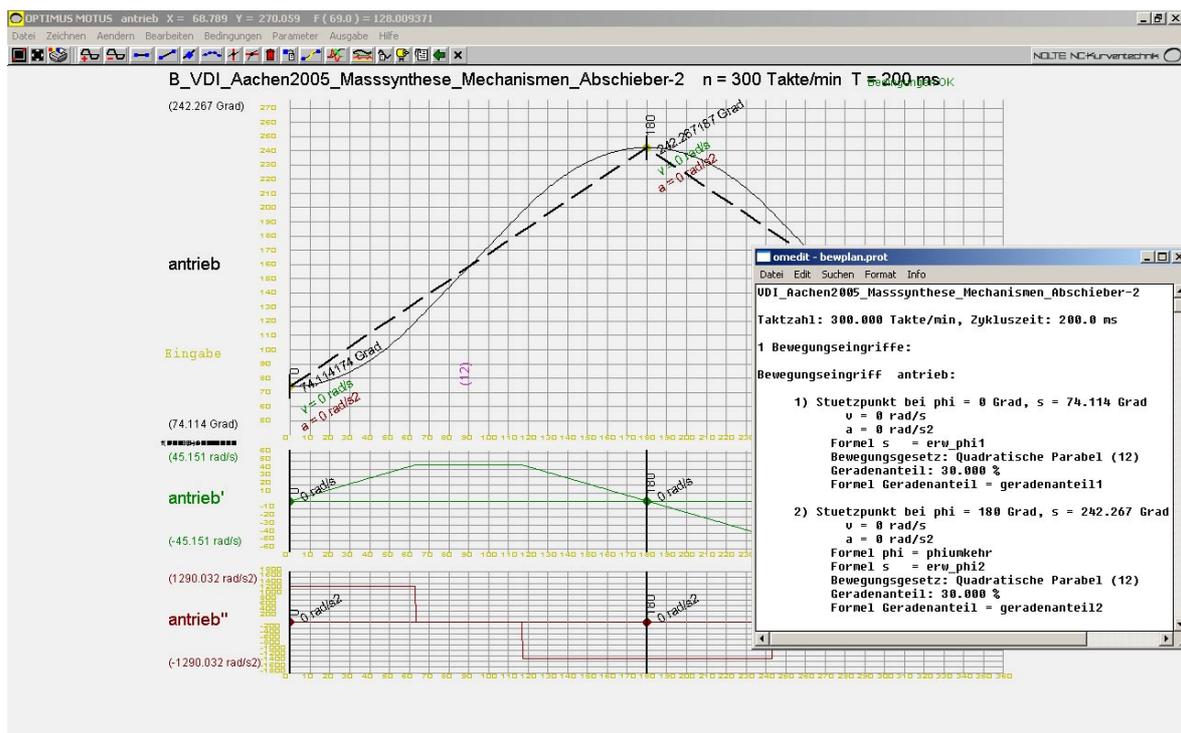


Bild 5: parametrischer Bewegungsplan

Die Kurbel muß ihre Drehbewegung in einer Totlage beginnen und in einer Totlage beenden. Dafür gibt es vier verschiedene Möglichkeiten:

- a) Pendelnd zwischen beiden Totlagen im Bereich links von den Totlagen
- b) Pendelnd zwischen beiden Totlagen im Bereich rechts von den Totlagen
- c) Umlaufend, beginnend mit der Strecklage
- d) Umlaufend, beginnend mit der Decklage

Ein Vergleich aller vier Varianten an Hand des Ausgangsmechanismus ergibt, daß der umlaufende Kurbelantrieb zu kleineren Antriebsmomenten führt als der pendelnde Kurbelantrieb. Die Varianten c und d sind dabei ungefähr gleichwertig. Es entstehen immer die gleichen Koppelkurven, so daß die Auswahl der Antriebskonfiguration keinen Einfluß auf die Qualität Geradföhrung hat.

Es wird Antriebsvariante c gewählt. Damit entfallen die beiden Parameter geradenanteil2 (irrelevant) und phiumkehr (Festwert 360 Grad).

Die Zwischenwinkel in den Lenkern 3 und 5 sind praktisch beliebig, da jede Winkeländerung durch eine entsprechende Verschiebung des Punktes C0 so ausgeglichen werden kann, daß sich Länge und Güte der Geradföhrung nicht

ändern. Also können diese Zwischenwinkel ebenfalls als Optimierungsparameter entfallen. Sie werden auf 0 Grad festgelegt.

Für die restlichen 15 Optimierungsparameter wird eine **Einflußgrößenberechnung** durchgeführt. Sie ermittelt die partiellen Ableitungen der Zielfunktion von allen Optimierungsparametern, also deren Relevanz für Veränderungen der Zielfunktion, bezogen auf die kinematischen Parameter des Ausgangsmechanismus. Die Ergebnisse der Einflußgrößenberechnung sind nur in der engeren Umgebung der Parameterwerte des Bezugsmechanismus gültig.

Bild 6 zeigt die Ergebnisse der Einflußgrößenberechnung für den Ausgangsmechanismus. Die Parameter I1, I4, I8, xb0, I6, xc0 und dw2 haben besonders großen Einfluß auf die Zielfunktion. Die folgenden Untersuchungen sollen auf diese 7 Parameter beschränkt sein.

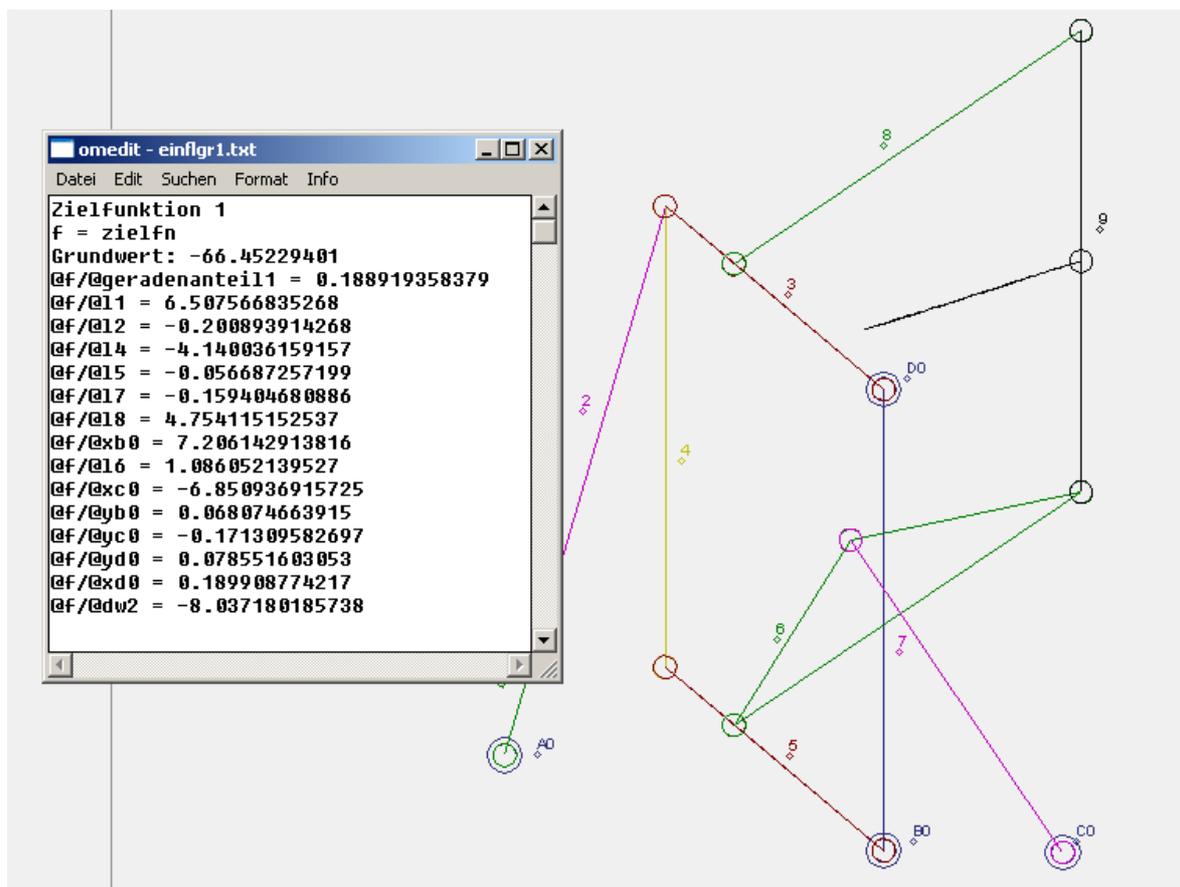


Bild 6: Einflußgrößenberechnung

7 Suchfeldberechnung

Um einen Überblick zu erhalten, in welchen Bereichen des nun noch 7-dimensionalen Parameter-Suchraums gute Lösungen liegen, wird eine

Suchfeldberechnung durchgeführt.

Die Suchfeldberechnung liefert Startvorgaben für die anschließende numerische Parameteroptimierung.

Für alle Parameter wird ein zulässiger Wertebereich festgelegt, in dem gesucht wird. Die Wertebereiche aller Parameter werden entweder systematisch in einem festen Raster oder nach dem Zufallsprinzip durchsucht. Je größer die Wertebereiche gewählt werden, desto umfassender ist die Parametersuche, desto mehr Rechenzeit wird aber auch benötigt, weil mehr Parameterkombinationen durchgespielt werden müssen. Bei der systematischen Suche sollte das Suchraster für jeden Parameter so fein gewählt werden, das keine guten Parameterwerte übersprungen werden, denn es könnte ja sein, daß ein Parameter nur in einem schmalen Wertebereich gute Mechanismen liefert.

Angenommen, man käme je Parameter mit 10 diskreten Werten aus, um den Wertebereich abzudecken. Dann wären 10^7 Parameterkombinationen durchzuspielen. Wenn die kinematische und kinetostatische Analyse für einen konkreten Mechanismus 1 s dauerte, betrüge die Rechenzeit für die systematische Suchfeldberechnung 2778 Stunden oder 116 Tage. Das ist etwas zuviel für die meisten Ingenieure.

Bei einem sehr groben Raster von 5 Werten je Parameter würde die Rechenzeit immer noch 21 Stunden betragen. Das wäre zwar schon erträglich, aber die Maschen des Suchnetzes wären so groß, daß Bereiche guter Lösungen durch sie hindurchschlüpfen könnten.

Für eine Rastersuche sollten deshalb nicht mehr als etwa vier Parameter zu optimieren sein.

Um in einem großen Suchraum mit vielen Parametern trotzdem zu Ergebnissen zu kommen, können Parameterkombinationen im Suchraum per Zufall ausgewählt werden. Dabei wird nur die Anzahl der Parameterkombinationen und damit quasi die gewünschte Rechenzeit vorgegeben. Natürlich gibt es bei der Zufallsmethode keine Garantie, daß man die besten Lösungsbereiche findet. In den meisten Fällen findet man aber zumindest brauchbare Lösungsbereiche.

Bild 7 zeigt eine mögliche Festlegung des Suchraums für die verbliebenen 7 Optimierungsparameter des Beispielmehanismus.

Bild 8 zeigt den besten bei der Suchfeldberechnung gefundenen Mechanismus.

OPTIMUS MOTUS (R)

Fertig Abbruch ? x Konfig

VDI_Aachen2005_Masssynthese_Mechanismen_Abschieber-5

Grenzwerte fuer die Suchfeldberechnung Optimierung2

	Minimalwert	Maximalwert	Schrittzahl 0=undefiniert	aktueller Wert
l1	60	75	0	67.9999995264mm
l4	110	140	0	123.1396864419mm
l8	140	190	0	163.432746705mm
xb0	140	190	0	163mm
l6	160	200	0	180.2930705702mm
xc0	200	280	0	239.997482mm
dw2	0	30	0	23.860709873Grad

Bild 7: Suchraum für die Suchfeldberechnung

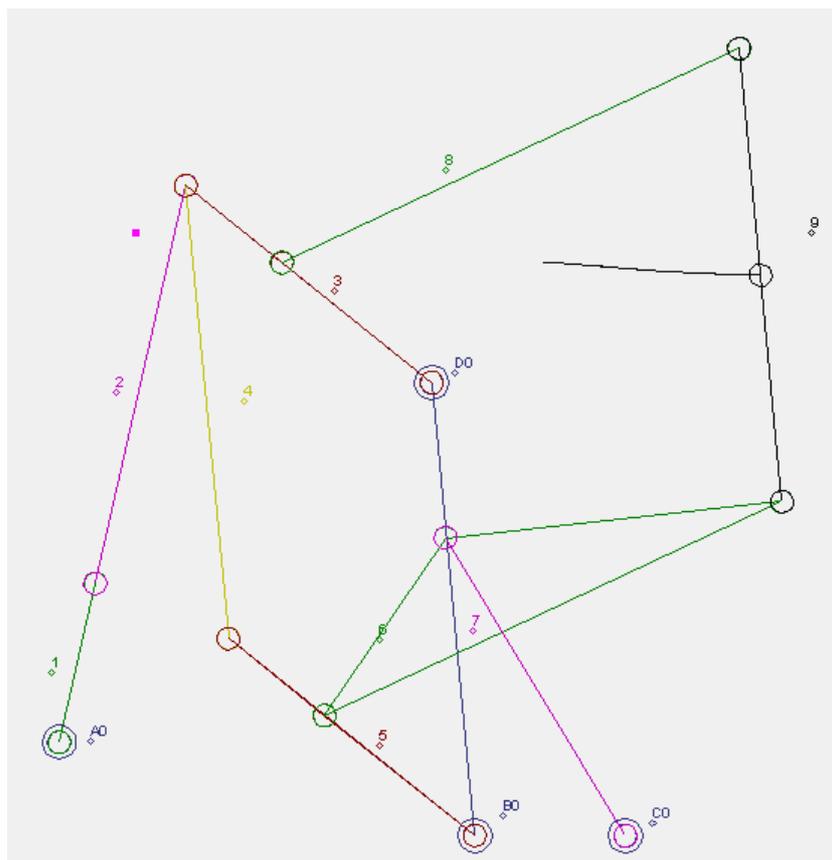


Bild 8: Ergebnis nach der Suchfeldberechnung

8 Numerische Optimierung

Die besten Mechanismen, die bei der Suchfeldberechnung oder der manuellen Optimierung gefunden wurden, benutzt man als Startvorgaben für eine numerische Parameteroptimierung. So findet man die Parameterwerte für lokale Optima der Zielfunktion. Wenn vorher eine umfassende Suchfeldberechnung durchgeführt wurde, entspricht dieses lokale Optimum dem globalen Optimum. Für die Parameteroptimierung kommen in OPTIMUS MOTUS ® zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz:

- a) Bei Optimierungsaufgaben mit N zu erfüllenden Bedingungen und N Optimierungsparametern wird das Newton-Verfahren verwendet, wenn die Zielfunktion in der Nähe der Startvorgabe eine Nullstelle besitzt und wenn die partiellen Ableitungen der N Zielfunktionen (= Bedingungen) von den N Parametern im Bereich um die Startvorgabe nicht zu stark schwanken. Das Newton-Verfahren sucht die nächstliegende Nullstelle der Zielfunktion in Abhängigkeit von den Optimierungsparametern. Die Zielfunktion darf nicht zu zerklüftet sein, sonst besteht die Gefahr, daß keine oder eine weit entfernte Nullstelle gefunden wird. Das Newton-Verfahren zeichnet sich durch kurze Rechenzeiten und hohe Lösungsgenauigkeit aus.
- b) Bei anderen Aufgaben kommt in ein Suchschrittverfahren zum Einsatz. Es verändert die einzelnen Parameter so lange um festgelegte Schrittweiten in positiver oder negativer Richtung, bis sich eine Gesamt-Zielfunktion, die aus Einzelzielfunktionen zusammengesetzt ist, nicht mehr verbessert, bis sich also der Betrag der Gesamtzielfunktion nicht weiter verringert. Dabei ist es möglich, daß sich das Suchschrittverfahren in einem lokalen Optimum der Gesamtzielfunktion festfährt, obwohl es in der Nähe auch noch eine Nullstelle gäbe. Die gleiche Eigenschaft sorgt aber dafür, daß das Suchschrittverfahren auch für Optimierungen mit Zielfunktionen ohne Nullstelle geeignet ist. Für den Erfolg der numerischen Optimierung ist die Wahl der Optimierungsfreiheitsgrade mitentscheidend. Änderungen an zwei verschiedenen Parametern sollten nicht gleichartige Wirkungen auf die Zielfunktion haben, die Parameter sollten unabhängig voneinander wirken. So stellt sich z.B. heraus, daß statt des Parameters x_{c0} für die numerische Optimierung besser der Parameter d_{xc0} mit $x_{c0} = x_{b0} + d_{xc0}$ verwendet werden sollte.

Bild 9 zeigt den Mechanismus, der mit Hilfe des Suchschrittverfahrens ermittelt wurde. Bild 10 zeigt seine Diagramme für die Geradföhrungsabweichung y_h , die vier Übertragungswinkel und das Antriebsmoment k_{to_m1} .

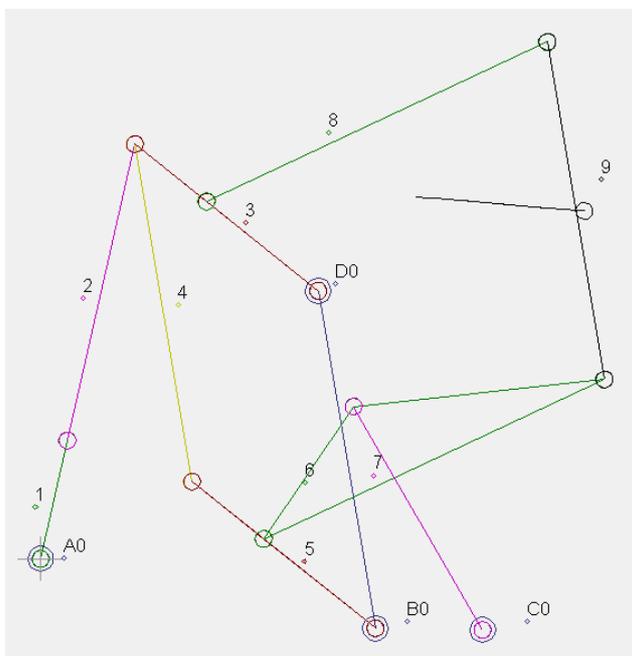


Bild 9: Mechanismus nach der numerischen Optimierung

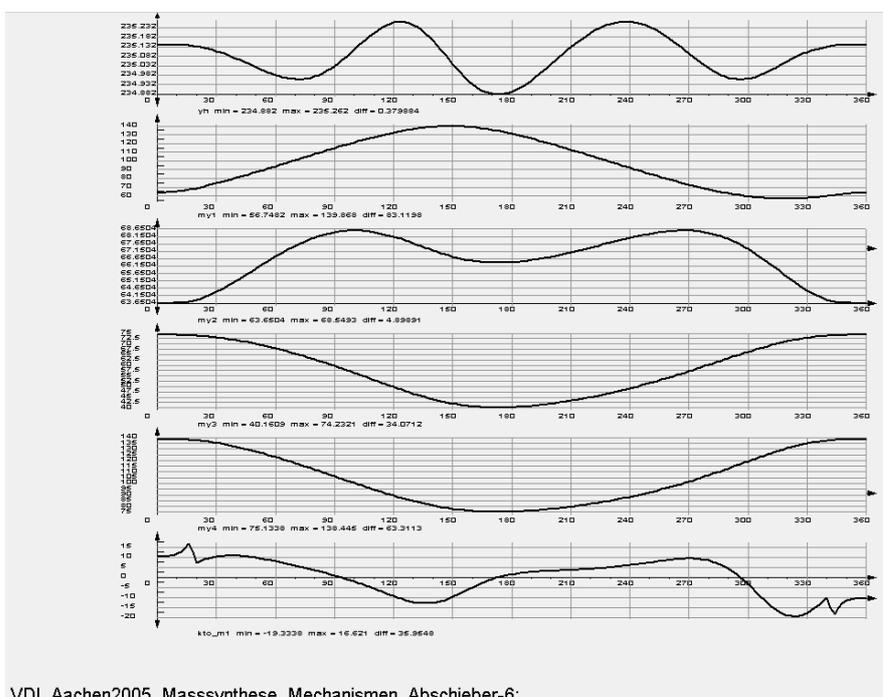


Bild 10: Bewertungsdiagramme für den optimierten Mechanismus

Der optimierte Mechanismus wird insgesamt so skaliert, daß die Geradföhrungslänge 100 mm entsteht, und besitzt dann folgende Eigenschaften:

Geradföhrungsabweichung = +/- 0.19 mm

Maximales Antriebsmoment = 19.3 Nm

Effektives Antriebsmoment = 9.1 Nm

Übertragungswinkel 1 zwischen Teil 2 und Teil 3 = 40.1 Grad

Übertragungswinkel 2 zwischen Teil 6 und Teil 7 = 63.6 Grad

Übertragungswinkel 3 zwischen Teil 8 und Teil 9 = 40.1 Grad

Übertragungswinkel 4 zwischen Teil 4 und Teil 5 = 41.6 Grad

9 Fazit

Sofern es sich nicht um einfache Syntheseaufgaben handelt, erfordert die Maßsynthese von Mechanismen einen mehrfachen Methodenwechsel zwischen Katalogrecherche, kreativem Entwurf, klassischer Getriebesynthese und numerischer Optimierung. Den optimalen Mechanismus erreicht man nicht nach einem festgelegten Entwurfsalgorithmus, sondern in mehreren Schritten. Jeder Schritt baut auf dem vorangehenden auf, und nach jedem Entwurfsschritt wird neu über die Methode für den nächsten Schritt entschieden.

Die numerischen Methoden der Einflußgrößenberechnung, der Suchfeldberechnung und der numerischen Optimierung geben dem Getriebeentwickler vor allem dort eine Chance auf eine Lösung, wo ihm die klassische Getriebesynthese nicht hilft, weil er ihre Methoden nicht genau genug kennt, wo der Mechanismus für klassische Verfahren zu kompliziert ist oder wo Kriterien wichtig sind, die bei klassischen Syntheseverfahren nicht berücksichtigt werden.

10 Literatur

[1] Dokumentation zur Mechanismensoftware OPTIMUS MOTUS ®

[2] VDI-Richtlinie 2727: „Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben“