

Kinematik Optimieren

Maschinenmarkt Ausgabe 8 - 1989

Computergestütztes Simulieren und Bewerten von ebenen Gelenkgetrieben

Das Kinematik-Paket eines Bielefelder Softwarebüros dient dazu, Bewegungsverläufe in Kurven- und Gelenkgetrieben zu berechnen, zu zeichnen, zu simulieren, zu bewerten, zu optimieren und Datenträger für die Kurvenfertigung bereitzustellen. Das Programm richtet sich an Maschinenhersteller, die in ihren Maschinen ungleichförmige Bewegungen erzeugen, z. B. in Verpackungsmaschinen, Druckmaschinen, Webstühlen, Pressen, Textilmaschinen, Nähautomaten usw. Es soll von Ingenieuren angewendet werden, die die Maschinentechologie beherrschen und ihre aufgabenspezifischen Kenntnisse von den Bewegungsabläufen in die Berechnung einbringen können. Insofern ist diese Kinematikprogramm als Werkzeug zu sehen, mit dem der Ingenieur sein Know-How möglichst effektiv in eine konkrete Fertigungsunterlage umsetzen kann.

Das Programmpaket gliedert sich in vier Ausbaustufen (1).

Die Ausbaustufe 2a umfaßt die kinematische Analyse ebener Gelenkgetriebe, die sich mit Hilfe von Berechnungsmodulen beschreiben lassen.

Die Arbeitsweise des Bewertungsprogramms wird mit Hilfe eines Beispiels vorgeführt (Bild 1 (alle Bilder am Ende des Artikels)).

Basis des dargestellten Räder-Gelenkgetriebes ist ein Viergelenkgetriebe mit folgenden Abmessungen:

Kurbellänge	=	I1
Koppellänge	=	I2
Schwinge­nlänge	=	I3
Gestell definiert durch A0 und B0		

Auf der Kurbel ist das Rad d1 fest aufmontiert. Der Mittelpunkt dieses Rades ist gleich dem Kurbelwinkel. Die Räder d2 und d3 sind drehbar in den Gelenkpunkten B bzw. B0 gelagert. Das Getriebe wird an der Kurbel angetrieben, im Beispiel im Gegen­uhrzeigersinn. Der Abtrieb befindet sich am Rad d3 als Abtriebs-Drehwinkel ψ_{rad} .

Der Winkel ψ_{rad} setzt sich aus der Umlaufdrehung des Rades d_1 und der periodischen Schwingbewegung des Viergelenkgetriebes zusammen. Sei δ der Lagewinkel der Koppel, also der Winkel zwischen AB und der x-Achse, und ψ der Lagewinkel der Schwinge, also der Winkel zwischen B0B und der x-Achse. Dann gilt für den Abtriebsdrehwinkel ψ_{rad} :

$$\psi_{\text{rad}} = \psi * \left(1 + \frac{d_2}{d_3}\right) - \frac{d_1 + d_2}{d_3} * \delta + \frac{d_1}{d_3} * \text{kurbelwinkel}$$

Bei einem Umlauf der Kurbel von $\text{kurbelwinkel} = 0$ Grad bis $\text{kurbelwinkel} = 360$ Grad läuft ψ_{rad} von 0 bis $d_1/d_3 * 360$ Grad, da die Lagewinkel ψ und δ periodisch schwingen und bei 360 Grad die gleichen Werte besitzen wie bei 0 Grad. Der Abtrieb schwingt also nicht periodisch, sondern läuft ungleichförmig um mit dem Schaltwinkel $d_1/d_3 * 360$ Grad.

Das Beispielgetriebe soll so ausgelegt werden, daß das Rad d_3 bei einer Kurbelumdrehung eineinhalb Umdrehungen ausführt. Dabei soll eine Nullrast durchfahren werden. In einer noch nicht fest definierten Stellung soll also sowohl die Drehgeschwindigkeit als auch die Drehbeschleunigung des Rades $d_3 = 0$ sein.

Der Schaltwinkel von $1.5 * 360$ Grad = 540 Grad wird erreicht bei einem Verhältnis $d_1/d_3 = 1.5$, also z. B. $d_1 = 90$ mm und $d_3 = 60$ mm. Der Durchmesser des Rades d_2 ist für den Schaltwinkel unerheblich, aber wirkt über den Term $d_2/d_3 * (\psi - \delta)$ auf den Abtriebsdrehwinkel. d_2 sei zunächst mit 140 mm angenommen.

Wegen der Konsistenz der Getriebegeometrie muß

$$\begin{aligned} d_1 + d_2 &= 2 * l_2 & \text{und} \\ d_2 + d_3 &= 2 * l_3 \end{aligned}$$

sein, also $l_2 = 115$ mm und $l_3 = 100$ mm.

Der Gestellpunkt A0 liege im Nullpunkt (0;0), der Gestellpunkt B0 auf der x-Achse im Abstand von 150 mm von A0 auf (150;0).

Gesucht ist die Kurbellänge l_1 , die so bestimmt werden muß, daß das Rad d_3 an einer Stelle gerade einen Rastpunkt durchläuft. Um einen Überblick über die Funktion des Getriebes zu gewinnen, sei l_1 zunächst zu 30 mm angenommen. Damit ergibt sich das Ausgangsgetriebe in Bild 2.

Der nächste Schritt nach der Festlegung der Getriebeabmessungen ist die Eingabe der Getriebestruktur und der Maße. Dazu rufen Sie im Hauptmenü des Kinematikprogramms den Menüpunkt "Eingabe" auf.

In der Ausbaustufe 2a des Kinematikprogramms werden Gelenk- und Rädergetriebe über Module definiert (Bilder 3, 4 und 5). Das Gesamtgetriebe wird durch eine Verkettung von Einzelgliedern und Zweischlägen beschrieben. Jedes Einzelmodul beinhaltet Rechenalgorithmen, um lokal aus bekannten kinematischen Größen unbekannte zu bestimmen. Bild 3 zeigt das Einzelglied Nr. 1. Bei der Verwendung dieses Moduls müssen die Koordinaten des Punktes A bekannt sein, die konstante Länge a , der konstante Zwischenwinkel ϵ und der veränderliche Winkel α . Aus diesen vier bekannten Werten berechnet das Einzelgliedmodul die Koordinaten des Punktes B. Nachfolgende Module können die Rechnerergebnisse von vorangegangenen Modulen als Eingangsgrößen verwenden. Nach der Berechnung der Koordinaten von B sind diese überall als bekannte Größen benutzbar.

Dieses Berechnungsprinzip vor Augen, gehen Sie von der Stelle im Getriebe aus, wo eine Bewegungsaufgabe definiert ist. Im Beispiel ist das die umlaufende Bewegung der Kurbel. Diese definieren Sie über das normierte Bewegungsgesetz "Gerade". Der Kurbeldrehwinkel bekommt den Namen "kurbelwinkel". Über 360 Grad Taktwinkel dreht sich die Kurbel um +360 Grad im Gegenuhrzeigersinn. Der Taktwinkel ist ein abstrakter, an den Kurvendrehwinkel angelehnter Zeitmaßstab von 0 bis 360 Grad für einen Durchlauf.

Anschließend geben Sie die Getriebestruktur ein. Die Kurbellänge l_1 ist bekannt, der umlaufende Kurbelwinkel "kurbelwinkel" und die Lage des Kurbeldrehpunkts A_0 . Es bietet sich zunächst das Modul 1 an, um den Punkt A zu berechnen. Der Modulpunkt A (siehe Bild 3) wird gleich dem Getriebepunkt A_0 gesetzt, die Modullänge a gleich der Getriebelänge l_1 , der Winkel ϵ fällt heraus und wird deshalb 0 gesetzt. Der Modulwinkel α entspricht dem Getriebewinkel "kurbelwinkel". Das Einzelgliedmodul berechnet damit den Modulpunkt B, der im Getriebe dem Gelenkpunkt A entspricht.

Im Folgenden ist also auch A bekannt. Außerdem sind von vornherein der Punkt B_0 , die Länge l_2 und die Länge l_3 bekannt. Um weiterzurechnen, empfiehlt sich das in Bild 4 dargestellte Modul Nr. 4. Der Modulpunkt B wird mit dem Getriebepunkt A identifiziert, der Modulpunkt D mit dem Getriebepunkt B_0 , die Modullänge b mit der Getriebelänge l_2 und die Modullänge d mit der Getriebelänge l_3 . Die Getriebeage entspricht der oberen Lage $L = +1$. Dieses Modul berechnet die Modulwinkel β und δ . Der Modulwinkel β entspricht dem Getriebewinkel δ und der Modulwinkel δ dem Getriebewinkel ψ .

Den Punkt B berechnen Sie mit dem Modul 1 und den Eingangsgrößen B0, l3, und psi genauso wie den Punkt A.

Damit sind alle kinematischen Größen des Viergelenkgetriebes berechnet. Es fehlt jetzt noch die Definition des Rädergetriebes. Mit dem Rädermodul Nr. 31 (Bild 5) berechnen Sie aus den Räderdurchmessern d1 (d1) und d2 (d2), den Getriebepunkten A (B) und B (D) und dem Getriebewinkel "kurbelwinkel" (beta) den Getriebewinkel w_mrad (delta), den veränderlichen Lagewinkel des Rades d2 (In Klammern die jeweiligen Modulgrößen).

Ein zweiter Aufruf des Rädermoduls 31 liefert aus den Räderdurchmessern d2 (d1) und d3 (d2), den Getriebepunkten B (B) und B0 (D) und dem Getriebewinkel w_mrad (beta) den Abtriebsdrehwinkel psi_rad (delta).

Damit ist der Berechnungsgang für die kinematische Analyse dieses Getriebes vollständig beschrieben. Abschließend geben Sie die Koordinaten der Punkte A0 (0;0) und B0 (150;0) ein.

Die kinematische Analyse stoßen Sie im Hauptmenü über den Menüpunkt "Berechnung" an. Das Berechnungsprogramm liefert für das Ausgangsgetriebe die Graphik in Bild 6.

In der ersten Diagrammzeile ist der Verlauf des Kurbeldrehwinkels über dem Taktwinkel mit Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Antriebsmoment (Geschwindigkeit * Beschleunigung) aufgetragen. In der Zweiten Zeile sehen Sie den Verlauf des Abtriebsdrehwinkels psi_rad. Es ist erkennbar, daß das Minimum der Geschwindigkeit mit der Beschleunigung 0 oberhalb der 0 rad/s - Marke liegt. Das Rad 3 läuft also um, ohne einen Rastpunkt zu durchlaufen. Links neben jedem Diagramm sind seine Extremwerte für die verwendete Taktzahl n in U/min angetragen. Der Schaltwinkel 540 Grad ergibt sich hier aus
 $\max(\text{psi_rad}) - \min(\text{psi_rad}) = 619.634 \text{ Grad} - 79.634 \text{ Grad} = 540 \text{ Grad}$
Die Beschleunigung ergibt einen sehr harmonischen Verlauf, der eine hohe Laufruhe des Getriebes verspricht. Links unten stellt das Programm automatisch eine Skizze des Gelenk-Rädergetriebes dar. Die Markierungsstriche auf den Rädern kennzeichnen deren Lage im xy-Koordinatensystem.

Die Bewertungsdiagramme in dieser Getriebeskizze sind recht klein dargestellt. Deshalb besteht die Möglichkeit, für jede einzelne Getriebegröße ein eigenes Diagramm ausgeben zu lassen. In Bild 7 ist der Abtriebsdrehwinkel psi_rad dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die kleinste Geschwindigkeit $v_{\min} = \min(\text{psi_rad}')$ nicht 0 ist, sondern 0.924 rad/s. Um sie auf 0 zu bringen, soll die Kurbellänge l1 = 30 mm entsprechend verändert werden. Dazu bietet sich folgendes Vorgehen an:

1. Ausgabe eines zweiten Diagramms für die Kurbellänge $l_1 + 0.1 \text{ mm} = 30.1 \text{ mm}$ mit Berechnung der neuen kleinsten Geschwindigkeit $v_{\min_neu} = 0.874 \text{ rad/s}$ (Bild 7a).
2. Berechnung einer neuen Kurbellänge $l_{1_neu} = l_1 - v_{\min} \cdot \frac{0.1 \text{ mm}}{v_{\min_neu} - v_{\min}} = 31.848 \text{ mm}$
3. Ausgabe eines dritten Diagramms für eine neue Kurbellänge $l_1 = 31.848 \text{ mm}$ mit Berechnung der neuen kleinsten Geschwindigkeit $v_{\min} = -0.003 \text{ rad/s}$ (Bild 7b).
4. Ausgabe eines vierten Diagramms für die Kurbellänge $l_1 + 0.1 \text{ mm} = 31.948 \text{ mm}$ mit Berechnung der neuen kleinsten Geschwindigkeit $v_{\min_neu} = -0.053 \text{ rad/s}$ (Bild 7c).
5. Berechnung einer neuen Kurbellänge $l_{1_neu} = l_1 - v_{\min} \cdot \frac{0.1 \text{ mm}}{v_{\min_neu} - v_{\min}} = 31.842 \text{ mm}$
6. Ausgabe eines fünften Diagramms für eine neue Kurbellänge $l_1 = 31.842 \text{ mm}$ mit Berechnung der kleinsten Geschwindigkeit $v_{\min} = 0.000 \text{ rad/s}$ (Bild 7d)

Damit ist die Kurbellänge hinreichend genau bestimmt. Wenn Sie alle Diagramme über den Bildschirm ausgeben, dauert der gesamte Vorgang nicht länger als 10 Minuten.

Als Lösung der Getriebeaufgabe ergibt sich das in den Bildern 8 und 9 dargestellte Getriebe. In Bild 10 sehen Sie, daß das Geschwindigkeitsminimum bei 0 rad/s liegt und mit dem Nulldurchgang der Beschleunigung zusammenfällt. Wegen des gleichmäßigen Beschleunigungsverlaufs in diesem Bereich verläuft das Antriebsmoment sehr flach, so daß das Getriebe sich im Bereich des Stillstand sehr ruhig verhält.

Ein besonderes Bonbon des Kinematikprogramms ist die dynamische Simulation des Getriebes. Sie können das Berechnungsprogramm aus der Benutzeroberfläche heraus mit einer Option aufrufen, die dafür sorgt, daß ein flimmerfrei darstellbarer Film entsteht. Um Getriebe zu entwickeln und zu optimieren, ist die Ausgabe eines solchen Films fast unerlässlich, insbesondere, wenn es sich um komplizierte Bewegungsaufgaben oder Getriebestrukturen handelt. Vorteilhaft ist dabei, daß Problemstellen oder Ansatzpunkte für Verbesserungen mit einem Blick erfaßt werden können.

Über den Menüpunkt "Tabellen" können Sie für jede kinematische Größe Wertetabellen dieser Größe über dem Taktwinkel ϕ ausgeben (Beispiel Tabelle 1).

Die Ausbaustufe 2a dieses Kinematikprogramms eignet sich für die Berechnung und Optimierung von ebenen Gelenkgetrieben beliebiger Komplexität, die sich mit Hilfe von

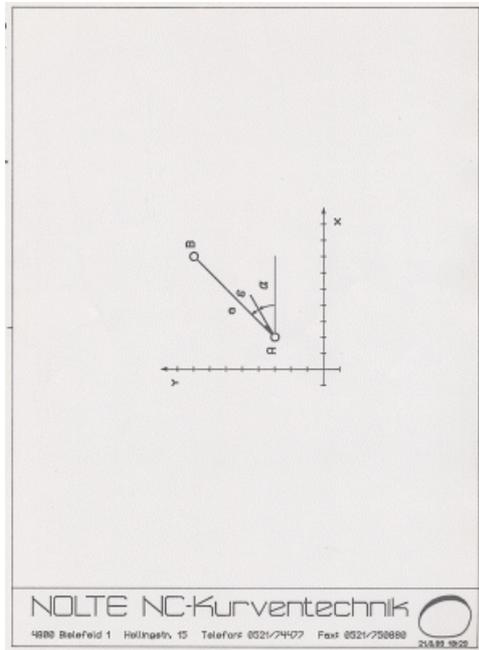


Bild 3

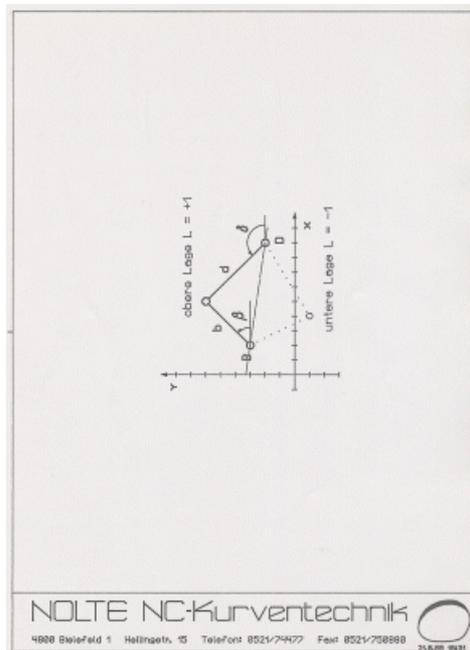


Bild 4

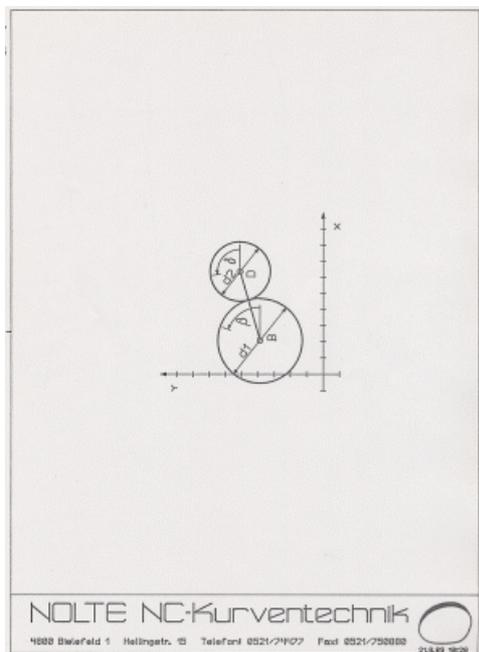


Bild 5

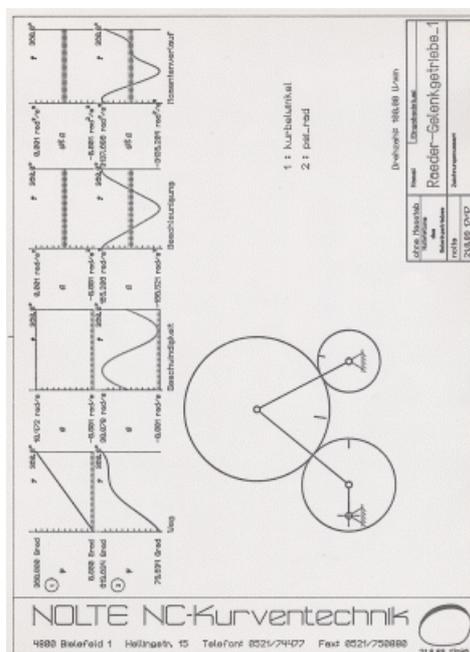


Bild 6

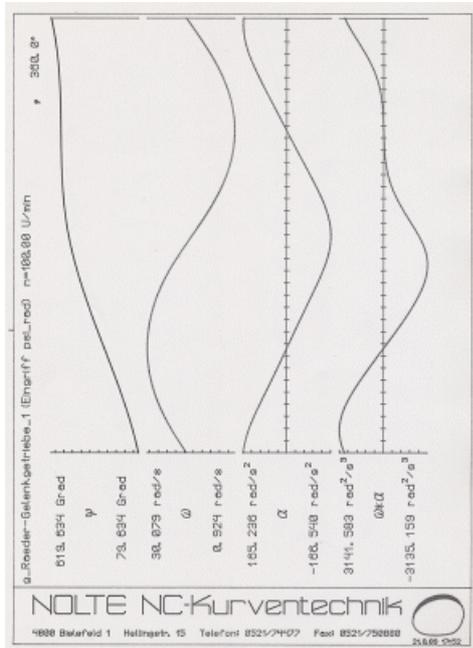


Bild 7

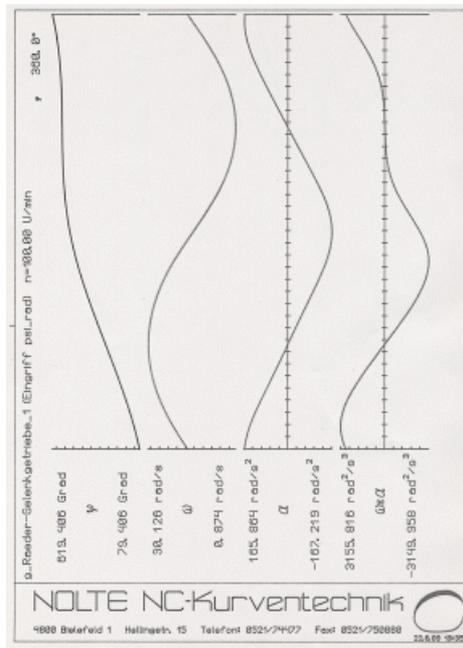


Bild 7a

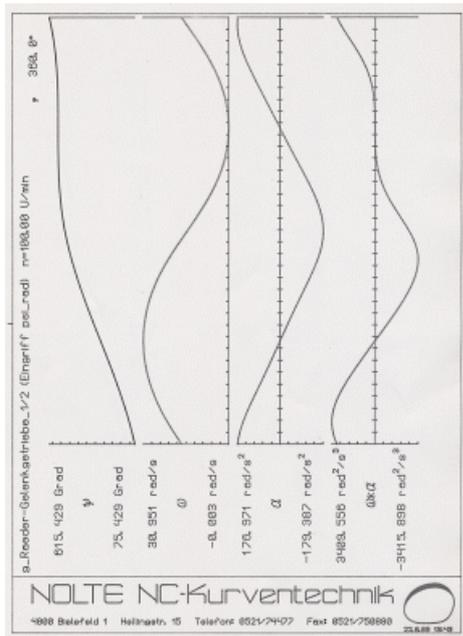


Bild 7b

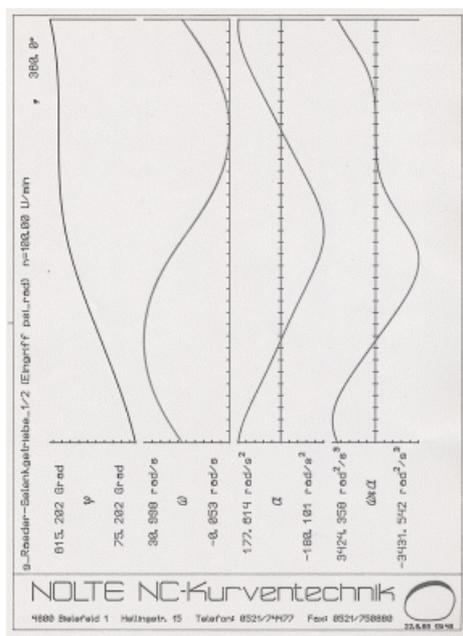


Bild 7c

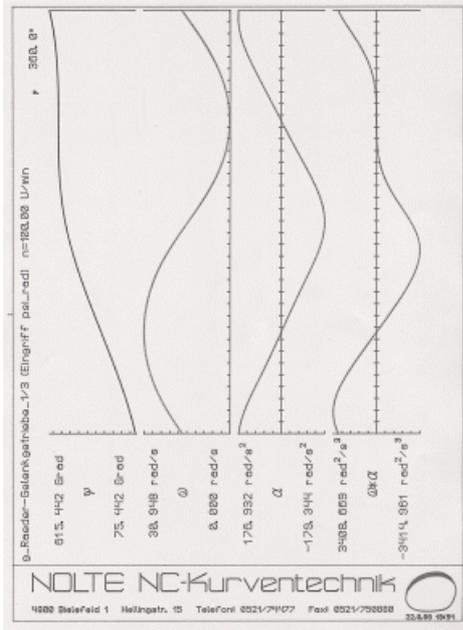


Bild 7d

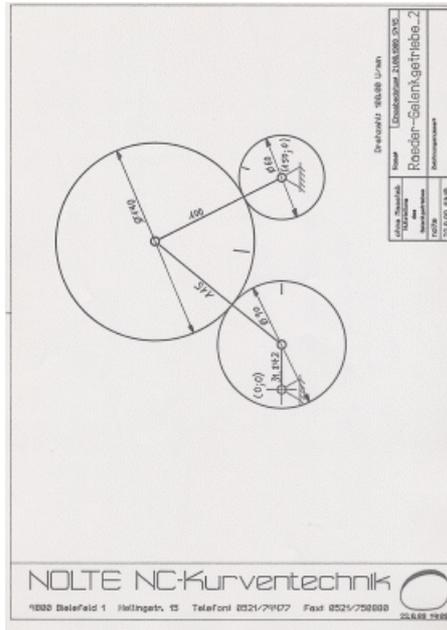


Bild 8

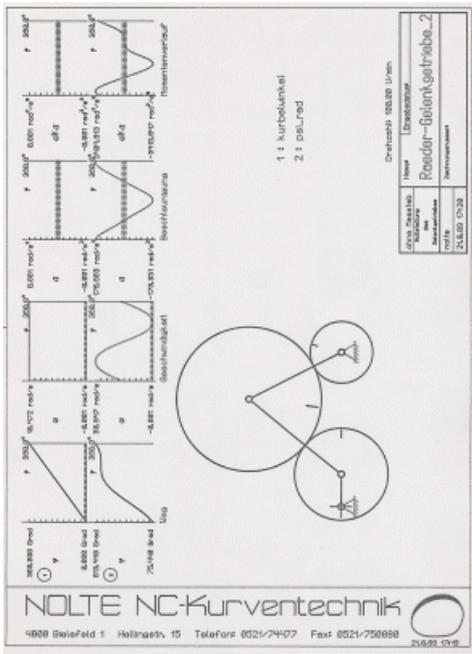


Bild 9

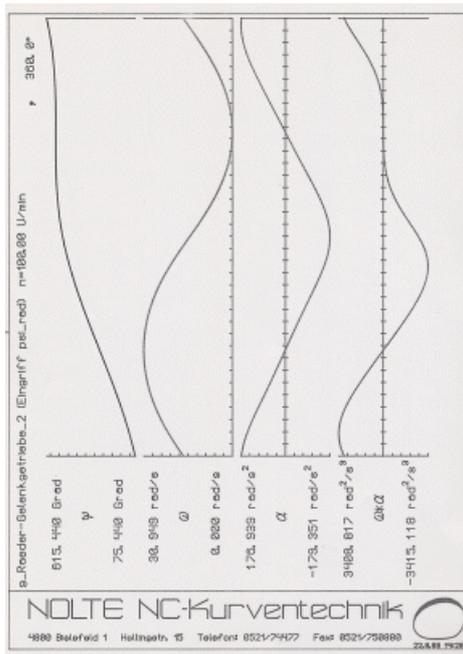


Bild 10

OPTIMUS MOTUS[®] NOLTE NC-Kurventechnik 

Aug 22 14:11 1989 /usr/n/gstr/daten/psi_rad.rep Page 1

Report psi_rad von Programm g_Beeder-Gelenkgetriebe_2

Drehzahl: 100.000 U/min

psi = 0.000 Grad	psi_rad = 75.440 Grad
psi = 5.000 Grad	psi_rad = 82.961 Grad
psi = 10.000 Grad	psi_rad = 91.165 Grad
psi = 15.000 Grad	psi_rad = 100.031 Grad
psi = 20.000 Grad	psi_rad = 110.529 Grad
psi = 25.000 Grad	psi_rad = 122.620 Grad
psi = 30.000 Grad	psi_rad = 136.281 Grad
psi = 35.000 Grad	psi_rad = 151.455 Grad
psi = 40.000 Grad	psi_rad = 168.090 Grad
psi = 45.000 Grad	psi_rad = 176.160 Grad
psi = 50.000 Grad	psi_rad = 187.604 Grad
psi = 55.000 Grad	psi_rad = 201.276 Grad
psi = 60.000 Grad	psi_rad = 215.426 Grad
psi = 65.000 Grad	psi_rad = 229.709 Grad
psi = 70.000 Grad	psi_rad = 244.161 Grad
psi = 75.000 Grad	psi_rad = 258.750 Grad
psi = 80.000 Grad	psi_rad = 273.506 Grad
psi = 85.000 Grad	psi_rad = 288.270 Grad
psi = 90.000 Grad	psi_rad = 303.043 Grad
psi = 95.000 Grad	psi_rad = 317.781 Grad
psi = 100.000 Grad	psi_rad = 332.441 Grad
psi = 105.000 Grad	psi_rad = 346.979 Grad
psi = 110.000 Grad	psi_rad = 361.349 Grad
psi = 115.000 Grad	psi_rad = 375.506 Grad
psi = 120.000 Grad	psi_rad = 389.485 Grad
psi = 125.000 Grad	psi_rad = 403.298 Grad
psi = 130.000 Grad	psi_rad = 416.938 Grad
psi = 135.000 Grad	psi_rad = 429.378 Grad
psi = 140.000 Grad	psi_rad = 441.470 Grad
psi = 145.000 Grad	psi_rad = 453.268 Grad
psi = 150.000 Grad	psi_rad = 464.727 Grad
psi = 155.000 Grad	psi_rad = 475.905 Grad
psi = 160.000 Grad	psi_rad = 486.868 Grad
psi = 165.000 Grad	psi_rad = 497.572 Grad
psi = 170.000 Grad	psi_rad = 508.099 Grad
psi = 175.000 Grad	psi_rad = 518.229 Grad
psi = 180.000 Grad	psi_rad = 519.547 Grad
psi = 185.000 Grad	psi_rad = 520.254 Grad
psi = 190.000 Grad	psi_rad = 532.253 Grad
psi = 195.000 Grad	psi_rad = 537.561 Grad
psi = 200.000 Grad	psi_rad = 542.201 Grad
psi = 205.000 Grad	psi_rad = 546.203 Grad
psi = 210.000 Grad	psi_rad = 549.694 Grad
psi = 215.000 Grad	psi_rad = 552.446 Grad
psi = 220.000 Grad	psi_rad = 554.778 Grad
psi = 225.000 Grad	psi_rad = 556.642 Grad
psi = 230.000 Grad	psi_rad = 558.098 Grad
psi = 235.000 Grad	psi_rad = 559.188 Grad
psi = 240.000 Grad	psi_rad = 559.968 Grad
psi = 245.000 Grad	psi_rad = 560.493 Grad
psi = 250.000 Grad	psi_rad = 560.813 Grad
psi = 255.000 Grad	psi_rad = 560.979 Grad
psi = 260.000 Grad	psi_rad = 561.042 Grad
psi = 265.000 Grad	psi_rad = 561.051 Grad
psi = 270.000 Grad	psi_rad = 561.058 Grad
psi = 275.000 Grad	psi_rad = 561.110 Grad
psi = 280.000 Grad	psi_rad = 561.299 Grad
psi = 285.000 Grad	psi_rad = 561.553 Grad
psi = 290.000 Grad	psi_rad = 562.041 Grad
psi = 295.000 Grad	psi_rad = 562.775 Grad
psi = 300.000 Grad	psi_rad = 563.802 Grad
psi = 305.000 Grad	psi_rad = 565.178 Grad
psi = 310.000 Grad	psi_rad = 566.899 Grad
psi = 315.000 Grad	psi_rad = 569.145 Grad
psi = 320.000 Grad	psi_rad = 571.840 Grad
psi = 325.000 Grad	psi_rad = 575.048 Grad
psi = 330.000 Grad	psi_rad = 578.871 Grad

Nolte NC-Kurventechnik 4800 Bielefeld 1 Hellingstr.16 Tel.0521/744777 Telefax 0521/750880

OPTIMUS MOTUS[®] NOLTE NC-Kurventechnik 

Aug 22 14:11 1989 /usr/n/gstr/daten/psi_rad.rep Page 2

psi = 335.000 Grad	psi_rad = 583.287 Grad
psi = 340.000 Grad	psi_rad = 586.246 Grad
psi = 345.000 Grad	psi_rad = 590.077 Grad
psi = 350.000 Grad	psi_rad = 600.456 Grad
psi = 355.000 Grad	psi_rad = 607.617 Grad
psi = 360.000 Grad	psi_rad = 615.440 Grad

Nolte NC-Kurventechnik 4800 Bielefeld 1 Hellingstr.16 Tel.0521/744777 Telefax 0521/750880