

Alternativen zum Unrundzahnrad

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

Unrundzahnrad – Schrittgetriebe – ungleichmäßige Übersetzung

Zusammenfassung

Unrundzahnräder sind eine elegantes Mittel, um ungleichmäßige Übersetzungen zwischen parallelen Wellen zu erzielen. Solche Getriebe bauen klein und haben denkbar wenige Teile. Nachdem moderne Verzahnungsmaschinen erstmals die Verzahnung grundsätzlich beliebig geformter Kurven in hoher Qualität ermöglichten, rückten Unrundzahnräder verstärkt in den Blickpunkt des Interesses.

Ungleichmäßige Übersetzungen zwischen zwei Wellen können aber auch mit speziellen ebenen Kurvengetrieben verwirklicht werden, z.B. den ebenen Rollensterngetrieben. Kurven sind erheblich leichter zu beschaffen als Unrundzahnräder, da viele Unternehmen über die notwendigen Maschinen und die erforderliche Fertigungserfahrung verfügen, und sie unterliegen geringeren Beschränkungen hinsichtlich der umsetzbaren Bewegungsabläufe.

Da diese speziellen Kurvengetriebe meist als Standard-Schrittgetriebe zugekauft werden, ist vielerorts schlichtweg nicht bekannt, daß sie sich auch für vielfältige andere Bewegungsaufgaben verwenden lassen.

1. Einleitung

In den vergangenen Jahren sind Unrundzahnräder als Maschinenelement zum Erzielen ungleichmäßiger Übersetzungen zwischen parallelen An- und Abtriebswellen besonders hervorgehoben worden /1,2/, nachdem es nun moderne CNC-gesteuerte Wälzstoßmaschinen gibt, mit denen diese Unrundräder in hoher Qualität und grundsätzlich beliebiger Form hergestellt werden können.

Unrund-Zahnradpaarungen sind elegant, weil

- die geringstmögliche Anzahl von Teilen benötigt wird
- Antriebs- und Abtriebswelle beide beidseitig gelagert werden können

Unrundzahnräder werfen aus praktischer Sicht jedoch auch verschiedene spezifische Probleme auf:

- Der Achsabstand zwischen den beiden Wellen ist oft als kinematische Abmessung fest vorgegeben. Die sich für einen bestimmten Übersetzungsverlauf ergebenden Räderformen führen oft zu einem Verzahnungs-Modul, der nicht der DIN 780 entspricht, so daß die gewünschte Verzahnung nicht mit Standardwerkzeugen hergestellt werden kann. Profilverschiebungen zur Anpassung des Moduls an einen Standardwert sind nur in engen Grenzen erlaubt und helfen deshalb meist nicht weiter.
- Der Verlauf des Übersetzungsverhältnisses zwischen Antriebs- und Abtriebsrad unterliegt relativ starken Beschränkungen. Gerade Stillstände (Rasten) am Abtrieb, die in der Praxis oft benötigt werden, können nicht realisiert werden. Auch sehr geringe Abtriebs-Winkelgeschwindigkeiten oder gar Rückwärtsbewegungen können nicht verwirklicht werden.
- Unrundzahnräder sind schwer zu beschaffen, da es nur wenige Maschinen zur Herstellung dieser Teile gibt. Maschinenbauunternehmen machen sich dementsprechend von wenigen Lieferanten abhängig und können nicht umdisponieren, wenn Teile schnell benötigt werden.

Gesucht sind nun Getriebe, die die gleiche kinematische Funktion erfüllen wie die Unrund-Räderpaarungen, dabei aber ihre Nachteile vermeiden.

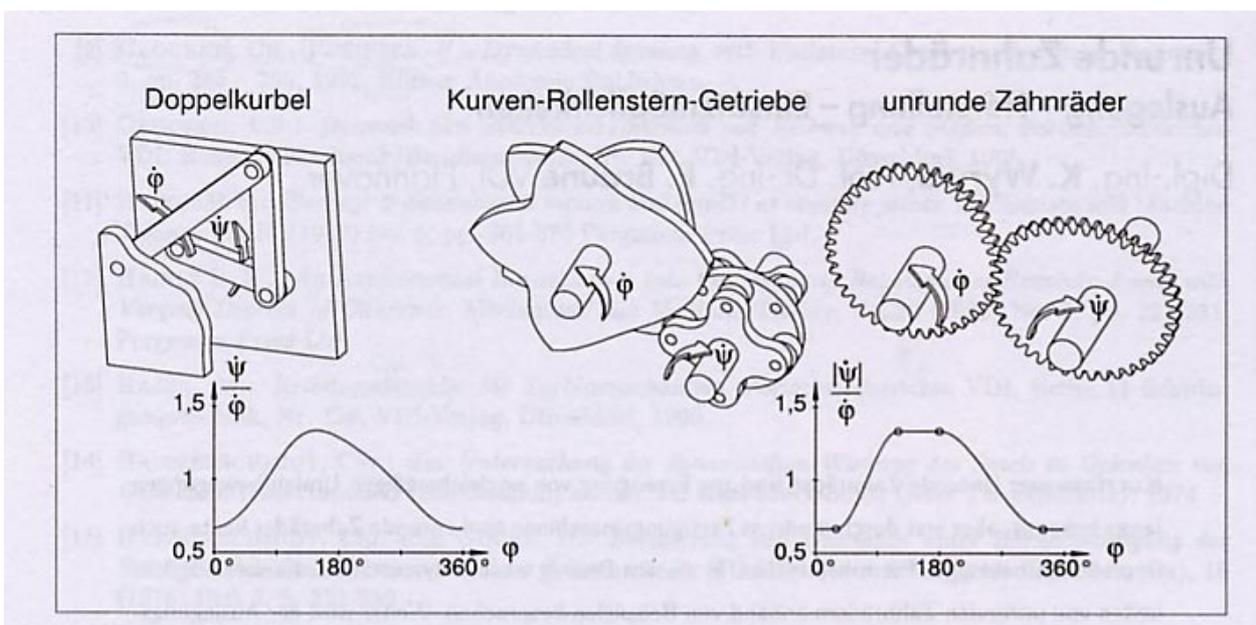


Bild 1: Mechanismen für ungleichmäßige Übersetzungen zwischen zwei Wellen /1/

2. Die Doppelkurbel

Doppelkurbelmechanismen als klassische Übersetzungsgetriebe mit beidseitig umlaufenden Wellen scheiden als Alternative zu den Unrundrädern praktisch aus, weil sie

- keine durchschnittlichen Übersetzungsverhältnisse ungleich 1 erlauben,
- nur äußerst begrenzte Möglichkeiten zur Variation des Übersetzungsverlaufs bieten, da bei gegebenem Gestell-Achsabstand mit Antriebskurbellänge, Koppellänge und Abtriebskurbellänge nur drei skalare Größen dafür zur Verfügung stehen,
- vorschreiben, daß beide Wellen fliegend gelagert werden müssen

Die wichtigste Eigenschaft des Unrundrädernpaars ist, daß man vom Grundsatz her jeden Übersetzungsverlauf mit ganzzahligem Durchschnitts-Übersetzungsverhältnis umsetzen kann.

Alternativen zum Unrundzahnrad müssen deshalb in irgendeiner Weise über eine Kurve verfügen.

3. Servoantriebe

Da in vielen Maschinen (z.B. im Verpackungsmaschinen-Sektor) ohnehin in größerem Umfang Servoantriebe verwendet werden, kann auch die ungleichmäßige Übersetzung zwischen zwei parallelen Wellen über eine elektronische Kurve erzeugt werden.

Auf der „Antriebswelle“ mißt ein Geber den Antriebsdrehwinkel, zwischen Antrieb und Abtrieb interpoliert die Servosteuerung, und eine Motor-Getriebe-Kombination erzeugt direkt die gewünschte Drehbewegung der „Abtriebswelle“.

Vorteil dieser Lösung ist, daß der Verlauf des Übersetzungsverhältnisses schnell auf andere Produktformate hin angepaßt werden kann, bei entsprechender Programmierung der Steuerung sogar bei laufendem Betrieb.

Servoantriebe haben allerdings auch Nachteile:

- Die erreichbaren Taktzahlen sind durch die Rechenzeiten der Lageregler begrenzt.

- Die am Abtrieb aufbietbaren Momente sind relativ gering.
- Servoantriebe sind teuer.

Ihr Einsatz kommt in Betracht, wenn die gesamte Maschine auf Servotechnik ausgerichtet ist oder wenn die schnelle Anpassung des Übersetzungs-Verlaufes zwingend notwendig ist.

4. Ebene Rollensterngetriebe

Die hier als „Ebene Rollensterngetriebe“ (siehe Bild 1, Mitte) bezeichneten Kurvengetriebe sind auch unter den Bezeichnungen „Parallelkurvengetriebe“, „Kurven-Rollenstern-Getriebe“ oder „CF3-Getriebe“ bekannt. Sie werden häufig als Schrittgetriebe zum Antrieb getakteter Transportketten verwendet.

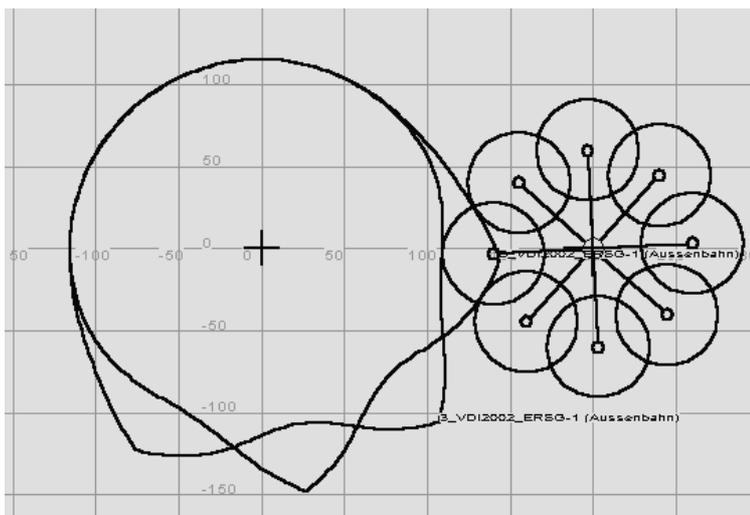


Bild 2: Ebenes Rollensterngetriebe, 8 Rollen, Schrittwinkel 180 Grad

Diese Getriebe bestehen aus zwei synchron laufenden Kurvenscheiben und einem Rollenstern als Abtriebsglied. In jede der beiden Kurven greift jeweils die Hälfte der Kurvenrollen ein, d.h. die Kurvenrollen sind je zur Hälfte auf zwei verschiedene Ebenen aufgeteilt. In beiden Ebenen teilen die darin enthaltenen Kurvenrollen die 360 Grad gleichmäßig, und beide Rollenebenen sind gegeneinander um eine halbe dieser Rollenteilungen verdreht. Alle Rollen zusammen teilen deshalb die 360 Grad ebenfalls gleichmäßig.

Wenn die Kurvenwelle einmal umläuft, muß die Abtriebswelle (der Rollenstern) in entgegengesetzter Drehrichtung um ein ganzzahliges Vielfaches der Teilung einer Rollensternebene drehen, so daß das Bild des Rollensterns nach einem Kurvenumlauf genauso aussieht wie vor dem Kurvenumlauf.

Verschiedene namhafte Schrittgetriebehersteller bieten diese Getriebe über Kataloge mit vorgegebenen Auslegungsvarianten an. Ingenieure wählen aus diesen Katalogen typischerweise eine Baugröße, ein Bewegungsgesetz mit oder ohne Geradeneinschub, einen Schrittwinkel und einen Schaltwinkel aus und lassen sich die fertigen Getriebe einbaufertig mit Getriebekasten liefern.

Die wenigsten Maschinenbauunternehmen berechnen und fertigen diese Getriebe selbst, da spezielle Berechnungsprogramme erforderlich sind, um die für eine hohe Laufruhe nötigen Feinheiten in die Kurvenbahnen einzubringen, und da für die Herstellung der Kurvengetriebe spezielle kurven- und fertigungstechnische Erfahrung nötig ist.

Aus Sicht vieler Anwender beschränkt sich die Auslegung dieser Getriebe also in der Auswahl der für den getakteten Vorschub am besten geeigneten Variante im Katalog.

Deshalb ist es nicht so bekannt, daß mit dem gleichen Kurvengetriebetyp auch Bewegungsabläufe für besondere Anwendungen mit umlaufender, aber nicht einfach schaltender Abtriebswelle erzeugt werden können, z.B.

- für einen Leistungs- bzw. Momentenausgleich
- zum Herstellen einer Eigenbewegung
- zum geeigneten Verzerren eines Bewegungsablaufs am Abtrieb eines Koppelgetriebes
- bei feststehender Kurve zum Erzeugen technologisch geforderter Drehbewegungen an Abtriebsgliedern, die im umlaufenden Trägerkarussell gelagert sind

Ebene Rollensterngetriebe haben gegenüber den Unrundzahnradern wichtige Vorteile:

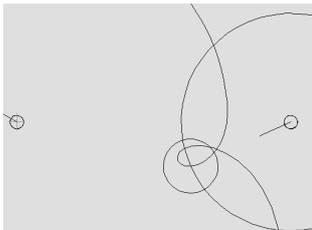
- a) Sowohl die Kurvenscheiben als auch die Rollensterne können mit gängigen CNC-Fräsmaschinen hergestellt werden, wie sie in vielen Fertigungsbetrieben oder – abteilungen verfügbar sind.
- b) Am Abtrieb können auch längere Rasten oder – je nach Einsatzfall begrenzt auf allerhöchstens ca. 70 Grad Schrittwinkel – Rücklaufbewegungen erzeugt werden.
- c) Der Achsabstand zwischen Antriebs- und Abtriebswelle ist frei wählbar.

- d) Über die Anzahl der Rollen, den Rollensternradius, den Rollendurchmesser und die Ausgangslage des Rollensterns können kinematische Abmessungen im Übertragungsmechanismus so variiert werden, daß die Kurven unterschnittfrei werden und möglichst günstige Übertragungswinkel haben.

Wie bei den Unrund-Räderpaaren können auch hier beide Wellen beidseitig gelagert werden.

Ganz unproblematisch sind die ebenen Rollensterngetriebe jedoch nicht:

- a) Die Kurvenscheiben müssen sehr genau gefertigt und zueinander montiert sein, wie auch bei normalen Doppelkurvengetrieben. Auch der Teilkreisradius auf dem Rollenstern und der Achsabstand zwischen Rollenstern Drehpunkt und Kurvendrehpunkt müssen sehr genau eingehalten werden, damit das Getriebe ruhig läuft. Die Spitzen der Kurvenbahnen werden in der Regel weggenommen, damit sie nicht mit der Rollensternachse kollidieren, und damit sie nach dem Härten der Kurvenlaufbahn nicht wegbrechen.
- b) Da Rollen in die Kurvenbahnen einlaufen, während der Rollenstern durch zwei andere Rollen fixiert ist, und da immer Fertigungsabweichungen vorhanden sind, ist es unerlässlich, die übertragungsungünstigsten Rollen durch Profilrücknahmen aus dem Eingriff herauszunehmen. Werden keine Profilrücknahmen angebracht, „knackt“ das Getriebe, und es treten Stöße beim Einlauf der Rollen in die Kurven auf, verbunden mit großer Geräuschentwicklung. Wieviel Profilrücknahme an welchen Stellen der Kurve zweckmäßig ist, ist auch Erfahrungssache und von den erreichbaren Genauigkeiten in der Fertigung abhängig.
- c) Wie bei jedem Kurvengetriebe können – je nach gefordertem Bewegungsablauf – Übertragungswinkel und Krümmungsradius ungünstig werden. Enthält die Abtriebsbewegung eine Rast, und besitzt der Rollenstern mehr als 4 Rollen, so unterschreiten die Übertragungswinkel deutlich die sonst in der Kurventechnik üblichen Empfehlungen. Es ist auch Unterschnitt möglich.
- d) Eine spezielle Form des Unterschnitts tritt auf, wenn die Winkelgeschwindigkeit des Rollensterns bzw. die Relativgeschwindigkeit der Rollen beim Durchlauf durch die Kurve zu groß wird. Die Rollenmitte „überholt“ das Kurvenbauteil, und die Rollenmittelpunktsbahn eines Kurvenastes beschreibt eine Schlaufe (Bild 3):



Wie bei jeder Kurvenauslegung lassen sich diese Problempunkte durch geeignete Dimensionierung der kinematischen Abmessungen beseitigen. Übrig bleibt das allfällige Problem, daß die Kurvenrollen und die Kurvenflanken die auftretenden Belastungen nicht aushalten könnten.

5. Standardkurve mit runden Zahnrädern

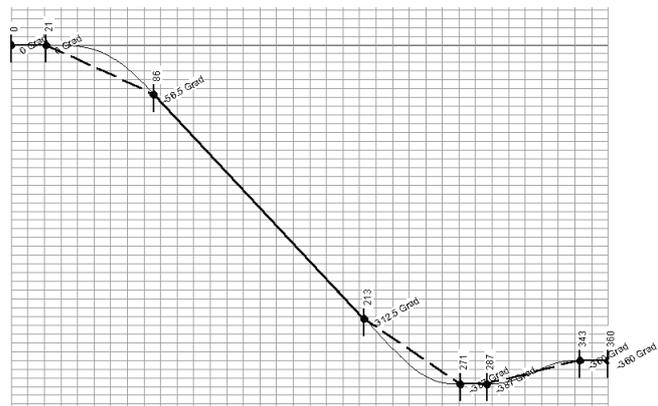
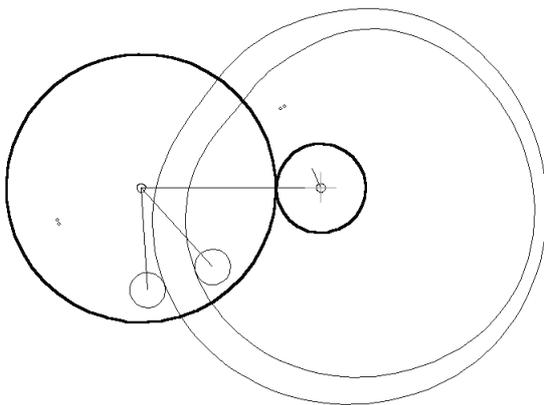


Bild 4: Stegkurve mit umlaufendem Hebel, Zahnsegment und Abtriebsritzel Bild 5: Bewegungsdiagramm

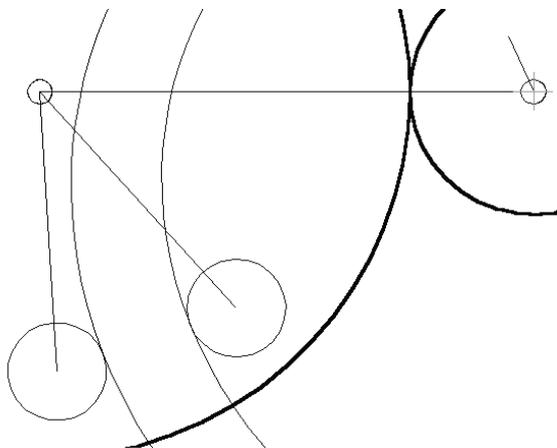


Bild 4a: Ausschnittvergrößerung

Einen anderen kurvengesteuerten Mechanismus für beliebige ungleichmäßige Abtriebsdrehungen zeigt Bild 4/4a.

Ein Hebel, dessen Drehpunkt gleichmäßig umläuft, greift in eine feststehende Kurvenscheibe ein, die als offene Kurve oder Nut- oder Stegkurve ausgeführt sein kann. Ein Zahnsegment auf dem Hebel treibt das Abtriebsrad an, das konzentrisch zur Antriebswelle gelagert ist.

Dieses Getriebe ist zur Erzeugung von Abtriebs-Bewegungen geeignet, die nicht allzu weit von der gleichmäßigen Drehung abweichen. Bild 5 zeigt ein Bewegungsdiagramm, das schon relativ weit von der gleichmäßigen Abtriebsdrehung entfernt ist.

Der Kurvenhub dient dazu, den gewünschten Verlauf der Verzerrung von der gleichmäßigen Abtriebsdrehung zu erzielen.

Wenn die Abtriebsdrehung auf einer parallelen Welle benötigt wird oder wenn durchschnittliche Übersetzungsverhältnisse ungleich 1 zwischen Antrieb und Abtrieb erforderlich sind, muß ein weiteres Paar runder Räder für diese Übersetzung sorgen.

Die Hebellänge, der Achsabstand und die Räderübersetzung können so optimiert werden, daß bei gegebenem Weg-Zeit-Verlauf am Abtriebsrad lauffähige Kurven entstehen.

Je nach Wahl dieser Abmessungen können auch hier alle Wellen beidseitig gelagert werden. Das Abtriebsrad in Bild 4 bildet eine Hohlwelle.

Weitere, in diesem Zusammenhang weniger interessante Prinziplösungen zur Erzeugung drehender Abtriebsbewegungen bei drehendem Antrieb stellt /4/ dar.

6. Vergleich zwischen Unrundrädern und ebenen Rollensterngetrieben an einem Beispiel

An einem Lehrbeispiel, das in /1/ beschrieben ist, soll der Unterschied bei der Auslegung von Unrundrädern und ebenen Rollensterngetrieben verdeutlicht werden.

Bild 6 zeigt diesen Mechanismus, eine versetzte Schubkurbel zur Erzeugung einer geradlinigen Abtriebsbewegung.

Durch einen Zusatzmechanismus - ein Rollensterngetriebe oder ein Unrundräderpaar - soll die Schubkurbel so erweitert werden, daß über ein Viertel der Zykluszeit eine konstante Geschwindigkeit von 1.2 m/s am Abtriebsschieber eingehalten wird. Die restliche Bewegung kann frei gestaltet werden, z.B. um möglichst kleine Beschleunigungen am Abtriebsschieber zu erzielen.

Die Zykluszeit beträgt 100 ms, der Hub des Schiebers soll in jedem Fall 100 mm betragen.

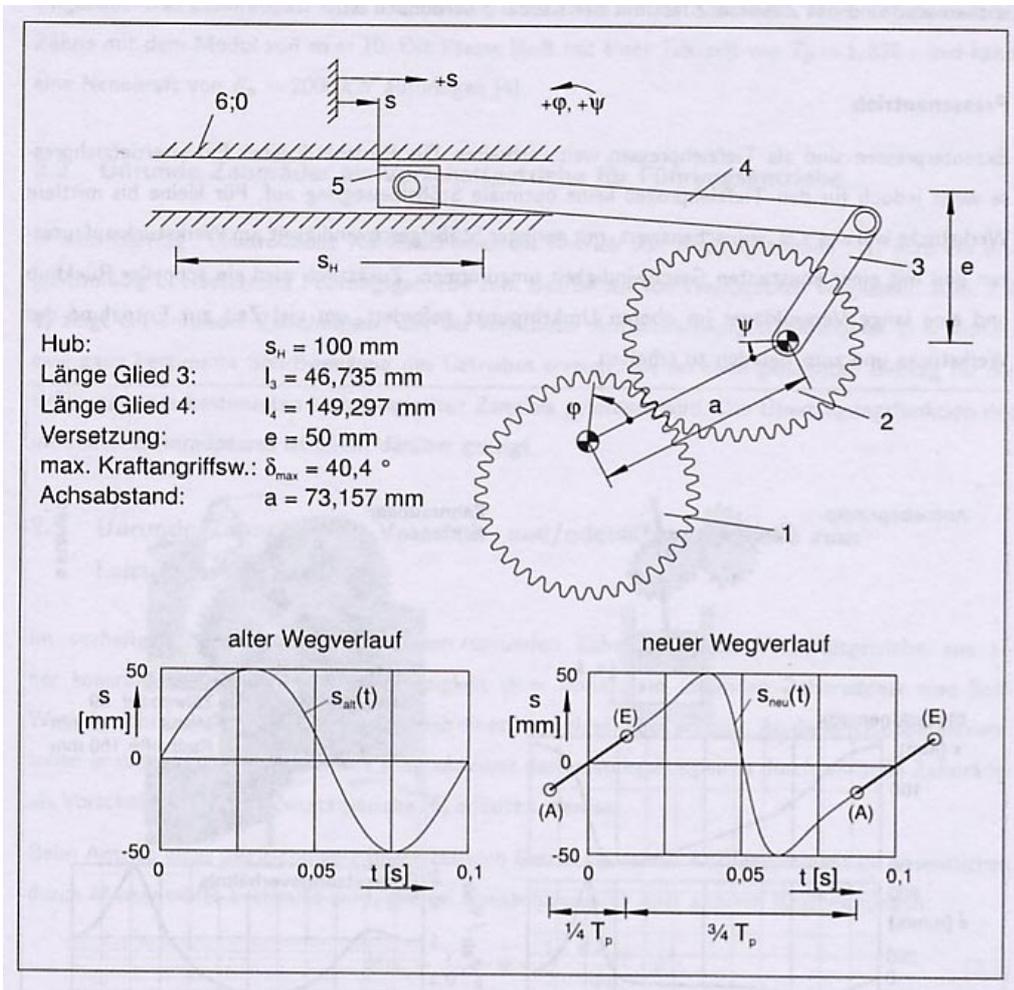


Bild 6: Beispielmechanismus

Zunächst optimiert man nun den Bewegungsablauf ψ an der Kurbel so, daß sich ein möglichst günstiger Beschleunigungsverlauf für den Weg s ergibt.

Wenn man damit ein Unrundräderpaar mit gleichmäßigem Antrieb φ berechnet, erhält man in diesem Beispiel eine ungünstige Räderform, da die Unrundräder scharfe Kanten bzw. enge Höhlungen aufweisen, so daß sie sich nicht herstellen lassen /1/.

Um herstellbare und lauffähige Unrundräder zu erhalten, muß nun das Bewegungsdiagramm ψ an der Kurbel nach diesem Kriterium angepaßt werden.

Es ergibt sich dann folgende Lösung:

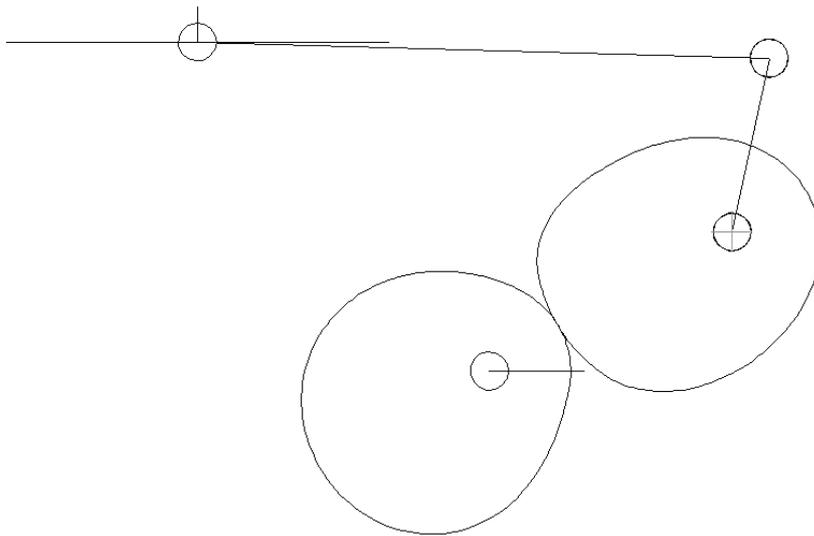


Bild 7: Lösung mit dem Unrund-Räderpaar

VDI2002_Unrund-1: s, Taktzahl: 600 U/min, Zykluszeit: 100 ms

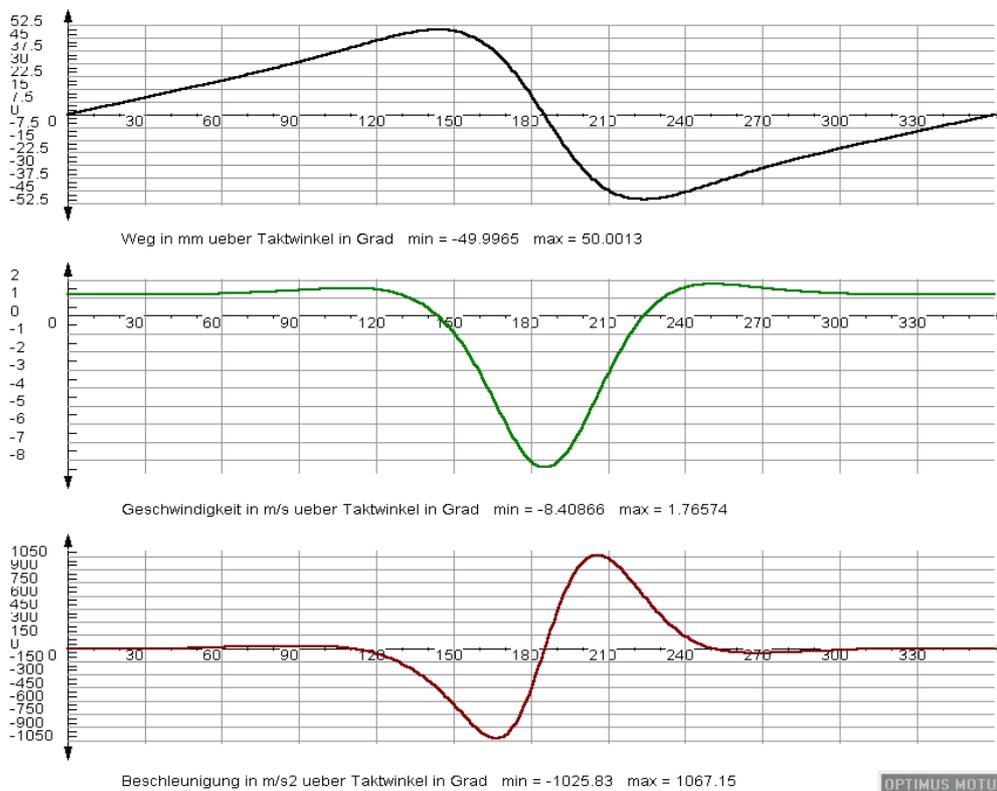


Bild 8: Bewegungsdiagramm für den Abtriebsschieber bei Unrundrädern

Bild 8 zeigt das resultierende Bewegungsdiagramm am Abtriebsschieber mit Maximalbeschleunigungen über 1000 m/s^2 .

Diese Beschleunigung muß in Kauf genommen werden, weil sich sonst kein lauffähiges Unrundräderpaar ergeben würde, und weil bei Unrundrädern keine kinematischen Abmessungen zur Verbesserung der Räderform optimiert werden können.

Bild 9 zeigt für die gleiche Bewegungsaufgabe eine Lösung mit Rollensterngetriebe:

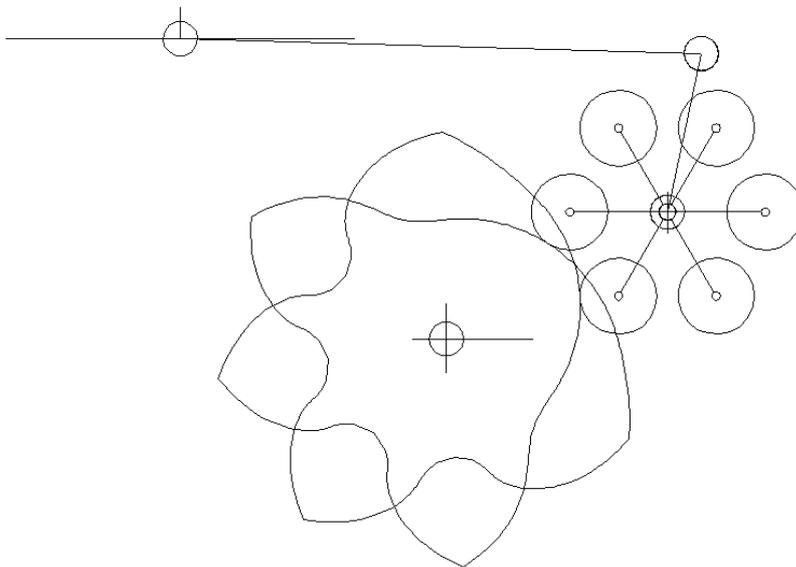


Bild 9: Lösung mit ebenem Rollensterngetriebe

Der Achsabstand beträgt auch hier 73.157 mm , der Rollensternradius ist 28 mm und der Rollendurchmesser 22 mm . Der Rollenstern besitzt 6 Kurvenrollen.

Der Rollensternradius wird so groß wie möglich gewählt. Das bedeutet, daß gerade keine Schlaufen in den Rollenmittelpunktsbahnen entstehen (siehe oben). Der Betrag des Profilkrümmungsradius ist dann größer als der Rollenradius.

Der Rollensternradius und der Rollendurchmesser werden so gewählt, daß kein Unterschnitt an den Kurvenbahnen entsteht, und daß ein möglichst günstiger Übertragungswinkel erreicht wird.

Der kleinste Übertragungswinkel liegt in diesem Beispiel bei etwa 28 Grad . Solch kleine Übertragungswinkel sind typisch für ebene Rollensterngetriebe und erfordern eine steife Getriebebauweise und hohe Fertigungsgenauigkeit.

VDI2002_Parallelgetriebe-2: s, Taktzahl: 600 U/min, Zykluszeit: 100 ms

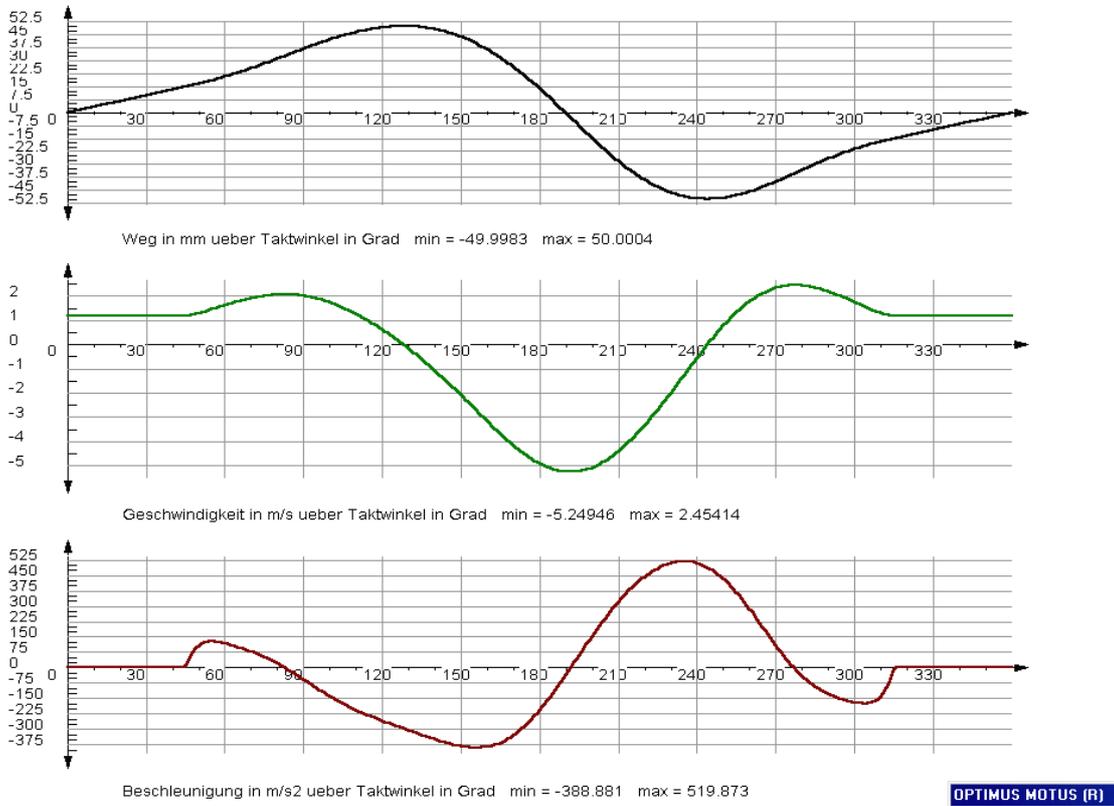


Bild 10: Bewegungsdiagramm am Abtrieb s mit ebenem Rollensterngetriebe

Vorteil des ebenen Rollensterngetriebes ist, daß der auf günstige Schieberbeschleunigungen hin optimierte Kurbeldrehwinkel $\psi(\varphi)$ ohne Abstriche realisierbar ist.

Bild 10 zeigt das sich ergebende Bewegungsdiagramm s am Abtriebsschieber. Die Maximalbeschleunigung ist mit ca. 500 m/s^2 nur halb so hoch wie bei der Lösung mit Unrundzahnradern.

An Hand dieses Auslegungsbeispiels ist erkennbar, daß der Optimierungsspielraum zum Erzielen bestimmter Abtriebsbewegungen mit lauffähigen Getrieben bei ebenen Rollensterngetrieben erheblich größer ist als bei Unrundzahnradern.

7. Literaturhinweise:

/1/ Braune, R., Wyrwa, K.: „Unrunde Zahnräder: Auslegung – Herstellung - Einsatzmöglichkeiten“, VDI-Bericht 1423, VDI-Verlag. Beitrag zur VDI-Getriebetagung 1998.

/2/ Hasse, R.: „Über die vielfältigen Möglichkeiten, unrunde Zahnräder für typische Getriebeaufgaben der Technik optimal auszulegen“. VDI-Bericht 1567, VDI-Verlag. Beitrag zur VDI-Getriebetagung 2000.

/3/ Internet-Seite www.nolte-nc-kurventechnik.de, „Schrittgetriebe“ und „Fachberichte“

/4/ VDI-Richtlinie 2727, Blatt 3: „Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben. Erzeugung gleichsinniger Drehbewegungen mit Rast(en), Antrieb gleichsinnig drehend“