

## Koppeltriebesynthese mit OPTIMUS MOTUS

### Beispiel: Systematische Suche nach einem Geradföhrungs-Viergelenkgetriebe

An Hand eines einfachen Beispielmechanismus soll der typische Ablauf bei der Bearbeitung einer Getriebesyntheseaufgabe mit dem Parametrikmodul von CADOM dargestellt werden.

Aufgabe:

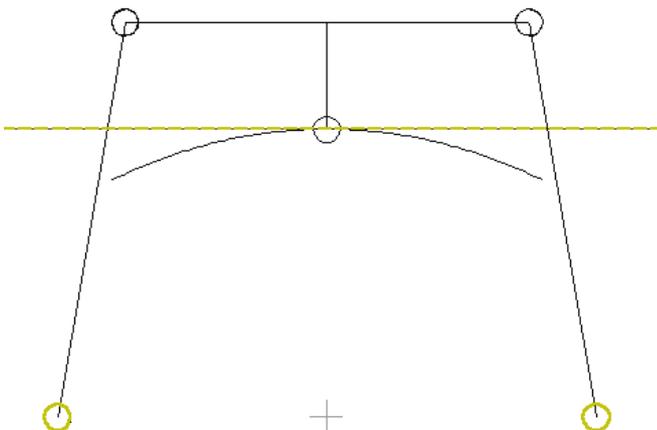
Es wird ein Viergelenkgetriebe mit einer Gestell-Länge von maximal 200 mm gesucht, das über eine Länge von 160 mm eine möglichst gute Geradföhrung erzeugt, d.h. bei dem die maximale Abweichung von einer Geraden minimal ist.

Man kann davon ausgehen, daß umso bessere Geradföhrungen gefunden werden, je größer das Getriebe baut bzw. desto größer die Gestelllänge (= Abstand der beiden gestellfesten Drehpunkte) ist. Deshalb wird die Gestell-Länge auf 200 mm festgesetzt.

Generell sind Getriebesynthese-Aufgaben umso leichter zu lösen, je weniger unabhängige Parameter bei der Lösungssuche variiert werden müssen. Also versucht man in jeder Phase der Lösungssuche, sinnvolle Abhängigkeiten zwischen den kinematischen Abmessungen des Mechanismus zu finden bzw. festzulegen, um so die Zahl der Optimierungsparameter zu verringern.

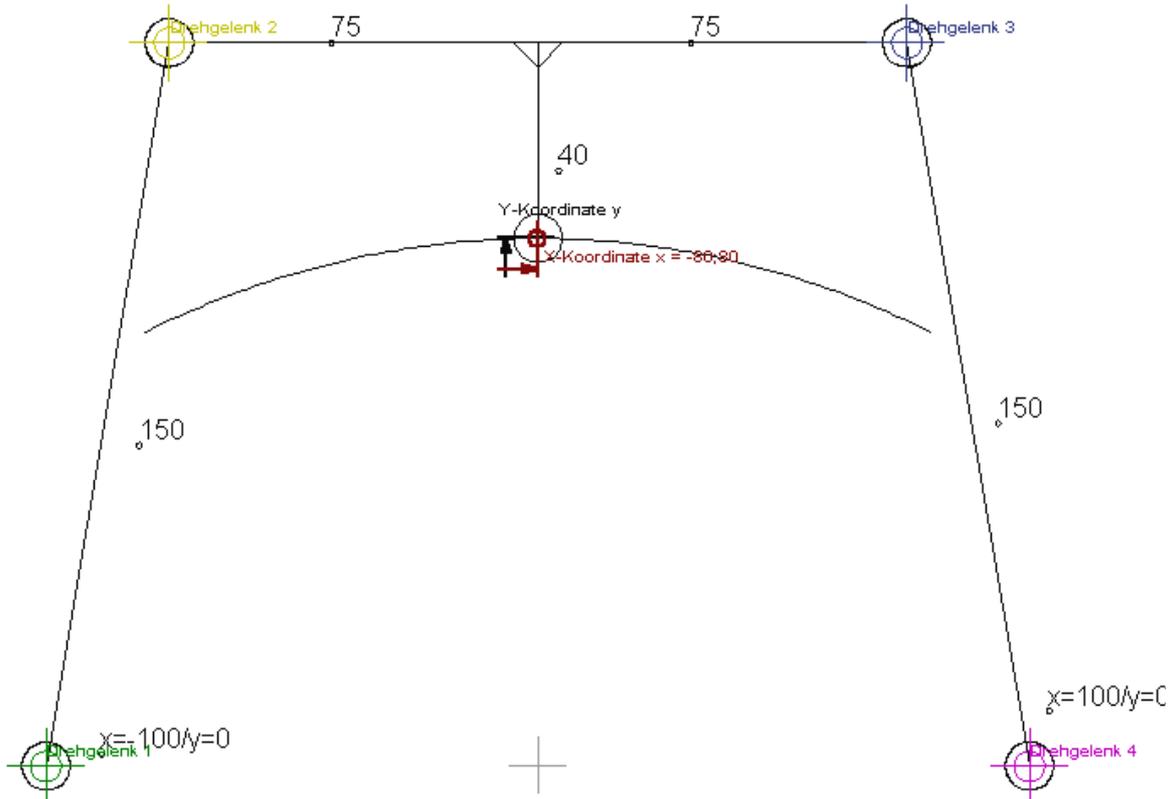
Außerdem kann man hier annehmen, daß der optimale Mechanismus und die von ihm erzeugte Koppelkurve symmetrisch ist. Wäre die Koppelkurve unsymmetrisch, so wäre wahrscheinlich eine Hälfte der Koppelkurve besser als Geradföhrung geeignet als die andere. Dann könnte man die schlechtere Koppelkurven-Hälfte auf Kosten der besseren Hälfte weiter optimieren, so daß der vorliegende Mechanismus nicht optimal wäre. Für eine symmetrische Koppelkurve gibt es auch ein symmetrisches Viergelenkgetriebe.

Ausgehend von dieser Überlegung soll folgende Mechanismenstruktur untersucht werden:



Die Auswahl der geeigneten Mechanismenstruktur für die Lösung einer Bewegungsaufgabe ist immer der erste Schritt der Getriebesynthese. Dieser Schritt erfordert Recherche in Mechanismendatenbanken oder Kreativität des Ingenieurs.

Anschließend wird ein kinematisches Modell des Mechanismus aufgebaut:



Zuerst definiert man ein Gestell mit Drehpunkten bei  $-100,0$  und  $100,0$ .  
 Dann definiert man zwei im Gestell gelagerte Lenker mit Ausgangslängen von je 150 mm.  
 Eine Koppel mit 150 mm Länge und einem von ihrer Mitte senkrecht abgehenden Ausleger von 40 mm Länge folgt anschließend.  
 Der betrachtete Geradföhrungs-Koppelpunkt ist der Endpunkt des Auslegers.  
 Die vier Teile werden mit Drehgelenken verbunden (siehe Bild).  
 Für den Koppelpunkt werden die kinematischen Größen  $x$  (X-Koordinate) und  $y$  (Y-Koordinate) eingeföhrt.  
 Die  $x$ -Koordinate wird mit dem icon **X=!** auf den Bereich  $-80$  bis  $80$  festgesetzt. Damit ist die Geradföhrungslänge von 160 mm definiert.  
 Datensatzname: **NO\_Beispiel\_28\_Geradfuehrung-1 RETURN**  
 Nach der Berechnung mit dem Ampel-icon wird für den Koppelpunkt eine Bahnkurve eingezeichnet (  ).

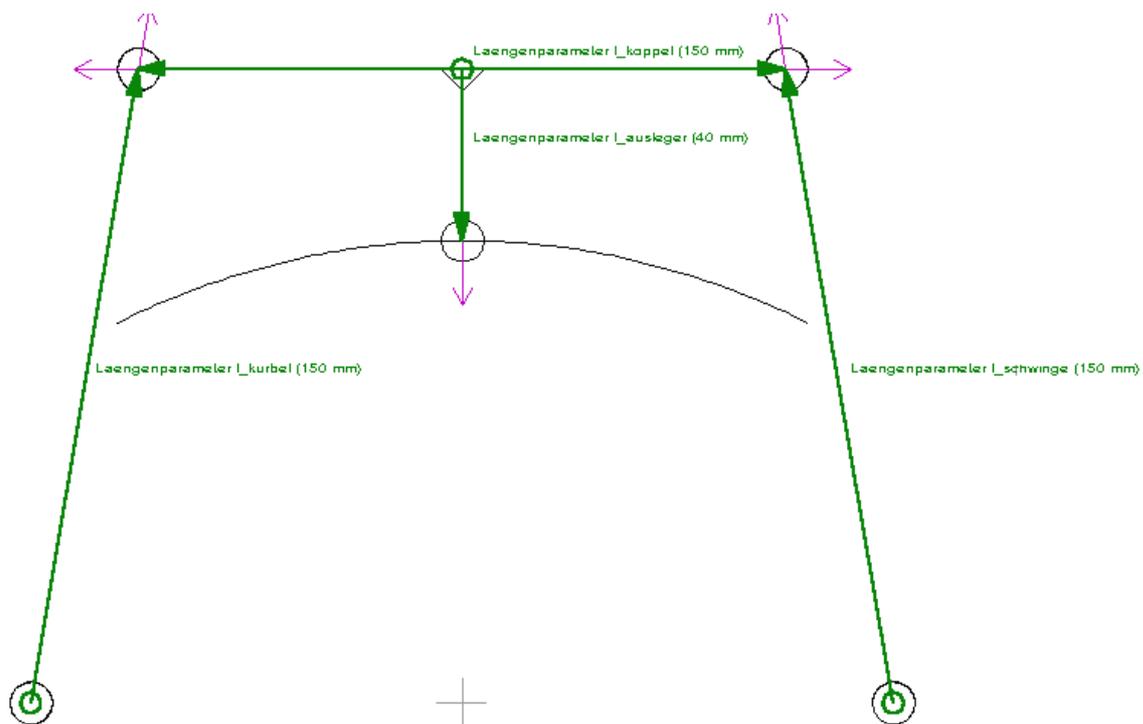
Nun werden Parameter für die kinematischen Abmessungen des Mechanismus eingeführt:

**I\_kurbel**  
**I\_koppel**  
**I\_schwinge**  
**I\_ausleger**

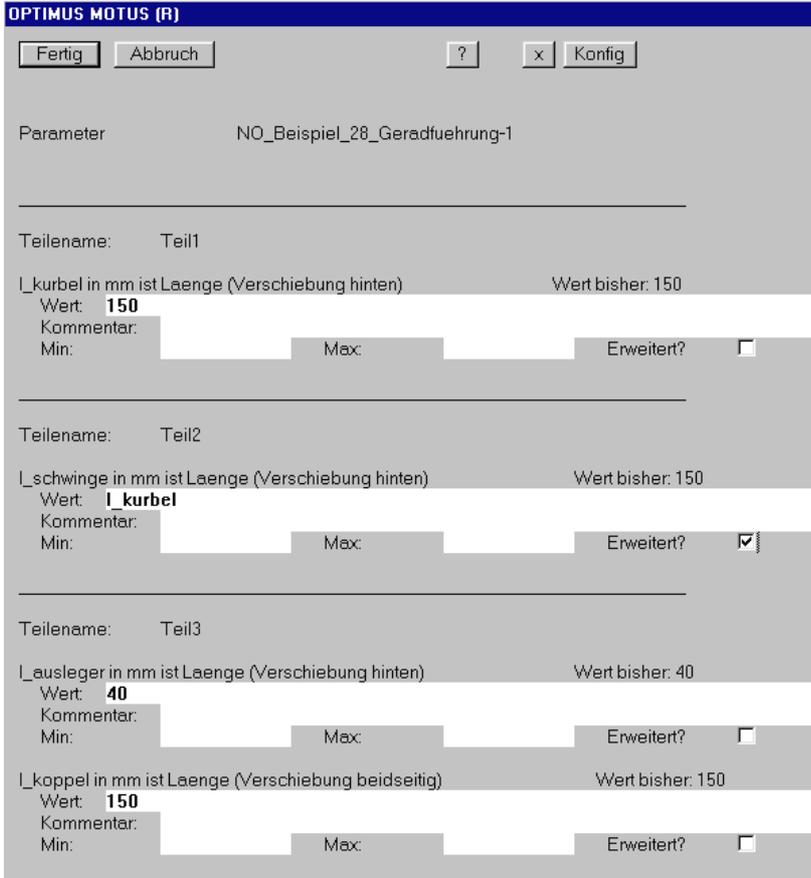
Die vier Längenparameter werden mit der Funktion **Parameter / Laenge neu** definiert.

Bei der Festlegung von I\_koppel ist darauf zu achten, daß die horizontale Linie auf der Koppel ungefähr in der Mitte angeklickt wird, da vom Klick-Ort abhängt, auf welcher Seite (links / rechts / beidseitig) die Längenänderungen bei der Variation der Parameter angebracht werden. Nur bei beidseitiger Änderung von I\_koppel bleibt die Symmetrie des Mechanismus gewahrt.

Die restlichen Linien (I\_kurbel, I\_schwinge und I\_ausleger) werden nur in eine Richtung verlängert (beachten Sie die pinkfarbenen Pfeile im nachfolgenden Bild).



Mit **Parameter / Aendern (erweitert)** wird nun **I\_schwinge=I\_kurbel** gesetzt. Gleichzeitig kann **I\_schwinge** als „erweitert“ deklariert werden. Das bedeutet, daß er beim Aufruf der Dialogbox zum Ändern der Formatparameter mit dem **PAR**-icon nicht mehr aufgeführt wird, sondern nur noch in der erweiterten Dialogbox unter **Parameter / Aendern (erweitert)**.



**OPTIMUS MOTUS (R)**

Fertig Abbruch ? x Konfig

Parameter: NO\_Beispiel\_28\_Geradfuehrung-1

---

Teilname: Teil1

I\_kurbel in mm ist Laenge (Verschiebung hinten) Wert bisher: 150  
Wert: **150**  
Kommentar:  
Min: Max: Erweitert?

---

Teilname: Teil2

I\_schwinge in mm ist Laenge (Verschiebung hinten) Wert bisher: 150  
Wert: **I\_kurbel**  
Kommentar:  
Min: Max: Erweitert?

---

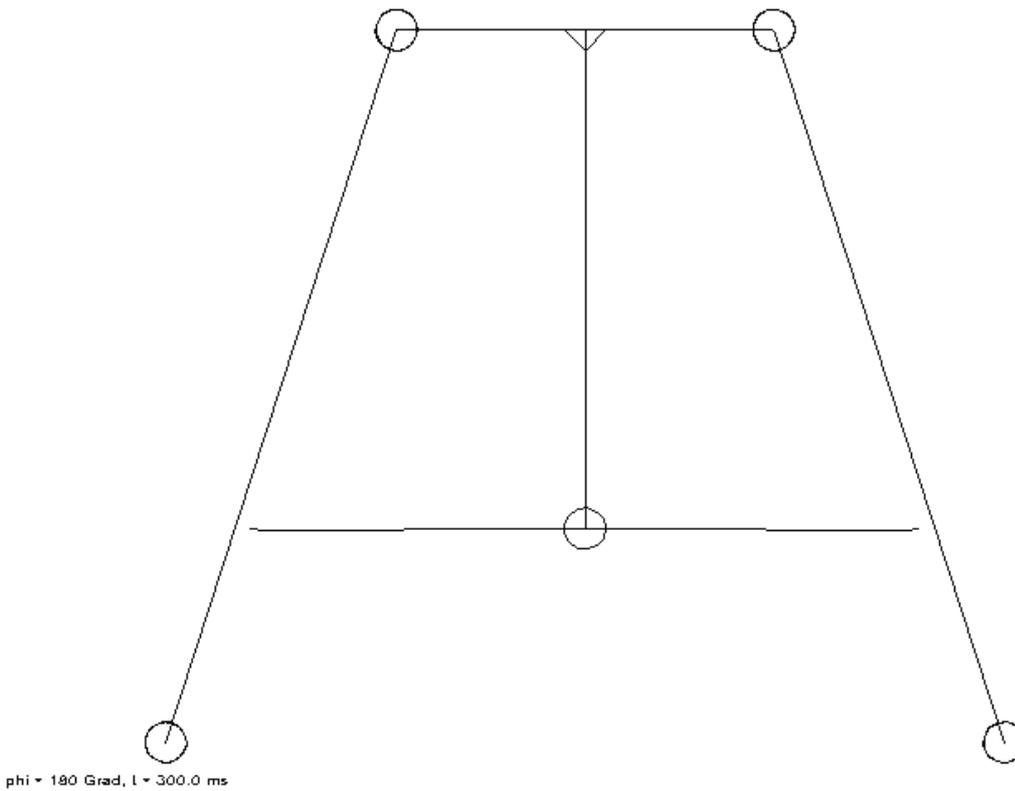
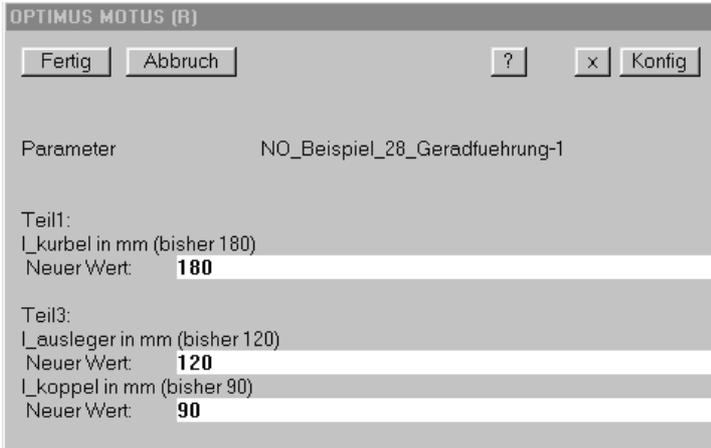
Teilname: Teil3

I\_ausleger in mm ist Laenge (Verschiebung hinten) Wert bisher: 40  
Wert: **40**  
Kommentar:  
Min: Max: Erweitert?

I\_koppel in mm ist Laenge (Verschiebung beidseitig) Wert bisher: 150  
Wert: **150**  
Kommentar:  
Min: Max: Erweitert?

Im nächsten Schritt erkundet man die kinematischen Eigenheiten des Mechanismus, indem man verschiedene Parameterkombinationen über das icon **PAR** manuell vorgibt und beobachtet, wie sich die Koppelkurve ändert.

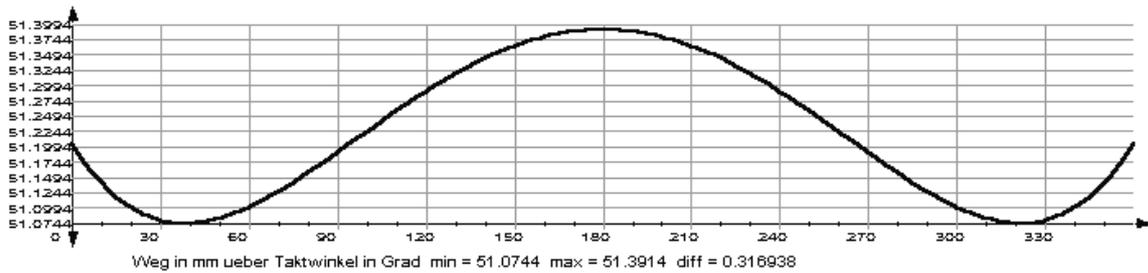
Nach wenigen Versuchen findet man z.B. folgende Parameterkombination:



Die Geradführungsgüte ist hier direkt als Diagramm darstellbar. Sie entspricht der Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert der Größe  $y$ .

Über das Standarddiagramm  ist zu sehen, daß die Schwankungsbreite der Geradführung jetzt 0.32 mm beträgt:

NO\_Beispiel\_28\_Geradfuehrung-1: y, Taktzahl: 100 U/min, Zykluszeit: 600 ms

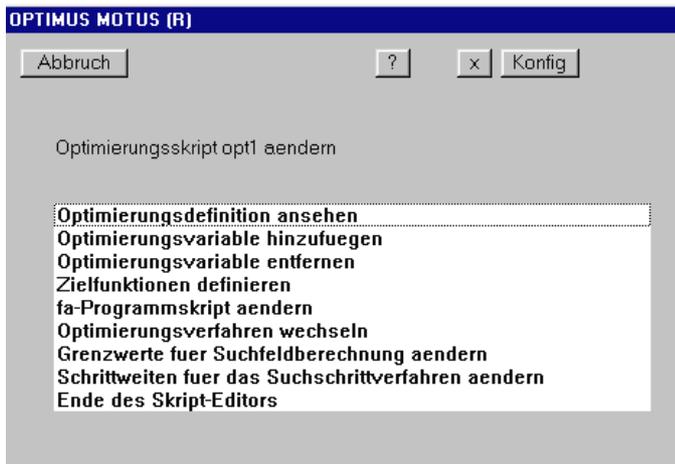


Um die Lösung weiter zu verbessern, startet man den Funktionsbereich zur numerischen Optimierung im Parametrikmodul mit **Parameter / Numerische Optimierung**.

Als Name für die Optimierung wird z.B. **opt1** angegeben.

Wählen Sie aus dem Menu **einzelne Basis-Optimierung** aus.

Es erscheint das Optimierungsmenü aus dem Parametrikmodul von CADOM:



Mit dreimaligem Aufruf der Funktion **Optimierungsvariable hinzufügen** werden zunächst nacheinander die Parameter **I\_kurbel**, **I\_koppel** und **I\_ausleger** als Optimierungsvariablen ausgewählt.

Dann wird die Funktion **Zielfunktionen definieren** aufgerufen. Mit Hilfe eines Texteditors wird dabei ein Term definiert, dessen Wert im Rahmen der Parametervariation optimiert werden soll. „Optimieren“ bedeutet hier, daß der Betrag des Zielfunktionswerts möglichst nahe an 0 herankommen soll. Als Zielfunktionsterm wird hier **yhub** definiert:

```
omedit - zielfns
Datei Edit Suchen Format Info
# Zielfunktionen: Bedingungen, die nach der
#                 Optimierung erfuehlt sein sollen.
# Die verwendeten Groessen muessen im fa-Programm
# der Optimierung berechnet werden.
yhub|
```

Beenden Sie den Texteditor und speichern Sie Ihre Eingabe.

Zurück im Optimierungsmenü wird die Funktion **fa-Programmskript aendern** aufgerufen. Wieder in einem Texteditor wird nun ein Berechnungsskript erstellt, mit dem der Zielfunktionswert **yhub** aus den Ergebnissen der kinematischen und (bei Bedarf) kinetostatischen Analyse berechnet wird. Für das Berechnungsskript steht der Funktionsumfang des Funktionspakets fa von OPTIMUS MOTUS zur Verfügung.

Hier wird definiert:

```
omedit - paropt.fa
Datei Edit Suchen Format Info
ymin=min(t,0,360,y(t))
ymax=max(t,0,360,y(t))
yhub=ymax-ymin
```

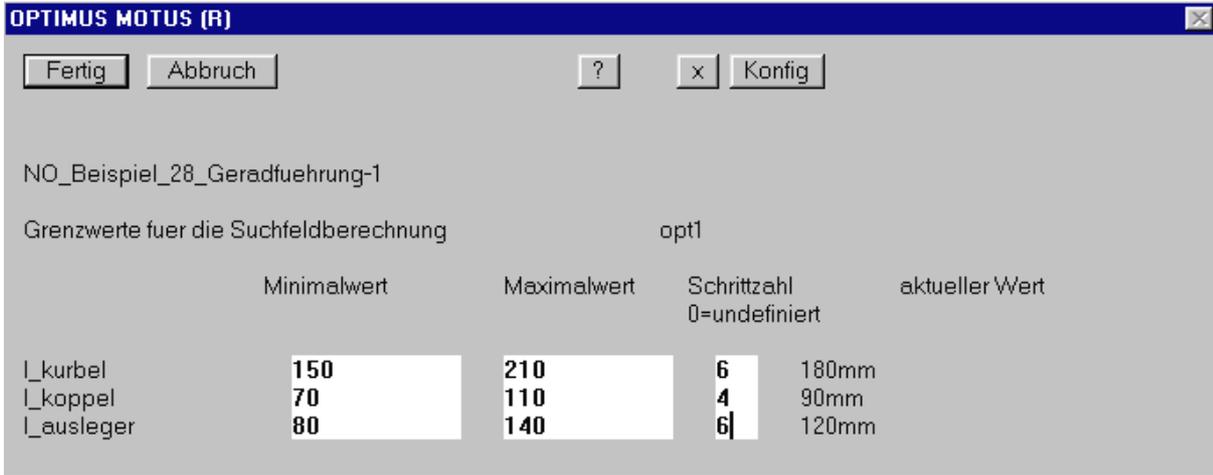
**ymin** ist der Minimalwert von **y**, **ymax** der Maximalwert und **yhub** der maximale Ausschlag von **y** über die Geradföhrungslänge. **Yhub** ist immer positiv. Je kleiner **yhub**, desto besser die Geradföhrung.

Beenden und speichern Sie den Texteditor.

Weiterhin wird mit der Funktion **Optimierungsverfahren wechseln** im Optimierungsmenü die **Suchfeld-Berechnung** ausgewählt.

Die Suchfeldberechnung dient dazu, einen Überblick zu gewinnen, in welchen Bereichen des hier dreidimensionalen Parameterraums (**I\_kurbel**, **I\_koppel**, **I\_ausleger**) gute Mechanismenlösungen liegen.

Mit **Grenzwerte für Suchfeldberechnung ändern** wird dann festgelegt, in welchen Bereichen und in wieviel Schritten die einzelnen Optimierungsparameter variiert werden sollen.



	Minimalwert	Maximalwert	Schrittzahl 0=undefiniert	aktueller Wert
l_kurbel	150	210	6	180mm
l_koppel	70	110	4	90mm
l_ausleger	80	140	6	120mm

Bei einer Schrittzahl N werden N+1 Wert-Varianten für einen Parameter durchgerechnet. Da alle möglichen Parameterkombinationen durchgespielt werden, müssen die einzelnen Anzahlen der Wertevarianten multipliziert werden, um zum Gesamtaufwand der Berechnung zu kommen. Im Beispiel sind also  $(6+1) \cdot (4+1) \cdot (6+1) = 245$  Einzelberechnungen erforderlich, um das festgelegte Suchraaster abzuarbeiten.

Die besten im Rahmen der Suchfeldberechnung angetroffenen Mechanismenvarianten – also die mit den besten Zielfunktionswerten – werden in einer Hitliste gespeichert.

Klicken Sie auf **Fertig**.

Mit **Ende des Skript-Editors** gelangt man zurück zu CADOM.

Die Frage **Parameteroptimierung durchführen?** sollte man zunächst mit **Nein** beantworten. Der Mechanismus sollte mit **Datei / Mechanismus in Datensatz-Archiv speichern** gesichert werden. **Anschließend wird wieder Parameter / Numerische Optimierung aufgerufen und dann die Optimierung opt1 ausgewählt.**

Bei **Optimierungsdefinition ändern?** wählen Sie **Nein** aus.

Die Frage **Parameteroptimierung durchführen?** sollte jetzt mit **Ja** beantwortet werden.

Es erscheint eine Meldung, daß eine Sicherungskopie des Originalmodells angelegt wird, und daß Zwischenlösungen in **\$DATEN/sf\_\*.sav** gespeichert werden. Bestätigen Sie die Meldung mit **OK!**

Dann wird festgestellt, daß sich der Bewegungsplan bei der Optimierung nicht verändert. Bestätigen Sie auch dies mit **OK!**

Schließlich geben Sie vor, bei welcher Zählernummer, d.h. bei welchem Suchfeld-Berechnungsschritt die Berechnung starten soll. Suchfeldberechnungen können einige Zeit in Anspruch nehmen und müssen ggf. abgebrochen werden, weil der Rechner anderweitig benutzt werden soll. Dann kann die Berechnung später an der Abbruchstelle weitergeführt werden, ohne daß man die Berechnung ganz von vorne neu beginnen muß.

Geben Sie hier **1** ein!

Nach einigen Minuten (je nach Rechenleistung Ihres PC) erscheint eine Textauflistung mit der Zusammenfassung der Suchfeldberechnungsergebnisse:

## SUCHFELDBERECHNUNG

```

fn1 = yhub
fn_max = gesamt_zielfunktion

ANFANG DER LISTE
l_kurbel = 150.000000
  l_koppel = 70.000000
    l_ausleger = 80.000000
      [1] fn1 = 4.577812
        [1] fn_max = -4.577812
l_kurbel=150.000000, l_koppel=70.000000, l_ausleger=80.000000,
--- aktuelle Hitliste:
  l_kurbel l_koppel l_ausleger
1) 150.000 70.000 80.000 ( -4.577812)
2) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
3) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
4) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
5) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
6) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
7) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
8) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
9) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
10) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
-----
neue Bestloesung gefunden

  l_ausleger = 90.000000
    [2] fn1 = 5.117438
      [2] fn_max = -5.117438
l_kurbel=150.000000, l_koppel=70.000000, l_ausleger=90.000000,
--- aktuelle Hitliste:
  l_kurbel l_koppel l_ausleger
1) 150.000 70.000 80.000 ( -4.577812)
2) 150.000 70.000 90.000 ( -5.117438)
3) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
4) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
5) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
6) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
7) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
8) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
9) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
10) 0.000 0.000 0.000 ( 0.000000)
...

  l_ausleger = 110.000000
    [235] fn1 = 3.318128
      [235] fn_max = -3.318128
  l_ausleger = 120.000000
    [236] fn1 = 2.805111
      [236] fn_max = -2.805111
  l_ausleger = 130.000000
    [237] fn1 = 2.350109
      [237] fn_max = -2.350109
  l_ausleger = 140.000000
    [238] fn1 = 1.945025
      [238] fn_max = -1.945025
l_koppel = 110.000000
  l_ausleger = 80.000000
    [239] fn1 = 6.994072
      [239] fn_max = -6.994072
  l_ausleger = 90.000000
    [240] fn1 = 6.276368
      [240] fn_max = -6.276368
  l_ausleger = 100.000000
    [241] fn1 = 5.636282
      [241] fn_max = -5.636282
  l_ausleger = 110.000000
    [242] fn1 = 5.062803
      [242] fn_max = -5.062803
  l_ausleger = 120.000000
    [243] fn1 = 4.546922
      [243] fn_max = -4.546922
  l_ausleger = 130.000000
    [244] fn1 = 4.081187
      [244] fn_max = -4.081187
  l_ausleger = 140.000000
    [245] fn1 = 3.659371
      [245] fn_max = -3.659371
ENDE DER LISTE

```

```
# 1. Maximum fuer fn_max = -0.181179 bei
= l_kurbel          190.0000000000
= l_koppel          90.0000000000
= l_ausleger       130.0000000000

# 2. Maximum fuer fn_max = -0.192133 bei
= l_kurbel          210.0000000000
= l_koppel          90.0000000000
= l_ausleger       140.0000000000

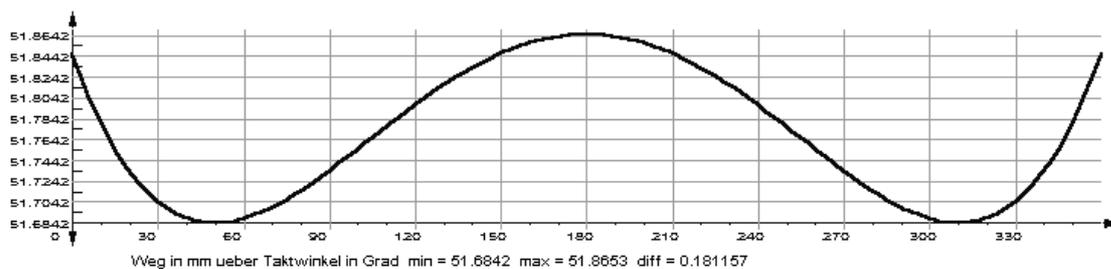
...
```

### Schließen Sie das Textfenster.

Die Frage **Gefundene Loesung uebernehmen?** beantworten Sie bitte mit **Ja**.

Führen Sie mit dem Ampel-icon eine neue Berechnung durch und stellen Sie den Verlauf  $y$  mit dem Standarddiagramm grafisch dar.

NO\_Beispiel\_28\_Geradfuehrung-1:  $y$ , Taktzahl: 100 U/min, Zykluszeit: 600 ms



Die Schwankungsbreite der Geradfuehrung betraegt nun 0.18 mm.

Klicken Sie auf **Zurueck zum grafischen Menu**.

Die Schwankungsbreite kann noch ein wenig verbessert werden, indem die kinematischen Abmessungen des Mechanismus numerisch feinoptimiert werden. Als Startvorgabe wird dabei der gerade vorliegende Mechanismus benutzt, der ja jetzt der besten gefundenen Loesung aus der Suchfeldberechnung entspricht.

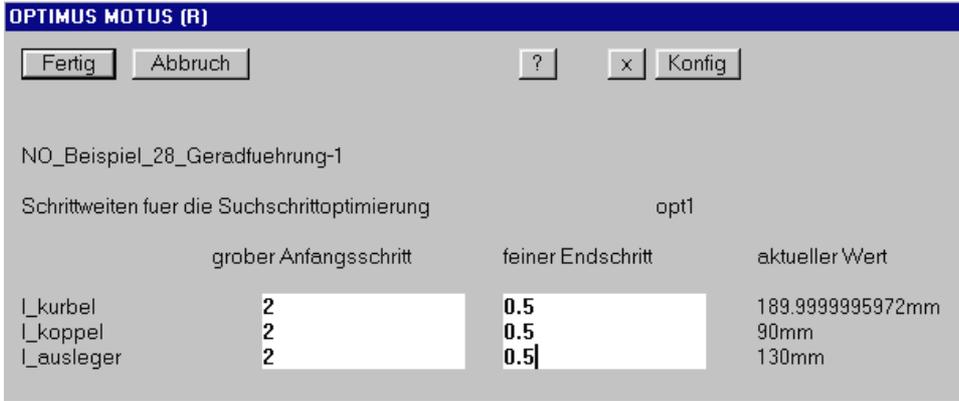
Rufen Sie **Parameter / Numerische Optimierung** auf, wählen Sie **opt1** aus dem Menü aus und antworten Sie **Ja** auf **Optimierungsdefinition aendern?**

Wählen Sie im Optimierungsmenü **Optimierungsverfahren wechseln** und dann **mit Suchschritt-Verfahren optimieren**.

Das Suchschrittverfahren geht von der vorliegenden Parameterkombination aus und variiert jeden Parameter in beiden Richtungen um ein epsilon. Die beste der drei Loesungen entsprechend den Parameterwerten  $x-\epsilon$ ,  $x$  und  $x+\epsilon$  wird weiterverfolgt.

Mit dem Newton-Verfahren steht ein schnelleres Optimierungsverfahren zur Verfügung, das aber nur angewendet werden kann, wenn  $N$  unabhängige Zielfunktionen bei  $N$  Optimierungsparametern gegeben sind und wenn die Zielfunktion numerisch gutmütig ist. Da hier nur eine Zielfunktion (nämlich  $y_{hub}$ ) bei drei Optimierungsparametern ( $l_{kurbel}$ ,  $l_{koppel}$ ,  $l_{ausleger}$ ) vorliegt, kann das Newton-Verfahren in diesem Beispiel nicht verwendet werden.

Mit **Schrittweiten für das Suchschrittverfahren ändern** werden die Suchschrittweiten (d.h. die epsilon-Werte) für die Optimierungsparameter festgelegt:



	grober Anfangsschritt	feiner Endschrift	aktueller Wert
l_kurbel	2	0.5	189.9999995972mm
l_koppel	2	0.5	90mm
l_ausleger	2	0.5	130mm

Klicken Sie auf **Fertig**.

Mit **Ende des Skript-Editors** und **Ja** bei **Parameteroptimierung durchfuehren?** starten Sie die Optimierung.

Es erscheint eine Meldung, daß eine Sicherungskopie des Originalmodells angelegt wird. Bestätigen Sie die Meldung mit **OK!**

Dann wird festgestellt, daß sich der Bewegungsplan bei der Optimierung nicht verändert. Bestätigen Sie auch dies mit **OK!**

Bestätigen Sie die Laufzeitstatistik ebenfalls mit **OK**.

Nach kurzer Optimierungsberechnung erscheint ein Textfenster mit folgender Angabe:

```

omedit - paropt.org
Datei / File Edit Suchen Format Info
ERGEBNISSE von optimize

Inkrementalsuchverfahren
deltax[1] = 2.000000 ( 0.500000)
deltax[2] = 2.000000 ( 0.500000)
deltax[3] = 2.000000 ( 0.500000)

LOESUNG:
l_kurbel=189.500000142100
l_koppel=90.000000000000
l_ausleger=130.000000000000

f[(yhub) ] = 0.175477035835
f[(yhub) ] = 0.175477035835
f[(yhub) ] = 0.175477035835

eps = 0.000100000000

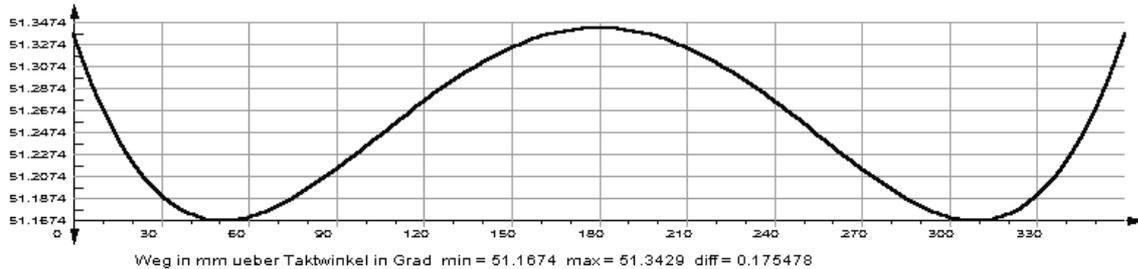
```

Schließen Sie das Textfenster.

Bei Gefundene **Loesung uebernehmen?** wählen Sie **Ja** aus.

Führen Sie mit dem Ampel-icon eine neue Berechnung durch und geben Sie das Standarddiagramm für den Verlauf y aus.

NO\_Beispiel\_28\_Geradfuhrung-1: y, Taktzahl: 100 U/min, Zykluszeit: 600 ms



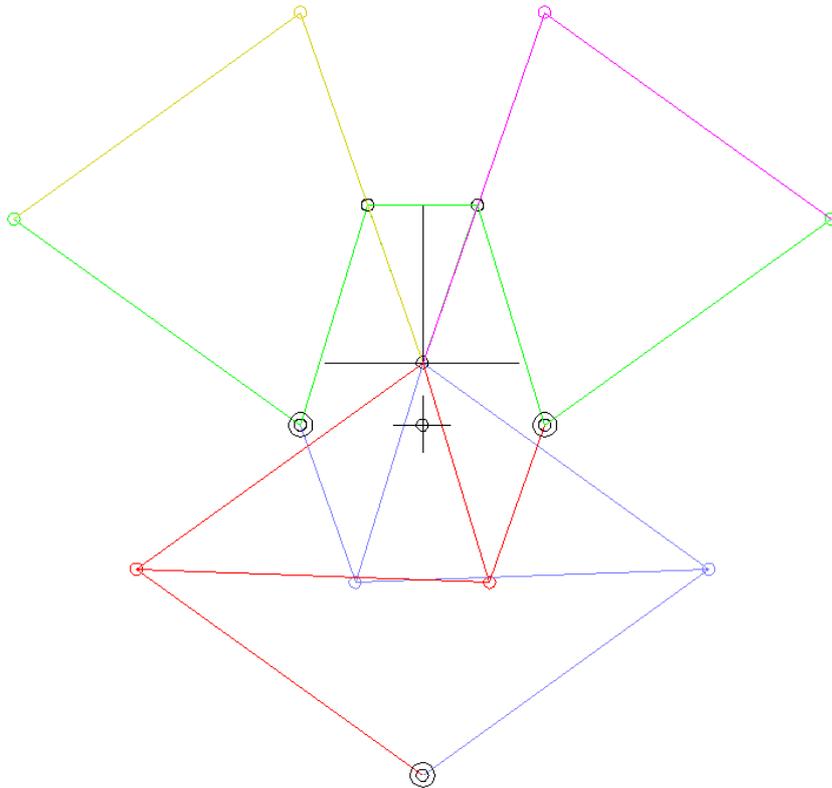
Lassen Sie mit  die Getriebestellung bei 180 Grad Taktwinkel anzeigen (die Symmetriestellung) und frieren Sie sie mit  als Definitionsstellung ein.

Abschließend kann mit **Erweitert / Koppeltriebesuche / Satz von Roberts für Viergelenkgetriebe** nach einem umlauffähigen Viergelenkgetriebe gesucht werden, das die gleiche Koppelkurve erzeugt.

**Der bisher vorliegende Mechanismus ist als Doppelschwinge nicht umlauffähig, wenn er an einem der im Gestell gelagerten Lenker angetrieben wird.**

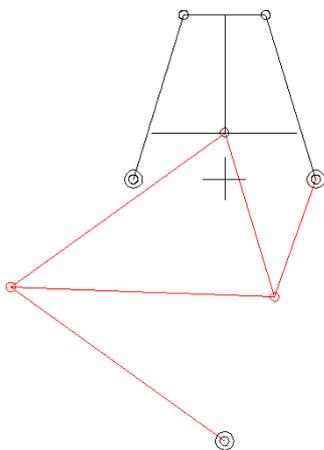
CADOM fragt folgende Punkte ab, die Sie entsprechend angeben müssen:

A0 = Klicken Sie zuerst auf  und dann auf den Gelenkpunktkreis links unten  
 A = Klicken Sie zuerst auf  und dann auf den Gelenkpunktkreis links oben  
 B = Klicken Sie zuerst auf  und dann auf den Gelenkpunktkreis rechts oben  
 B0 = Klicken Sie zuerst auf  und dann auf den Gelenkpunktkreis rechts unten  
 K Klicken Sie zuerst auf  und dann auf den Koppelpunkt-Kreis  
 Teilename = **skizze1 RETURN**



Das Teil skizze1 enthält grafische Darstellungen von drei verschiedenen Viereckengetrieben in grün, blau und rot, die alle die gleiche Koppelkurve erzeugen. Die Mechanismen in blau und rot sind umlauffähig. Wenn Sie einen Mechanismus übernehmen wollen, gehen Sie wie folgt vor:

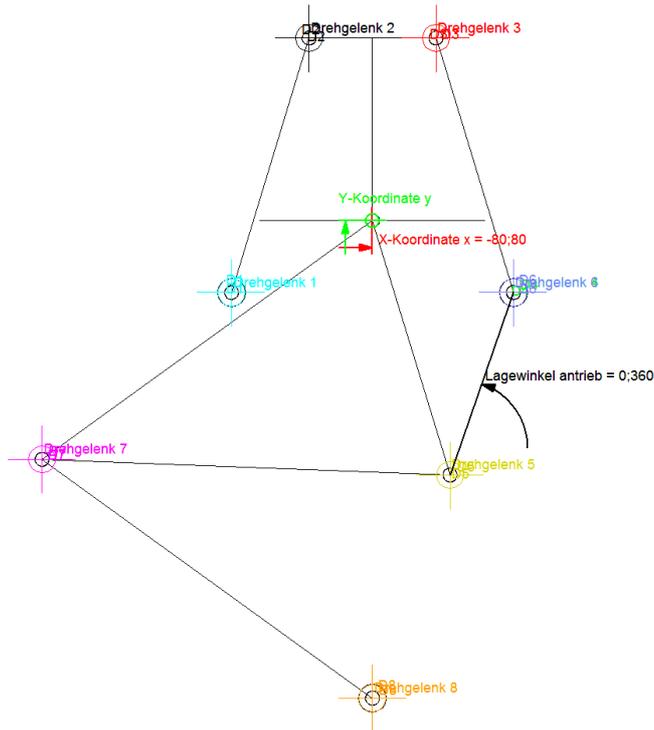
Wählen Sie einen Mechanismus aus: hier soll es das rote Viereckengetriebe sein  
Löschen der nicht benötigten Elemente aus dem Teil skizze1 Ergebnis:



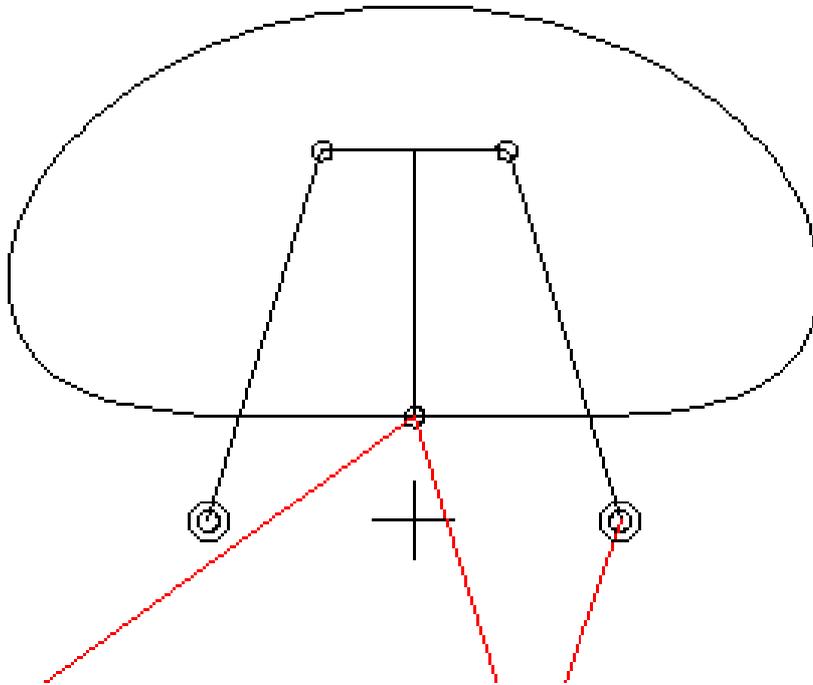
Nachzeichnen des Mechanismus:

Das rote Viereckgetriebe liegt hier als ein Teil vor. Zeichnen Sie mit den Standardbauteilen von CADOM den Mechanismus nach und verbinden ihn mit Gelenken:

Definieren Sie einen Lagewinkel „antrieb“, der sich umlaufend und im Gegenuhrzeigersinn dreht.



Geben Sie eine Koppelkurve aus:



Die Koppelkurve folgt in dem relevanten Teilabschnitt der Geradführung des numerisch optimierten Viergelenkes.

Archivieren Sie den Datensatz.