

Kinematik optimieren

Maschinenmarkt Ausgabe 1 - 1989

Modular aufgebautes Programm zum Auslegen von Kurvengetrieben für gleichförmige Bewegungen

Ein Programm zum Berechnen und Simulieren von Kurven- und Gelenkgetrieben unterstützt Konstrukteure beim Realisieren ungleichförmiger Bewegungen in Maschinen. Der Anwender kann Bewegungen nach seinen Erfahrungen frei gestalten und optimieren, um eine Maximierung der Leistung zu erzielen.

Das Rechnerprogramm dient dazu, Bewegungsverläufe in Kurven- und Gelenkgetrieben zu berechnen, zu zeichnen, zu simulieren, zu bewerten, zu optimieren und Datenträger für die Kurvenfertigung bereitzustellen. Es unterstützt Maschinenhersteller, die in ihren Maschinen ungleichförmige Bewegungen erzeugen, zum Beispiel in Verpackungsmaschinen, Druckmaschinen, Webstühlen, Pressen, Textilmaschinen, Nähautomaten. Das Programm können Ingenieure anwenden, welche die Maschinentechologie beherrschen, und die ihre aufgabenspezifischen Kenntnisse von den Bewegungsabläufen in die Berechnung einbringen können. Insofern ist das Programm als Werkzeug zu sehen, mit dem der Ingenieur sein Know-how möglichst effektiv in eine konkrete Fertigungsunterlage umsetzen kann.



Bild 1

Das Programmpaket gliedert sich in vier Ausbaustufen: Die erste Ausbaustufe umfaßt die Module zum Auslegen von Kurvengetrieben mit Schwinge oder Stößel, ein Modul für Viergelenkgetriebe und Schubkurbeln sowie ein Modul mit Mechanismenprogramm, Körpermodellen und rechnerischer Kollisionsprüfung; die zweite Ausbaustufe umfaßt allgemeine ebene Gelenkgetriebe, einschließlich der Simulation; die dritte Ausbaustufe dient der Kopplung von Gelenkgetrieben mit Kurvengetrieben; die vierte Ausbaustufe umfaßt ebene und räumliche Gelenkgetriebe und Kurvengetriebe, Kinematik und Kinetostatik sowie das Bereitstellen von Datenträgern für die Fertigung. Die einfachste Ausbaustufe, das Basisprogramm, wird anhand eines Beispiels erläutert.

Die einfachste Ausbaustufe 1a des Pakets - hier Basisprogramm genannt - für Kurvengetriebe soll hier vorgestellt werden.

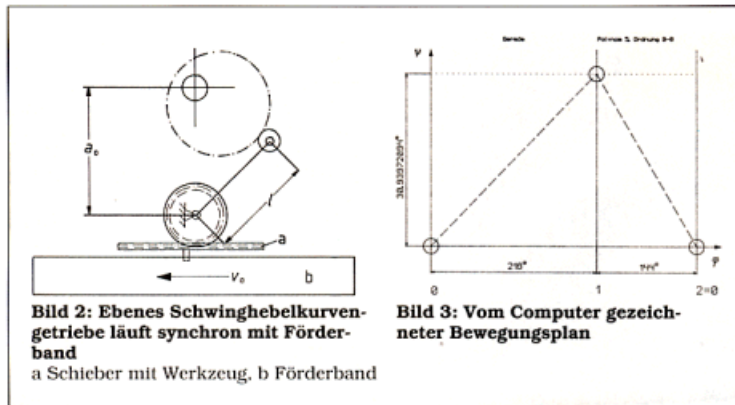


Bild 2: Ebenes Schwinghebelkurvengetriebe läuft synchron mit Förderband
a Schieber mit Werkzeug, b Förderband

Bild 3: Vom Computer gezeichneter Bewegungsplan

Das Basisprogramm umfaßt die kinematische Analyse ebener dreigliedriger Kurvengetriebe mit Schwinghebel oder Rollenschieber. Diese Getriebe werden häufig "Standardkurven" genannt. Dabei wird das Bewegungsgesetz direkt an der Kurvenrolle verwirklicht. Bild 1 verdeutlicht die Arbeitsweise dieser Kurvengetriebe. Das Basisprogramm befaßt sich mit der Berechnung und Bewertung von

Kurvengetrieben. Sowohl für Schwinghebel- als auch für Stößelkurven gibt es die Bauformen als offene Außenkurven, offene Innenkurven, die beide kraftschlüssig arbeiten, Nutkurven, Stegkurven, und Doppelkurven, die auch konjugierte Kurven genannt werden (auf Tafel 1 am Ende des Artikels). Zwangsläufig arbeitende Kurvenflankenpaare sind für die Berechnung auf eine Kombination von offenen Kurven zurückzuführen. Deshalb können alle Getriebebauformen mit einem einzigen Berechnungsprogramm behandelt werden. Ein Anwendungsfall (Bild 2) verdeutlicht den Programmablauf.

Über ein ebenes Schwinghebelkurvengetriebe wird eine Zahnstange angetrieben, die einen Schieber verfährt. Der Schieber muß über einen Kurvendrehwinkel von 216° mit einem parallellaufenden Förderband synchron laufen. In dieser Zeit werden von einem Werkzeug auf dem Schieber Teile bearbeitet, während sie von dem Band transportiert werden. Je Kurvenumdrehung bewegt sich das Förderband 45 mm weiter. Das Kurvengetriebe sollte möglichst ruhig laufen, um die Qualität der Verarbeitung zu gewährleisten. Außerdem soll das Kurvengetriebe möglichst klein bauen. Das Zahnrad auf dem Kurvenhebel hat $z = 40$ Zähne und einen Modul $m = 2,5$.

Gesucht ist neben der Form der Kurve ein günstiger Bewegungsverlauf für den Schieber. Unbekannt sind außerdem der Achsabstand a des Kurvenhebels von der Kurvenmitte und die Schwinghebellänge l . Die Kurvenrolle hat einen Durchmesser von 30 mm. Die Kurvenwelle hat ebenfalls einen Durchmesser von 30 mm. Es wird eine Kurvendrehzahl von $n = 200 \text{ min}^{-1}$ angestrebt.

Zunächst wird der Bewegungsplan für das Schwinghebelkurvengetriebe aufgestellt. Der Verfahrweg des Schiebers sei s , der Schwingwinkel des Kurvenhebels ψ . Beide Größen sind abhängig vom Kurvendrehwinkel φ .

In der Synchronphase muß der Schieber mit der gleichen konstanten Geschwindigkeit verfahren wie das Förderband. Das Zahnradgetriebe zwischen Schieber und Kurvenhebel hat eine konstante Übersetzung, die Bewegung des Kurvenhebels wird also linear auf den Abtriebsschieber übertragen. Demzufolge dreht sich der Schwinghebel in dieser Zeit auch mit konstanter Geschwindigkeit.

Wenn das Förderband je Kurvenumdrehung (360°) 450mm weiterbewegt wird, so legt es in der Synchronphase (216°) 27 mm zurück. Der Schwinghebel dreht sich in dieser Zeit so weiter, daß die Rolle sich von der Kurvenmitte wegbewegt. Deshalb bekommt der Schwingwinkel ein positives Vorzeichen:

$$\psi_{01} = \frac{s_{01} \cdot 2}{m \cdot z} = 0,54 \text{ rad} = 30,93972094^\circ \quad (1)$$

Diese Teilbewegung bildet den Abschnitt "01" im Bewegungsplan. Dafür wird das Bewegungsgesetz "Gerade" verwendet, das eine konstante normierte Geschwindigkeit von $f'(z) = 1$ und eine konstante normierte Beschleunigung von $f''(z) = 0$ hat (VDI-Richtlinie 2143).

Der zweite Bewegungsabschnitt "10" ist so anzupassen, daß ein ruckfreier Übergang mit möglichst günstigen Beschleunigungsverläufen entsteht.

$$\bullet_{10} = 360^\circ - 216^\circ = 144^\circ \quad (2)$$

Der Schwingwinkel ist:

$$\bullet_{10} = -\bullet_{10} = -30,93972094^\circ \quad (3)$$

Die Kurvenrolle fährt in diesem Rückabschnitt auf die Kurvenmitte zu. Zu Beginn des Rückabschnitts bewegt sich die Rolle noch mit der Geschwindigkeit der Synchronphase. Das Bewegungsgesetz muß also an eine normierte Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = f'(0) \neq 0$ anpaßbar sein. Am Ende des Rückabschnitts muß hingegen wieder die Geschwindigkeit der Synchronphase erreicht sein.

Das gesuchte Bewegungsgesetz muß auch an eine normierte Endgeschwindigkeit $v_1 = f'(1) \neq 0$ anpaßbar sein. Im Basisprogramm steht für solche Aufgaben das Polynom fünfter Ordnung für Bewegung-in-Bewegung zur Verfügung. Dieses Bewegungsgesetz kann überall verwendet werden, wo Geschwindigkeit oder Beschleunigung am Anfang oder am Ende des betreffenden Abschnitts ungleich "Null" ist. Dem Polynom fünfter Ordnung werden vier Randwerte vorgegeben, die nach Gleichungen (4) bis (7) ermittelt werden:

$$\dot{\varphi}_0 = f'_{01}(1) \quad (1) \quad \frac{\overset{\bullet}{\varphi}_{01} \quad \overset{\bullet}{\varphi}_{10}}{\overset{\bullet}{\varphi}_{01} \quad \overset{\bullet}{\varphi}_{10}} = 1 \frac{30,93972094 * 144}{216 * (-30,93972094)} = -0,6 \quad (4)$$

$$\ddot{\varphi}_0 = f''_{01}(1) \quad (1) \quad \frac{\overset{\bullet}{\varphi}_{01} \quad \overset{\bullet^2}{\varphi}_{10}}{\overset{\bullet^2}{\varphi}_{01} \quad \overset{\bullet}{\varphi}_{10}} = 0 \quad (5)$$

$$\dot{\varphi}_1 = f'_{01}(0) \quad (0) \quad \frac{\overset{\bullet}{\varphi}_{01} \quad \overset{\bullet}{\varphi}_{10}}{\overset{\bullet}{\varphi}_{01} \quad \overset{\bullet}{\varphi}_{10}} = 1 \frac{30,93972094 * 144}{126 * (-30,93972094)} = -0,6 \quad (6)$$

$$\ddot{\varphi}_1 = f''_{01}(0) \quad (0) \quad \frac{\overset{\bullet}{\varphi}_{01} \quad \overset{\bullet^2}{\varphi}_{10}}{\overset{\bullet^2}{\varphi}_{01} \quad \overset{\bullet}{\varphi}_{10}} = 0 \quad (7)$$

Damit ist der Bewegungsplan für das Kurvengetriebe fertiggestellt (Bild 3). Dieser Bewegungsplan ist für die Optimierung am Rechner direkt verwendbar. Mit dem Basisprogramm kann man die Güte des Beschleunigungsverlaufes anhand der ausgegebenen Diagramme sofort bewerten.

Computer optimiert den Lösungsvorschlag

Als nächstes sind Achsabstand α und Hebellänge l so zu bestimmen, daß ein möglichst kleines Kurvengetriebe, möglichst günstige Übertragungsverhältnisse und vertretbare Krümmungsradien am Kurvenprofil erzielt werden. Dazu wird das Programm aufgerufen und im ersten Auswahlménü der Getriebetyp "Schwinghebelkurvengetriebe" ausgewählt. Es erscheint ein Arbeitsménü auf dem Bildschirm (Tafel 2). Für die Optimierung gibt der Benutzer zunächst einen Lösungsvorschlag ein. Dieser Vorschlag kann anhand der Diagramme und Tabellen bewertet und verbessert werden. Zunächst wird der Ménüpunkt c - "Eingabe oder Änderung" - aufgerufen. Hier werden nacheinander die geometrischen Daten des Kurvengetriebes für einen Lösungsvorschlag eingegeben (Tafel3).

Anschließend wird der vorher festgelegte Bewegungsplan eingegeben: Abschnitt "01" (Gerade, $\psi = 30,93972094^\circ$, $\varphi = 216^\circ$); Abschnitt "10" (Polynom fünfter Ordnung B - B, $\psi = -30,93972094^\circ$, $\varphi = 144^\circ$, $\vartheta_0 = -0,6$, $\alpha_0 = 0$, $\vartheta_1 = -0,6$, $\alpha_1 = 0$).

Jetzt wird vom Programm die Kurvenberechnung durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse werden als Kurvengrafik (Bild 4) auf den Grafikbildschirm ausgegeben. Zusätzlich werden die wichtigsten Bewertungsgrößen für das Kurvengetriebe auf dem alphanumerischen Terminal angezeigt (Tafel 4). Die Kurvengrafik (Bild 4) zeigt eine im Verhältnis zum Kurvenhebel sehr große Kurvenscheibe. Die maximalen Differenzen des Übertragungswinkels von der 90° -Linie in positiver und in negativer Richtung sind nahezu gleich. Die Krümmungsradien an der Rollenmittelpunktsbahn (strichpunktiert) sind völlig unkritisch.

Die Diagramme auf der rechten Seite der Darstellung zeigen den Wegverlauf ψ , den Geschwindigkeitsverlauf ω und den Beschleunigungsverlauf α für den Schwingwinkel, außerdem den Verlauf des Übertragungswinkels μ und des Krümmungsradius ρ an der Rollenmittelpunktsbahn. Alle Werte sind über den Kurvendrehwinkel φ von 0° bis 360° aufgetragen. Am Wegverlauf wird deutlich, daß das Bewegungsgesetz für den Rücklauf (Abschnitt "10") überschwingt. Bevor der eigentliche Rückhub beginnt, muß der am Anfang des Bewegungsabschnitts noch in Bewegung befindliche Kurvenhebel zuerst abgebremst werden. Entsprechend muß der Kurvenhebel am Ende des Abschnitts "10" auf die im Synchronlauf geforderte Geschwindigkeit beschleunigt werden. Das Überschwingen ist in diesem Anwendungsfall notwendig und gewollt. Deutlich erkennbar ist der Synchronlauf (konstante Geschwindigkeit) im Diagramm für die Geschwindigkeit. Der Bereich der konstanten Geschwindigkeit liegt am Anfang des Verlaufs. Der Beschleunigungsverlauf für den Schwingwinkel und wegen der linearen Übertragung letztlich auch für den Schieber ist im Diagramm "alpha" dargestellt.

Obwohl trigonometrische Bewegungsgesetze im allgemeinen einen ruhigeren Lauf versprechen als Polynomgesetze, liegt hier ein ausgewogener, weicher Beschleunigungsverlauf vor. Die maximalen Winkelbeschleunigungen sind im Diagramm angetragen. Die Maximalbeschleunigung für den Schieber ist:

$$\bullet_{s \max} = 0,5 * m * z \bullet_{\max} = 17,318 \text{ m/s}^2 \quad (8)$$

Diese Maximalbeschleunigung ist unabhängig von der gewählten Kurvengeometrie. Sie hängt nur vom Bewegungsplan ab.

Vom Krümmungsradienverlauf ist in den Diagrammen nichts dargestellt, weil der kleinste Krümmungsradius noch außerhalb des dargestellten Bereichs liegt. Die beiden waagerechten Striche im Diagramm markieren den Rollenradius. Wenn der Krümmungsradienverlauf an einer konvexen Profilstelle zwischen diesen Markierungslinien liegt, besteht Unterschnitt.

An dieser Stelle wartet das Programm, bis der Benutzer die RETURN - Taste drückt. Mit dem Menüpunkt "Ausgabe auf Peripherie" kann die Grafik dann auf den Plotter ausgegeben werden.

Bewegungsablauf simulieren

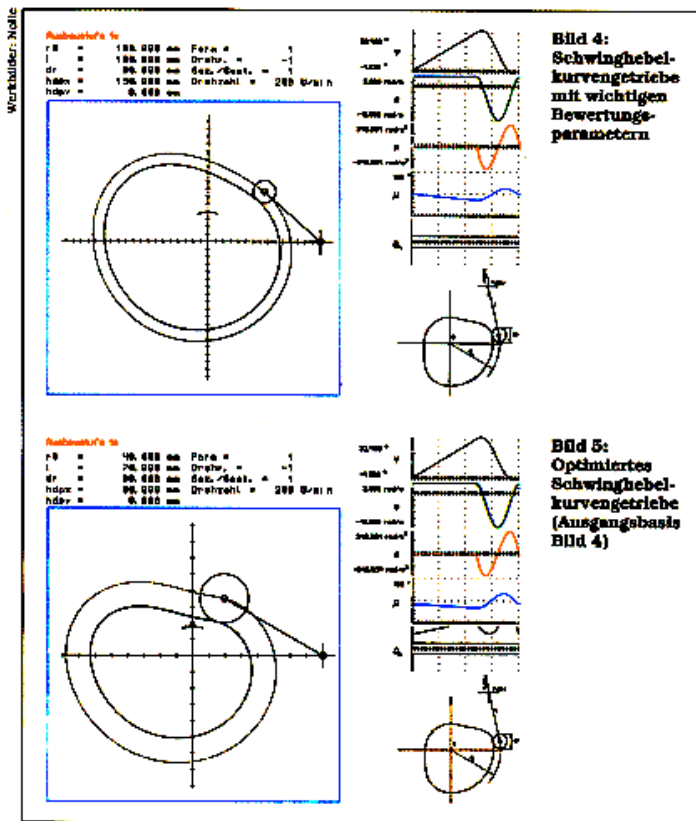
Mit sukzessivem Aufruf des Menüs "Eingabe oder Änderung" und Änderung der geometrischen Parameter r_0 , l und h_{dpx} (nicht des Bewegungsplans) wird versucht, das Kurvengetriebe zu verkleinern, bis der kleinste Übertragungswinkel die 60° -Marke unterschreitet oder der kleinste Profildurchmesser

$$2 \left(r_{\min} - \frac{dR}{2} \right) \quad (9)$$

in die Nähe des vorgesehenen Wellendurchmessers von 30 mm gelangt.

Nach wenigen Optimierungsschritten hat man eine akzeptable Lösung erhalten (Bild 5):

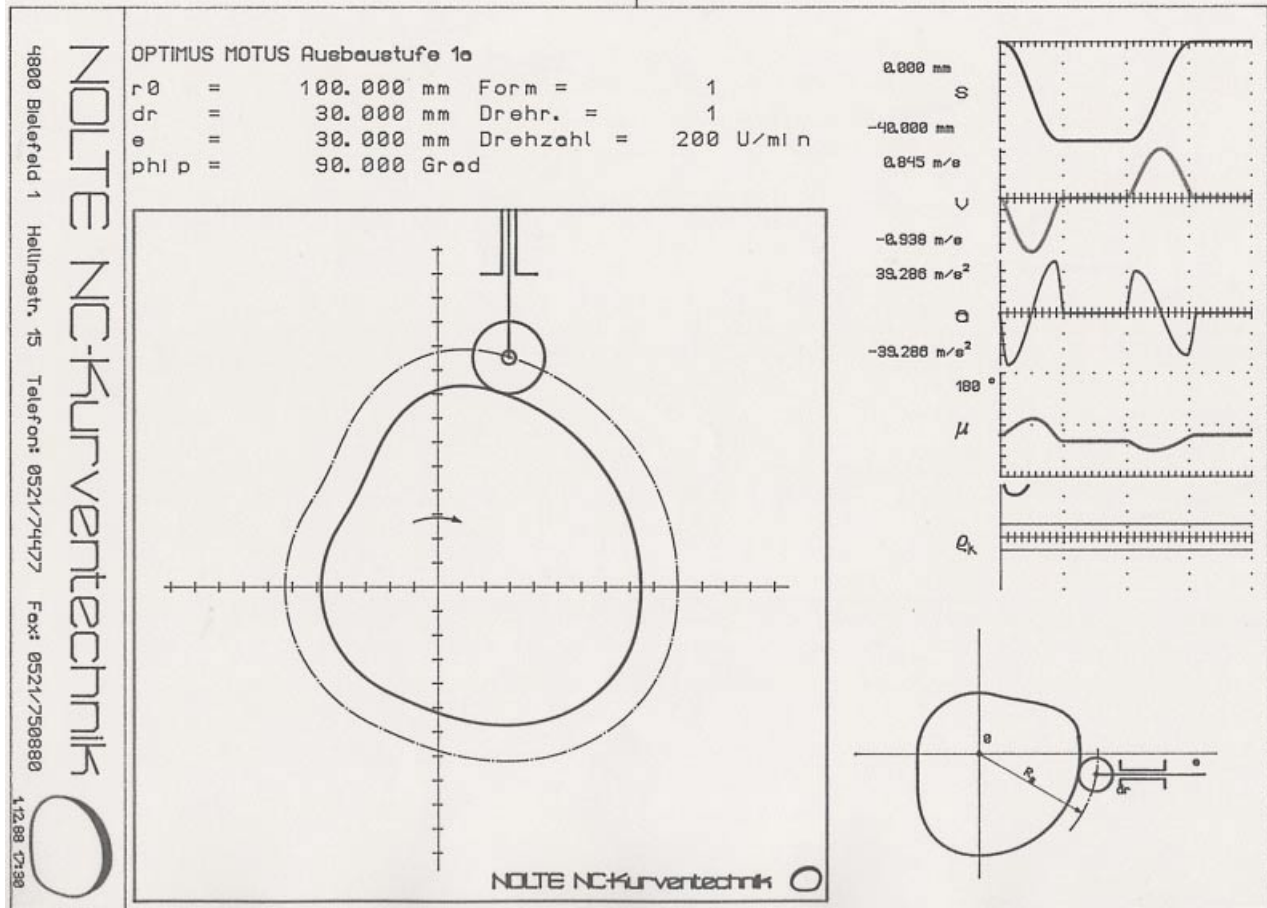
μ_{\min}	= 59,516°	(angestrebt wurde ein kleinster Übertragungswinkel von etwa 60°);
$\rho_{\min, \text{konkav, Rolle}}$	= 111,586 mm,	(Krümmungsradius ist noch unkritisch, die untere Grenze liegt bei etwa $dR/2 * 1,4$);
$\rho_{\min, \text{konvex, Rolle}}$	= 38,637 mm	
α_{\max}	= 24,245 m/s ² ;	(angestrebt wird ein kleinster Radius von etwa 37 mm).
$r_{\text{minimal, Rolle}}$	= 38,136 mm;	
$r_{\text{max, Rolle}}$	= 78,240 mm	




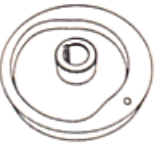

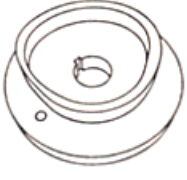
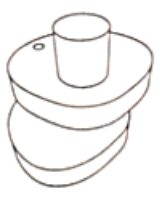
Nach der Optimierung kann der erzeugte Datensatz mit der Funktion "speichern" für eine spätere Bearbeitung gesichert werden.

Um sich einen Eindruck von dem Bewegungsablauf zu verschaffen, kann das Kurvengetriebe grafisch simuliert werden. Mit dem Menüpunkt "Simulation" wird ein Film aufbereitet, der anschließend beliebig oft aufgerufen werden kann und eine flimmerfreie dynamische Darstellung des laufenden Kurvengetriebes zeigt. Es ist außerdem auch möglich, eine Mittenbohrung sowie ein Paßloch einzeichnen zu lassen, um die Anschaulichkeit der Darstellung zu erhöhen. Die Bedienung des Moduls für Stoßelkurvengetriebe entspricht genau derjenigen des Moduls für Schwinghebelkurvengetriebe.

Ein Beispiel für ein Stoßelkurvengetriebe ist in Bild 6 dargestellt.



Tafel 1: Bauformen von Kurvengetrieben

Kurvenart	Darstellung
Außenkurve	
Innenkurve	
Nutkurve	
Stegkurve	
Doppelkurve	

Tafel 2: Auswahlmenü für Schwinghebelkurvengetriebe

Menüpunkt	Menü für Hebelkurve
a	Bildschirmfenster
b	Ausgabe auf Peripherie
c	Eingabe oder Änderung
d	Analyse
e	Simulation
f	Tabelle
g	Laden
h	Speichern
i	Ende

Tafel 3: Eingaben zum Berechnen eines Kurvengetriebes

Parameter	Werte
Ausgangsradius r_0 der Rollenmittelpunktsbahn	100 mm
Schwinghebellänge l	100 mm
Rollendurchmesser d_r	30 mm
X-Koordinate hdp_x des Hebeldrehpunktes	150 mm
Y-Koordinate hdp_y des Hebeldrehpunktes	0 mm
Kurvenform (offene Außenkurve)	1
Drehrichtung (gegen den Uhrzeigersinn)	-1
Hebelbewegung (gezogen)	1
Drehzahl n	200 min^{-1}

Tafel 4: Berechnete Kurvenparameter

Parameter	Werte
μ_{\min}	64.284°
$\rho_{\min, \text{konvex, R}}$	96.605 mm
$\rho_{\min, \text{konkav, R}}$	-
$\alpha_{r, \text{max}}$	34.635 m/s^2
$r_{\min, \text{R}}$	97.363 mm
$r_{\max, \text{R}}$	155.461 mm