

# Kinematik-Nachweis

Musterdokument mit vollständigen Beispielwerten. Es zeigt den Nachweis, den der gekaufte Export für IHRE Eingaben erzeugt - es ist selbst kein Nachweis für ein Bauteil.

Projekt: Musterprojekt

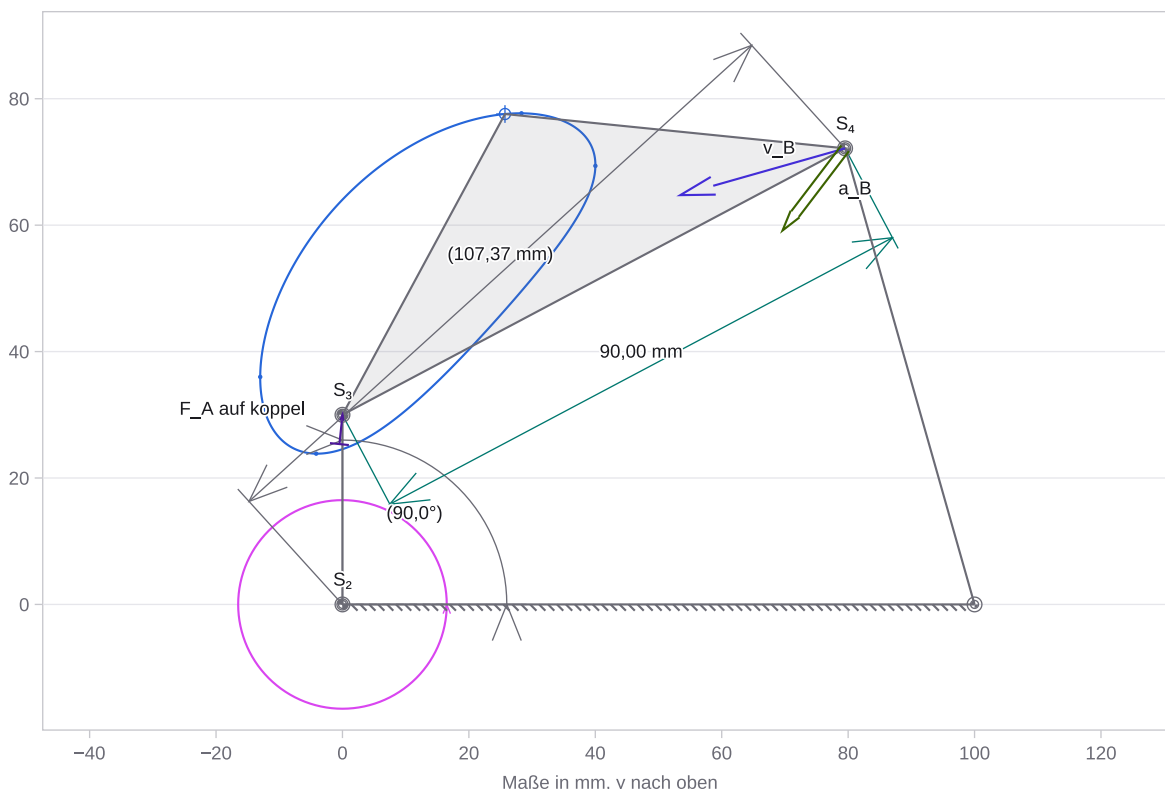
Bauteil/Position: kein reales Bauteil

Bearbeiter: Muster, ohne Freigabe

Gesamtbewertung: in Ordnung — jede geprüfte Bedingung ist erfüllt. Bewertet wurden nur die Zeilen der Nachweistabelle; alles Übrige steht als Kennwert ohne Bewertung.

Dieses Dokument belegt die BEWEGUNG des unten beschriebenen Getriebes: seine Struktur, seinen Umlauf, die daraus gerechneten Winkel, Momente und Gelenkkräfte sowie die Genauigkeit, mit der gerechnet wurde. Es belegt ausdrücklich KEINE Festigkeit, keine Lebensdauer, keine Eigenfrequenz und keine Fertigungstoleranz. Von der Kollisionsfreiheit belegt es genau das, was geprüft wurde: die Lage der Gliedmittellinien gegenüber den gezeichneten Sperrflächen — nicht die Glieder untereinander, nicht ihre wirkliche Breite und nichts, wo keine Sperrfläche vorgegeben ist.

## Systemskizze in Lage 90 von 360



Gezeichnet ist dieselbe Szene wie auf dem Bildschirm: Gestell, Glieder und Gelenke im neutralen Ton.

Die Bahn des markierten Punktes ist in der Kurvenfarbe gezogen; sein Fadenkreuz und seine Umkehrmarken tragen denselben Ton.

Der Antrieb hebt sich über den Kreis um sein Lager ab. Die Pfeilspitzen darauf zeigen, wohin er dreht — eine bei einem vollen Umlauf, zwei bei einem Antrieb, der zwischen zwei Grenzen schwenkt. Der waagerechte Strich vom Drehpunkt bis zum Kreis ist die Nullrichtung, gegen die der Bogen zu lesen ist: Die Winkel des Antriebs zählen von ihm aus gegen den Uhrzeigersinn und nicht von der Gliedlinie, die dort ansetzt.

An einzelnen Punkten stehen Vektorpfeile, deren LÄNGE die Größe angibt: Sie ist der Betrag geteilt durch den Maßstab, der unter diesem Absatz steht. Alle Arten tragen in diesem Dokument denselben Farbton; getrennt werden sie über die Gestalt und über das Wort an jedem einzelnen Pfeil. Geschwindigkeit und Beschleunigung setzen ihren Fuß auf den Punkt und zeigen von ihm weg, die Gelenkkräfte setzen ihre Spitze darauf. Die Beschleunigung trägt zwei dünne Parallelen statt einer Linie; am Bildschirm kommt für sie eine eigene Farbe dazu, die es hier nicht gibt. Jeder Pfeil ist beschriftet; die Beträge stehen zusätzlich als Zahlen weiter unten.

Der Kraftpfeil zeigt die Gelenkkraft auf das gestellteste Glied, wenn genau eines der beiden Glieder festgehalten wird — sonst die auf die zweite Seite. Welches Glied gemeint ist, steht im Wort am Pfeil. Es ist die Zwangskraft der Bindung und nicht die eingeprägte Last, die als Sinnbild fester Größe daneben stehen kann. An seinem freien Ende trägt er einen kurzen Strich quer zum Schaft: Er sagt, wo dieser Pfeil aufhört. Gebraucht wird die Auskunft, sobald Kraft und Geschwindigkeit desselben Gelenks auf einer Linie liegen — das tun sie in jeder Stellung, in der sie gegeneinander zeigen, und ohne den Querstrich sähe man dort einen einzigen Pfeil mit zwei Spitzen. Der Strich trennt ihn zugleich vom Sinnbild der eingepägten Last, das keinen trägt.

(Geschwindigkeitsmaßstab:  $m_v = 12,57 \text{ (mm/s) je mm Zeichnung}$ )

(Beschleunigungsmaßstab:  $m_a = m_v^2 = 157,9 \text{ (mm/s}^2\text{) je mm Zeichnung}$ )

(Kraftmaßstab:  $m_F = 0,2317 \text{ N je mm Zeichnung}$ )

Die dünnen Linien mit einer Zahl in runden Klammern sind die abgelesenen Maße: eine Maßlinie beziehungsweise ein Maßbogen mit je einer Begrenzung an beiden Enden, dazu die Maßhilfslinien zu den gemessenen Orten. Der Wert steht in Klammern, weil er abgelesen ist — er gibt nichts vor und beschränkt das Getriebe nicht. Die Tabelle weiter unten nennt dieselben Werte als Zahlen und daneben ihren kleinsten und größten Wert über den Umlauf.

Die Maßlinien mit einer Zahl OHNE Klammern sind festgehaltene Maße: Die Zahl ist der Sollwert, vorgegeben und nicht abgelesen. Sie stehen in einem eigenen Farbton. Ob ein Maß eingehalten ist, sagt die Tabelle weiter unten und nicht das Bild.

## Rechnung

|                                            |                       |
|--------------------------------------------|-----------------------|
| Schritte je Umlauf                         | 360                   |
| Gerechnete Lagen                           | 361                   |
| Bewegungsdauer eines Umlaufs               | 0,5 s                 |
| Mittlere Drehzahl des Antriebs             | 120 1/min             |
| Schwerkraft (positiv nach unten wirkend)   | 9,81 m/s <sup>2</sup> |
| Gezeigte Lage                              | 90                    |
| Überlagerte Stellungen in der Systemskizze | 0                     |

## Vektorpfeile

|                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| Geschwindigkeit $v_B$        | 340,634 mm/s                |
| Beschleunigung $a_B$         | 2.579,257 mm/s <sup>2</sup> |
| Gelenkkraft $F_A$ auf koppel | 1,079 N                     |

## Abgelesene Maße

| Maß             | gezeigte Lage | kleinster Wert | größter Wert |
|-----------------|---------------|----------------|--------------|
| Abstand M1 [mm] | (107,37)      | (60,00)        | (120,00)     |
| Winkel M2 [°]   | (90,0)        | (0,0)          | (359,0)      |

Die Werte stehen in runden Klammern, weil sie ABGELESEN und nicht vorgegeben sind — ein Hilfsmaß nach ISO 129-1:2018, 4.1.4. Sie beschränken nichts und werden nicht toleriert. Die zweite Spalte gilt für die oben genannte gezeigte Lage und trägt dieselbe Zahl wie das Maß im Bild. Die beiden letzten Spalten nennen den kleinsten und den größten Wert über alle gerechneten Lagen, denn ein Maß hängt an mitbewegten Orten und ändert sich über den Umlauf; sie sind so fein wie das Raster der Lagen und stammen nicht aus einer geschlossenen Rechnung. Ein Winkel wird vom ersten zum dritten Ort gegen den Uhrzeigersinn gemessen, mit dem zweiten als Scheitel, und läuft von 0° bis 360° — die umgekehrte Reihenfolge ergibt den Gegenwinkel, und beide sind richtig. Ein Strich statt einer Zahl heißt, dass die Stellung keine Antwort gibt: Beim Winkel fallen dort zwei Orte auf den Scheitel, und dann gibt es keinen Strahl.

ÜBER DIE 0°-MARKE: Ein abgelesener Winkel läuft von 0° bis 360°. Geht er über diese Marke hinweg, sind sein kleinster und sein größter Wert die Enden der Ableseskala und nicht die des Ausschlags — ein Winkel, der zwischen 350° und 10° pendelt, steht hier mit rund 0° und rund 360°; beide sind abgelesen, beide sind richtig, und zusammen sagen sie nichts über die Bewegung. Das trifft in dieser Rechnung zu auf: M2.

## Festgehaltene Maße

| Maß             | Sollwert | Istwert | Urteil      |
|-----------------|----------|---------|-------------|
| koppel A–B [mm] | 90,00    | 90,00   | eingehalten |

Ein festgehaltenes Maß ist eine Länge zwischen zwei Drehgelenken oder Gliedpunkten desselben Glieds, die beim Bearbeiten mit der Maus eingehalten wird: Ein gezogenes Ende läuft auf einem Kreis um das andere. Die Länge ist im mitbewegten System gemessen und gilt deshalb in jeder Stellung gleich. Eingehalten heißt, Istwert und Sollwert weichen um höchstens 0,001 mm voneinander ab. Ein verletztes Maß ist durch eine spätere Eingabe entstanden; gerechnet wird mit der Länge, die im Getriebe steht, und nicht mit dem Sollwert.

## Glieder

| Glied    | $x_o$ [mm] | $y_o$ [mm] | $\varphi_o$ [°] | Gliedlinie [°] | m [kg] | $s_S$ [mm]     | $J_S$ [kg·mm <sup>2</sup> ] |
|----------|------------|------------|-----------------|----------------|--------|----------------|-----------------------------|
| gestell  | 0          | 0          | 0               | 0              | —      | im Bezugspunkt | —                           |
| kurbel   | 0          | 0          | 0               | 0              | 0,2    | im Bezugspunkt | —                           |
| koppel   | 30         | 0          | 51,6            | —              | 0,2    | im Bezugspunkt | —                           |
| schwinge | 83         | 73         | -74,5           | -74,5          | 0,2    | im Bezugspunkt | —                           |

## Gelenke

| Gelenk | Art            | Glieder            | Anschluss 1 [mm] | Anschluss 2 [mm] | Zusatz              |
|--------|----------------|--------------------|------------------|------------------|---------------------|
| fest   | Gestellbindung | gestell            | 0   0            | —                | $\varphi = 0^\circ$ |
| A0     | Drehgelenk     | gestell – kurbel   | 0   0            | 0   0            | reibungsfrei        |
| A      | Drehgelenk     | kurbel – koppel    | 30   0           | 0   0            | reibungsfrei        |
| B      | Drehgelenk     | koppel – schwinge  | 90   0           | 0   0            | reibungsfrei        |
| B0     | Drehgelenk     | gestell – schwinge | 100   0          | 75   0           | reibungsfrei        |

## Antriebe

| Antrieb | Glied  | von $\varphi$ [°] | bis $\varphi$ [°] | Versatz Gliedlinie [°] | Abschnitte                     | Übergänge          |
|---------|--------|-------------------|-------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 1       | kurbel | 0                 | 360               | —                      | linear über den ganzen Bereich | stoß- und ruckfrei |

## Markierte Gliedpunkte

| Punkt  | Glied  | x [mm] | y [mm] | x mitbewegt [mm] | y mitbewegt [mm] |
|--------|--------|--------|--------|------------------|------------------|
| punkt1 | koppel | 34,473 | 53,898 | 45               | 30               |

## Struktur und Freiheitsgrad

|                                                                                 |   |
|---------------------------------------------------------------------------------|---|
| Glieder n (einschließlich Gestell)                                              | 4 |
| Gestellbindungen                                                                | 1 |
| Einfache Gelenke $g_1$ (Dreh- und Schubgelenke)                                 | 4 |
| Höhere Gelenke $g_2$ (Kurvengelenke, Zahnradpaare, Zahnstangen, Malteserkreuze) | 0 |
| Antriebe                                                                        | 1 |
| Freiheitsgrad $F = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot g_1 - g_2$ (Grübler)               | 1 |

## Nachweise

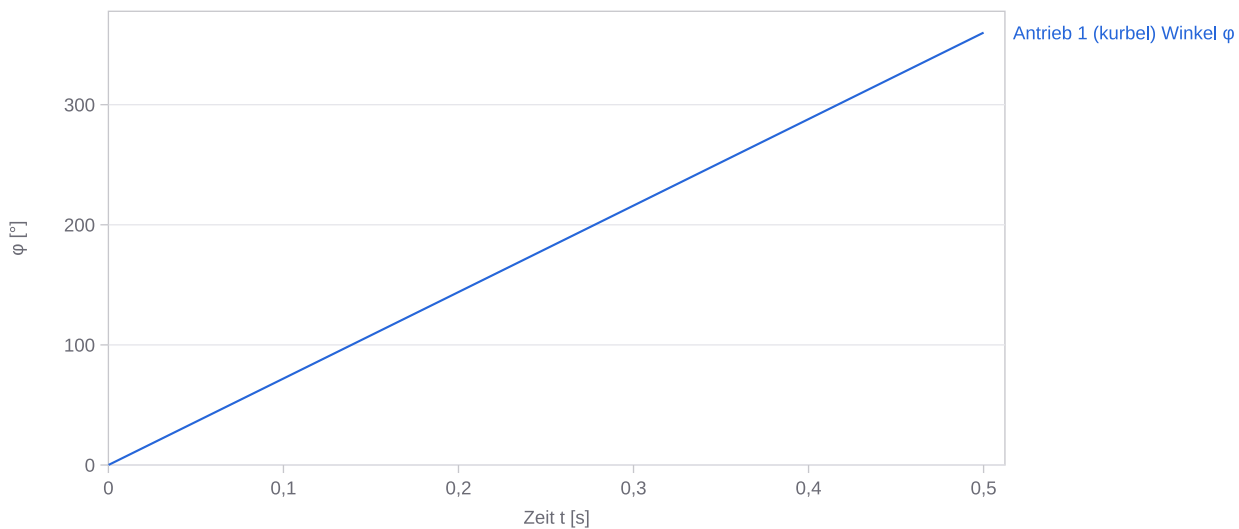
| Kriterium                                        | Wert | Grenze | Status       |
|--------------------------------------------------|------|--------|--------------|
| Freiheitsgrad F, gefordert 1 (Zahl der Antriebe) | 1    | 1      | ● in Ordnung |
| Antriebsbereich vollständig und lückenlos        |      |        | ● in Ordnung |
| Übergänge stoß- und ruckfrei                     |      |        | ● ruckfrei   |

## Kennwerte

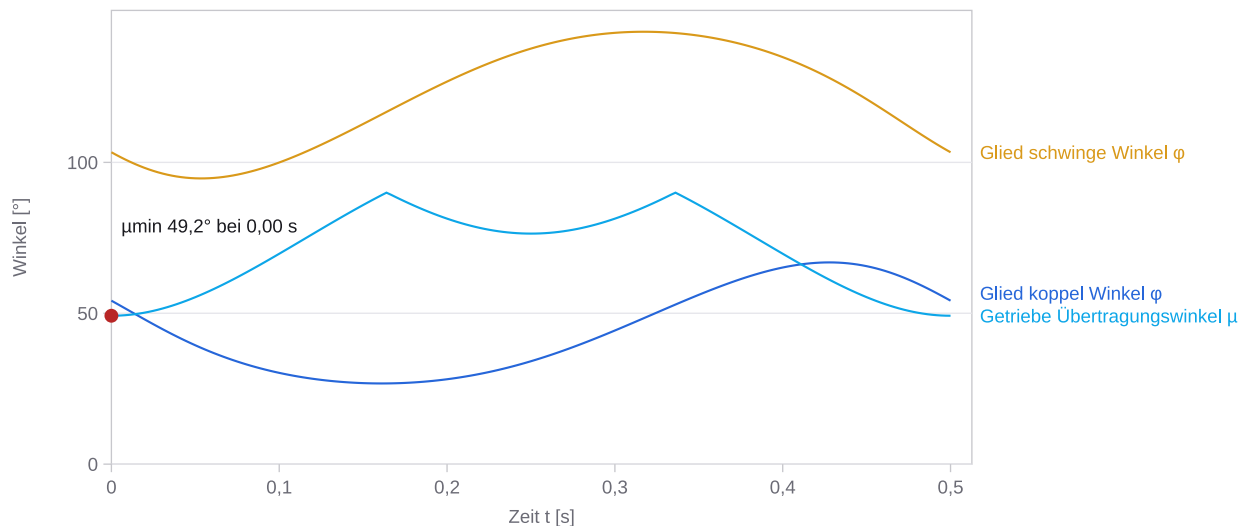
|                                                 |                              |
|-------------------------------------------------|------------------------------|
| Kleinsten Übertragungswinkel $\mu_{\min}$       | 49,2°                        |
| Größte Abweichung von der Sollbahn              | keine Sollbahn gezeichnet    |
| Größte Eindringtiefe in eine Sperrfläche        | keine Sperrfläche gezeichnet |
| Kleinsten Hemmfaktor $r_{\min}$ (Selbsthemmung) | kein $\mu_o$ eingetragen     |
| Größtes Antriebsmoment $M_{\max}$               | 0,1025 N·m                   |
| Größte Gelenkkraft $F_{\max}$                   | 7,316 N                      |
| Größte Antriebsleistung $P_{\max}$              | 1,288 W                      |
| Effektivmoment $M_{\text{eff}}$ am Antrieb      | 0,06354 N·m                  |

|                                                       |                          |
|-------------------------------------------------------|--------------------------|
| Größte reduzierte Trägheit $J_{red,max}$ am Antrieb   | 470,6 kg·mm <sup>2</sup> |
| Kleinste reduzierte Trägheit $J_{red,min}$ am Antrieb | 180 kg·mm <sup>2</sup>   |
| Größte Rüttelkraft $F_{R,max}$                        | 2,587 N                  |
| Bauart nach Grashof                                   | Kurbelschwinge           |
| Kürzestes Glied                                       | Kurbel                   |
| Grashof-Überschuss $(s + l) - (p + q)$                | -35,0 mm                 |
| Stellung von $\mu_{min}$ (Antriebswinkel)             | 0,0°                     |
| Umkehrlagen des Abtriebsglieds                        | 2                        |
| Schwingwinkel des Abtriebsglieds $\psi_0$             | 48,6°                    |
| Zeitverhältnis Hin- zu Rückgang                       | 1,115                    |
| Kleinste Gütekennzahl                                 | 0,672                    |

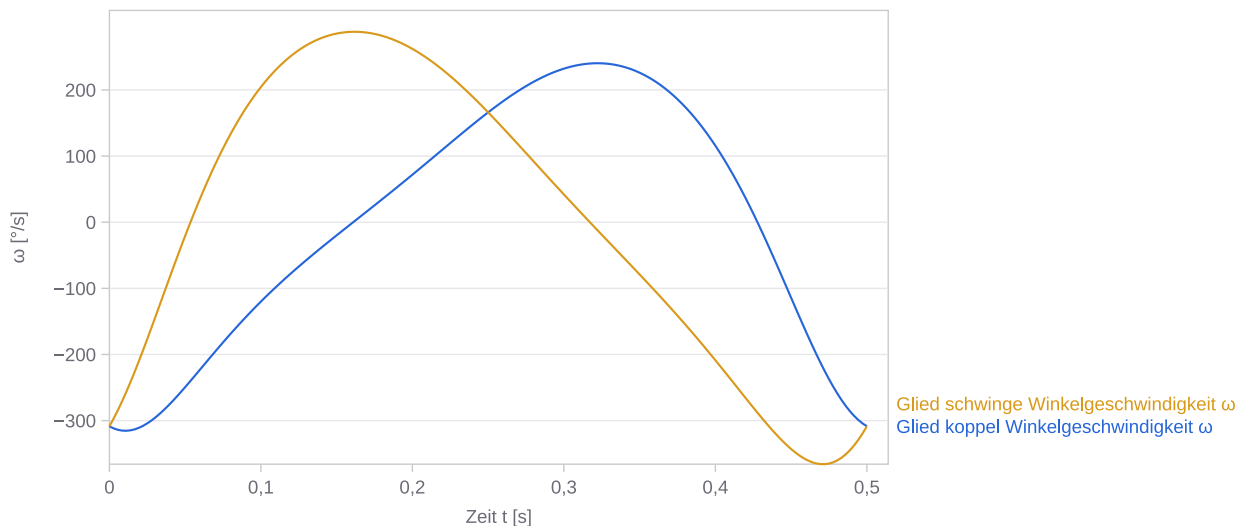
### Antriebswinkel über der Zeit [°]



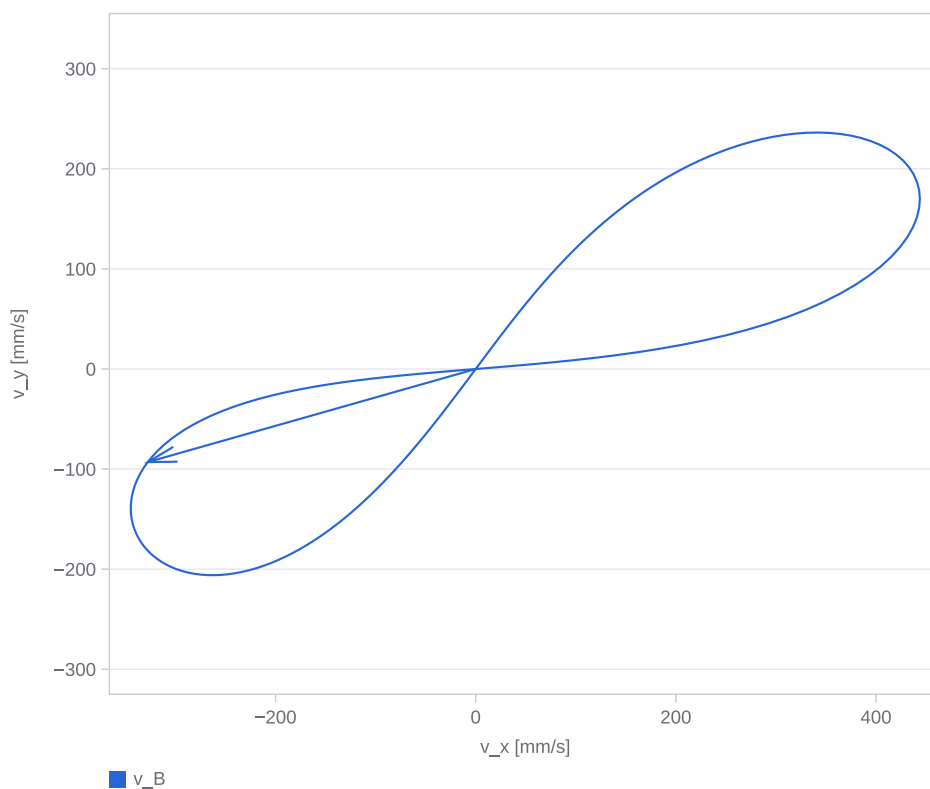
### Winkel über der Zeit [°]



## Winkelgeschwindigkeit über der Zeit [°/s]



## Geschwindigkeitshodograph



Der Hodograph trägt die Geschwindigkeitsvektoren der Teile mit eingeschaltetem Geschwindigkeitspfeil von einem gemeinsamen Ursprung aus an. Jede Kurve ist der Weg der Spitze eines Vektors über den Umlauf, der Pfeil ist der Vektor in der gezeigten Lage und trägt dieselbe Zahl wie der Pfeil in der Systemskizze. Beide Achsen haben denselben Maßstab; an einer Lücke im Umlauf reißt die Kurve ab.

## Berechnungsgrundlage und Modellvorbehalte

Gerechnet wird die geschlossene Bindungsgleichung des ebenen Koppelgetriebes: Zu jedem Fortschritt  $\tau$  auf der gemeinsamen Zeitleiste wird die Lage aller Glieder mit dem Newton-Verfahren gelöst, danach werden Geschwindigkeit und Beschleunigung aus derselben Jacobi-Matrix gewonnen. Antriebsmoment und Gelenkkräfte folgen aus dem Prinzip von d'Alembert (Kinetostatik) mit den angegebenen Massen und Trägheiten. Die Bewegungsgesetze der Abschnitte sind die normierten Zeitgesetze nach VDI 2143.

**WO DIE MASSE ANGREIFT:** Die Masse eines Glieds wirkt in seinem Schwerpunkt  $s_S$ , den die Gliedertabelle unten je Glied ausweist. Wird am Bildschirm eine Masse eingetragen und sind die Schwerpunktfelder leer, belegt der Rechner sie sichtbar vor — mit der Mitte zwischen den beiden Drehgelenken des Glieds, bei mehr als zweien mit deren Mittel; ein Schubgelenk zählt nicht mit, weil sein Anschlussort längs der Führung beliebig ist. Der Vorschlag lässt sich überschreiben, ein bereits gesetzter Schwerpunkt bleibt unberührt, und ein geladener Stand wird nicht angetastet. Steht in der Tabelle „im Bezugspunkt“, ist keiner angegeben, und er fällt mit dem Bauort des Glieds zusammen — bei allem, was dieser Rechner erzeugt, mit einem Gelenk. Die eingetragene Masse ist dann keine über das Glied verteilte Masse, sondern eine Punktmasse in diesem Gelenk. Die Folge ist nachgemessen: Am Viergelenk wirken sich 10 kg an der Kurbel so auf das Antriebsmoment gar nicht aus, an der Koppel allein über ihr Gewicht. Das Trägheitsmoment  $J_S$  gilt um den Schwerpunkt; den Steiner-Anteil  $m \cdot s_{_S}^2$  legt die Rechnung selbst dazu.

**WENN MASSEN AM ANTRIEB NICHTS BEWIRKEN:** Ein Glied, das mit gleichbleibender Drehzahl um eine feste Achse umläuft, braucht kein Antriebsmoment — gleich wo sein Schwerpunkt sitzt und wie groß seine Trägheit ist: Seine Fliehkraft zeigt durch die Achse und hat dort keinen Hebel, und beschleunigt wird es nicht. Der vorbelegte Schwerpunkt ändert daran nichts, er verschiebt nur den Ort der Fliehkraft. Wirksam wird die Masse durch die Schwerkraft, durch ein Bewegungsgesetz am Antrieb oder an einem Glied, das ungleichförmig läuft. Wo nichts davon zutrifft, bleiben vom Antriebsmoment und von der Antriebsleistung nur die letzten Bits der Rechnung übrig. Beide werden deshalb gegen die Last verglichen, die dieses Modell überhaupt tragen kann, und weggelassen, sobald sie neun Zehnerpotenzen darunter liegen; in der Zeile steht dann der Grund und KEIN Grenzwert — eine Zahl dieser Größenordnung unterschreite jede Grenze und bestünde damit eine Prüfung, die nie stattgefunden hat. Die Gelenkkraft ist davon nicht betroffen und wird weiter ausgewiesen: Die Fliehkraft der Kurbel ist eine echte Lagerkraft, ihr fehlt allein der Hebel um die Antriebsachse.

**REDUZIERTER TRÄGHEIT UND EFFEKTIVMOMENT,** bei genau einem Drehantrieb: Die Einflusszahlen  $dq/d\varphi$  folgen aus derselben Jacobi-Matrix wie die Geschwindigkeiten, mit der Einheitsrate am Antrieb. Damit ist  $J_{red}$  die Summe über die Glieder von  $m \cdot |dr_S/d\varphi|^2 + J_S \cdot (d\varphi_i/d\varphi)^2$ , auch in einer Rast, in der das Getriebe steht. Nach dem Prinzip der virtuellen Arbeit teilt sich das Antriebsmoment in den Trägheitsanteil  $M_T$ , die Summe von  $m \cdot a_{_S} \cdot dr_S/d\varphi + J_S \cdot \alpha_i \cdot d\varphi_i/d\varphi$ , gleich  $J_{red} \cdot \alpha + \frac{1}{2} \cdot (dJ_{red}/d\varphi) \cdot \omega^2$ , und den Lastanteil  $M_L$  aus Gewicht, Kraftelementen und Lasten. Das Effektivmoment  $M_{eff} = \sqrt{(1/T) \cdot \int M^2 dt}$  über die Bewegungsdauer  $T$  steht nur bei lückenlosem Umlauf; integriert wird nach der Trapezregel über die gerechneten Stellungen. Sitzt der Motor an einem anderen Glied als dem angetriebenen, gelten Moment und Trägheit an diesem Glied:  $M_{Glieder} = M / (d\varphi_{Glieder}/d\varphi)$ .

**DIE RÜTTELKRAFT** ist die Kraft, die das Getriebe aus seinen Massenkräften auf das Gestell gibt,  $F_R = -\text{Summe von } m \cdot a_{_S}$  über die bewegten Glieder (VDI 2149 Blatt 1, Abschnitt 3). Gewicht und äußere Lasten gehören nicht dazu: Das eine ist statisch, die anderen kommen von außen.

**WIE DIE KENNWERTE GEWONNEN WERDEN:** Der Übertragungswinkel  $\mu$  ist an zwei Bauformen erklärt — an der Viergelenkkette als Winkel zwischen Koppel und Schwinge im Gelenk B, an der Schubkurbel zwischen Koppel und der Senkrechten auf die Führungsgerade (Kerle/Pittschellis/Corves, Einführung in die Getriebelehre, 3. Aufl. 2007, S. 161, Gl. 6.5 und 6.6). Gemeldet wird der spitze Wert und als  $\mu_{min}$  der kleinste über alle gerechneten Lagen; die geschlossene Form der Quelle gilt für den vollen Umlauf und wird deshalb nicht eingesetzt, sondern nur zur Gegenrechnung benutzt. Bei jeder anderen Kette steht in der Zeile, dass die Größe dort nicht erklärt ist. Am Kurvgelenk steht sie als Druckwinkel  $\alpha = 90^\circ - \mu$  in einer eigenen Zeile. Sitzt ein Zylinder an der Kette, gilt sie ohne ihn, und eine eigene Zeile weist den Übertragungswinkel am Zylinder aus:  $\mu = 90^\circ - \alpha$  zwischen der Zylinderachse und der Bewegung seines Kopfpunkts relativ zum Boden. Als Richtwert nennt dieselbe Quelle  $40^\circ \leq \mu \leq 50^\circ$  für langsam laufende Getriebe (S. 160, Gl. 6.4); das ist ein Erfahrungswert und keine Norm — VDI 2130 behandelt den Übertragungswinkel in einem eigenen Abschnitt und nennt keine Zahl. Deshalb trägt die Zeile die Wortreihe eines Richtwerts und nicht die eines bestandenen Nachweises: Bei  $39^\circ$  bricht nichts, aber Lagerkräfte, Reibung und Empfindlichkeit gegen Spiel wachsen rasch. Als Abtriebsglied gilt das nicht angetriebene Glied, das über ein Drehgelenk am Gestell hängt; seine Umkehrlagen sind die Nulldurchgänge seiner Winkelgeschwindigkeit, zwischen zwei Rasterpunkten linear eingeschoben. Steht es in einer Rast still und läuft danach zurück, ist die Rast eine Umkehr; über einen geschlossenen Umlauf zählt auch eine Rast über den Umlaufanfang. Liegt eine Umkehr in einer Rast, fehlt das Zeitverhältnis, denn wohin die Rastzeit gehört, wäre eine Verabredung. Kehrt es genau zweimal um, folgen daraus der Schwingwinkel  $\psi_0$  als sein voller Ausschlag und das Zeitverhältnis als der längere der beiden Abschnitte geteilt durch den kürzeren, also stets  $\geq 1$ . Bezugsgröße des Zeitverhältnisses ist die ZEIT und nicht der Kurbelwinkel: Läuft der Antrieb gleichförmig, ist beides dasselbe; trägt ein Abschnitt ein Bewegungsgesetz, fallen sie auseinander, und maßgebend ist die Zeit. Ausgewiesen wird es nur bei einem Antrieb, der wenigstens einmal ganz herumkommt — sonst gibt es keinen Rückgang, gegen den sich messen ließe. Gleitet das Abtriebsglied stattdessen in einer Führung am Gestell — der Kolben der Schubkurbel, der Stößel des Kurvengetriebes —, zählt seine Geschwindigkeit längs der Führung, und an die Stelle des Schwingwinkels tritt der Hub  $s_0 = s_{max} - s_{min}$  in Millimetern, ebenso fein wie das Raster. Das gilt auch, wenn das Glied am Gestell über einen geschlossenen Umlauf ohne Umkehrlage umläuft und dahinter ein Stößel gleitet, wie beim Whitworth-Schnellrücklauf. Findet sich gar kein eindeutiges Abtriebsglied, fehlen

die Zeilen: Das trifft jedes Getriebe mit mehr als einem Antrieb, etwa das Fünfgelenk — welches seiner Glieder der Abtrieb wäre, sagt die Struktur nicht. Der Schwingwinkel wird über die gerechneten Lagen gemessen und ist damit so fein wie das Raster; bei 360 Schritten liegt er rund  $0,002^\circ$  unter dem geschlossen gerechneten Wert. Die Antriebsleistung ist in jeder Stellung die Summe über die Antriebe aus Moment und Winkelgeschwindigkeit,  $P_{\max}$  ihr größter Betrag über den Umlauf — nicht  $M_{\max}$  mal  $\omega_{\max}$ , denn beide Höchstwerte fallen bei einem Bewegungsgesetz nicht zusammen.

BAUART NACH GRASHOF: Ob ein Glied der viergliedrigen Drehgelenkkette voll umläuft, entscheiden allein die vier Gliedlängen. Mit  $s$  als kürzestem,  $l$  als längstem und  $p, q$  als den beiden übrigen lautet die Bedingung  $s + l < p + q$ ; der ausgewiesene Grashof-Überschuss ist die Differenz  $(s + l) - (p + q)$  und damit negativ, wo die Bedingung erfüllt ist. Ist sie erfüllt, folgt die Bauart aus der Lage des kürzesten Glieds: am Gestell die Kurbelschwinge, als Gestell selbst die Doppelkurbel, als Koppel die Doppelschwinge. Bei Gleichheit ist das Getriebe durchschlagend und damit laufunsicher — es kommt durch die Strecklage, aber welchen Zweig es danach nimmt, ist nicht bestimmt. Ist die Bedingung verletzt, schwingen alle vier Gelenke (Totalschwinge). Ein Schubgelenk oder ein fünftes Glied macht daraus eine andere Kette, für die es keine Grashof-Bauart gibt; die Zeile sagt dann genau das. Die Bauart ist eine Aussage über das Laufverhalten und keine Note — bewertet wird sie nicht.

WORAUF SICH DER ANTRIEBSWINKEL BEZIEHT: Die Spalten „von  $\varphi$ “ und „bis  $\varphi$ “ der Antriebstabelle nennen den Absolutwinkel  $\varphi$  des angetriebenen Glieds gegen die Waagerechte, gemessen um seinen Bezugspunkt und im Gegenuhrzeigersinn. Es ist dieselbe GRÖSSE, die die Gliedertabelle als  $\varphi_0$  führt, aber nicht notwendig dieselbe ZAHL: Die Gliedertabelle nennt den ABGELEGTE Entwurf, also die Stellung, in der das Getriebe gebaut wurde, und für den Löser ist sie nur der Startwert. Bei  $\tau = 0$  prägt er dem angetriebenen Glied „von  $\varphi$ “ auf und löst die Kette von dort aus; wo  $\varphi_0$  und „von  $\varphi$ “ auseinanderfallen, steht die gezeichnete Ausgangslage also um diesen Unterschied neben den Zahlen der Gliedertabelle, und maßgebend für alles Gerechnete ist „von  $\varphi$ “. Bei einem aus vorgegebenen Lagen gerechneten Getriebe ist dieser Unterschied der Regelfall und keine Ungenauigkeit: Der Entwurf ist in der vorgegebenen Lage abgelegt, an der der Antriebsbereich anfängt — dem Regelfall nach der ersten —, und der Bereich beginnt ein Prozent der Lagenspanne VOR ihr, höchstens aber ein Prozent des Abstands zur Grenzlage, jenseits derer die Kette nicht mehr schließt. Damit liegt die vorgegebene Lage sicher im Antriebsbereich und nicht auf seiner Kante, wo allein die Rundung darüber entschiede, ob sie noch dazugehört; die Probetabelle weist sie als Fortschritt  $\tau$  knapp über null aus. Der Antriebswinkel ist ausdrücklich NICHT die Richtung der gezeichneten Gliedlinie zwischen zwei Gelenken: Dazwischen liegt fest der Winkel, den der Kopfpunkt im mitbewegten System des Glieds selbst hat. Die Spalte „Versatz Gliedlinie“ nennt ihn je Gliedlinie, sobald er nicht null ist, und ein Strich steht dort, wo es nichts zu nennen gibt. Ein Versatz von  $180^\circ$  etwa heißt: Die Gliedlinie zeigt der Zeichnung nach genau entgegengesetzt zum Antriebswinkel, obwohl beide dasselbe Glied beschreiben.

Die Gütekennzahl sagt, wie weit das Getriebe von einer Totlage entfernt bleibt, und nicht, wie tragfähig es ist. Sie ist über den Umlauf der kleinste Wert des geometrischen Mittels der Singulärwerte der enddimensionierten Jacobi-Matrix — in der Robotik als Manipulierbarkeit nach Yoshikawa gebräuchlich. Sie ist 0 in der Totlage und wächst gegen 1, je senkrechter die Spalten aufeinander stehen. Läuft sie gegen null, durchfährt das Getriebe eine Totlage — dort sind Gelenkkräfte und Winkelbeschleunigungen unzuverlässig. Jede Lage wird davor bis zum Schließen der Kette iteriert: bis die größte verbliebene Klaffung der Bindungsgleichungen unter  $10^{-10}$  liegt, höchstens 40 Newton-Schritte weit. Eine Lage, die das nicht erreicht, geht nicht in dieses Dokument ein, sondern wird als Lücke im Antriebsbereich ausgewiesen — die Zeile „Antriebsbereich vollständig und lückenlos“ sagt es.

Modellvorbehalte: Alle Glieder sind starr, alle Gelenke spielfrei. Gerechnet wird ohne Spiel und ohne Elastizität; die Lagen folgen der Theorie 1. Ordnung. Reibung wird nur an den Gelenken gerechnet, an denen die Gelenketabelle eine Reibungszahl ausweist. Geprüft wird ausschließlich gegen gezeichnete Sperrflächen, und auch das nur, wenn welche vorgegeben sind; die Glieder untereinander werden NICHT geprüft. Zwei Glieder können sich also rechnerisch durchdringen, ohne dass hier etwas gemeldet wird.

Der Entwurf wurde auf einem Hintergrundbild aufgebaut (grundriss.png, Bildbreite 180 mm, linke obere Ecke bei  $-40 \mid 130$  mm). Das Bild ist eine Konstruktionshilfe; es geht in keine Rechnung ein und ist nicht Teil dieses Nachweises. Es wird hier auch nicht gezeigt: Sein Maßstab ist von Hand eingestellt und seine Herkunft unbekannt — ein ungeprüftes Bild in einem Nachweis sähe aus wie ein Beleg und wäre keiner. Die Bilddatei selbst verlässt den Rechner des Anwenders nicht.

Das ausgewiesene Antriebsmoment und die größte Gelenkkraft sind EINGANGSGRÖSSEN für einen Festigkeitsnachweis, kein Ersatz dafür. Für eine Welle unter diesem Moment ist der Nachweis nach DIN 743 zu führen, für ein Gelenklager der Nachweis der Tragzahl, für einen Bolzen der Flächenpressungs- und Scherungsnachweis.

## Zu diesem Muster

Alle Werte auf diesen Seiten stammen aus einer frei gewählten Beispielrechnung und gehören zu keinem realen Bauteil. Der gekaufte Export enthält dieselben Abschnitte mit Ihren Eingaben, Ihren Kopfdaten (Projekt, Bauteil, Bearbeiter) und als durchsuchbaren Text. Preise und Umfang: [maschinenbaurechner.de/preise](https://maschinenbaurechner.de/preise)

Hinweis: Die Ergebnisse sind Auslegungs- und Orientierungshilfen. Sie ersetzen nicht die eigenverantwortliche Prüfung, Berechnung und Freigabe durch eine fachlich qualifizierte Person. Es gelten die Nutzungsbedingungen auf [maschinenbaurechner.de](https://maschinenbaurechner.de).