

# «Crown Gear-Evolvere», die fortschrittliche Alternative

Für Winkelgetriebe gibt es im Wesentlichen drei Möglichkeiten für Zahnradtypen. Die häufigsten Lösungen sind Kegelrad- und Schneckengetriebe. Eine Alternative ist ein Kronenrad, kombiniert mit einem Stirnradritzel, eine Lösung mit spezifischen Vorteilen.

ULRICH L. KISSLING UND  
STEFAN SCHOEN

Der Hauptvorteil der Kronenräder (Bild 1) gegenüber dem Kegelrad ist die axiale Freiheit des Ritzels. Dadurch entfällt das Einstellen des Tragbilds bei der Montage. Auch bei extremen Leichtbaugetrieben mit sich stark deformierenden Gehäusen wird das Tragbild unter unterschiedlicher Last wenig beeinflusst.

### Berechnen der Geometrie und der Zahnform

Ein Kronenrad hat Ähnlichkeiten mit einer gebogenen Zahn-

stange. Im Gegensatz zu diesem einfachsten aller Getriebe kämpft der Ingenieur bei der Auslegung eines Kronenrads aber mit den Beschränkungen, die durch die Biegung entstehen. Da die Zahnflanke bei einem geradverzahnten Kronenrad parallel zu einem Radius des Kronenrads verlaufen muss, muss auch der Eingriffswinkel von aussen nach innen abnehmen.

Im Beispiel in Bild 2 ändert sich der Eingriffswinkel von 35° am Aussendurchmesser bis zu 15° am Innendurchmesser. Die Folgen sind sehr steile Zahnflanken innen, wodurch die Evolvente sehr kurz wird und nur noch einen kleinen Teil der

Zahnhöhe trägt, und ein spitzer Zahn aussen. Nach innen beginnt bald ein Unterschnitt, der den nutzbaren Bereich einschränkt. Durch geschickte Wahl des Breitenversatzes (Bild 3) kann optimiert werden. Insgesamt ergeben sich ein minimaler Innendurchmesser und ein maximaler Aussendurchmesser, welche die Gesamtbreite limitieren.

Bei der Auslegung eines Kronenrads ist es vorteilhaft, durch die Festlegung eines minimalen und eines maximalen Eingriffswinkels die erreichbaren Innen- und Aussendurchmesser zu bestimmen. Hieraus ergibt sich der Bereich für das Modul. Hilfreich ist es, neben

## ASS AG Antriebstechnik übernimmt CROWN GEAR BV

Die ASS AG ist der führende Hersteller für kundenspezifische Getriebe in der Schweiz, mit Harmonic-Drive-Getrieben, Planetengetrieben, Schneckengetrieben usw. Der Markenname «Evolvere» steht für «mehr als die Norm». Seit rund zehn Jahren arbeiteten die beiden Firmen ASS AG und Crown Gear erfolgreich zusammen. Für Getriebe in Textilmaschinen, Automation, Medizintechnik, Liftindustrie usw. werden heute schon durch ASS jährlich etwa 10 000 bis 15 000 Stück Crown Gear-Zahnrad eingesezt.

Die ASS AG pflegt eine enge Zusammenarbeit mit der ETH Zürich und der Fribourger Universität. Ein gemeinsames Projekt für die Weiterentwicklung zum Crown Gear II ist dort angelaufen. Der Transfer von Erkenntnissen für die neuesten Berechnungen, Gestaltungen und Herstellung für diese Kronenrad-Winkelgetriebe mit axialer Ritzelfreiheit leitet eine neue Phase der Einsatzmöglichkeiten ein.

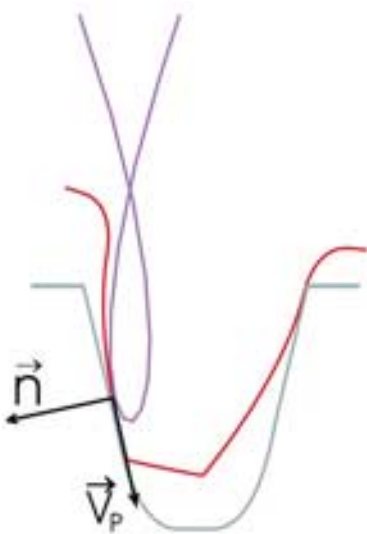
Die Fertigung der Kronenräder verbleibt mit ehemaligen Mitarbeitern in Holland, und wurde nach der Übernahme im Zweischichtbetrieb sofort wieder aufgenommen. Die Technik und der Verkauf werden mit den Fachleuten und Ingenieuren in der Schweiz vorgenommen. Neben den Crown Gear-Aktivitäten für die Herstellung und Lieferung sind sämtliche Patente und Lizenzen an die ASS AG übergegangen. Schon im Geschäftsjahr 2003 ist durch die Optimierung der Ressourcen und den daraus resultierenden komprimierten Kundenvorteil mit einem Erfolg zu rechnen.

Zwischen der ASS AG und der KISSsoft AG besteht seit längerem ein enger Kontakt. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, eine Schnittstelle von den KISSsoft-Hirnware-Berechnungsprogrammen zu den spezialisierten Berechnungsprogrammen von Crown Gear anzubieten. Damit können Kronenräder bezüglich Basisgeometrie, 3D-Modell sowie Festigkeit und Lebensdauernachweis ausgelegt werden.

ASS AG, Antriebstechnik Stefan Schoen, Hauptstrasse 50, 3186 Düringen  
Tel. 026 492 99 11, Fax 026 492 99 10, www.assag.ch, stefan.schoen@assag.ch

den nackten Zahlen auch eine grafische Darstellung der Zähne zu betrachten. Mit Erfahrung erkennt der Ingenieur aus einer Abbildung, in welche Richtung die Parameter zu ändern sind. Die Erfahrung hat gelehrt, dass theoretische Darstellungen früher oder später an Grenzen stossen. Besser bewährt und viel sicherer in der Praxis sind Darstellungen, die auf einer Simulation des Abwälzvorgangs beruhen, noch besser auf der Simulation des Fertigungsvorgangs.

Hierbei wird die Trajektorie eines Punktes an der aktiven Oberfläche des Werkzeugs verfolgt (Bild 4) bis die Geschwindigkeit normal zur Oberfläche einen Nulldurchgang hat. Diese Punkte sind potenzielle Punkte der Zahnformoberfläche. Die tatsächlichen Punkte der Oberfläche müssen von den imaginären unterschieden werden, an denen zwar die Normalgeschwindigkeit ebenfalls verschwindet, die aber durch dahinterliegende Punkte als ausserhalb des Materials gekennzeichnet werden. Diese Unterscheidung zwischen realen und imaginären Punkten stellt die grös-



**Bild 4.** Trajektorie (blau) eines Oberflächenpunktes des Ritzels (rot) bei festgehaltenem Kronenrad (grün). Die Stelle mit verschwindender Normalgeschwindigkeit definiert einen möglichen Punkt der Zahnform.

ste Schwierigkeit bei dieser Vorgehensweise dar.

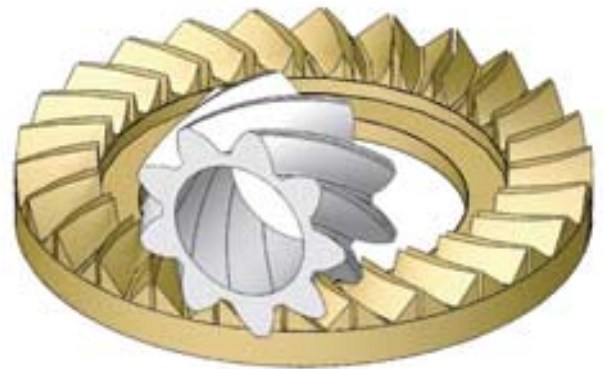
Die Berechnung der 3D-Zahnform des Kronenrads kann auf Grund der klassischen Herstellmethode (Abwälzen mit einem Stossrad) bestimmt werden. Durch die Ausgabe des 3D-Körpers kann im CAD-Programm die Form konstruiert werden, um Kronenräder im Spritzguss-, Sinter- oder Formschmiedeverfahren herzustellen.

Für die Kontrolle des Kronenrads auf Unterschnitt oder spitzen Zahnkopf ist die 2D-Schnittdarstellung geeignet. In dieser Darstellung (Bild 2) wird gleichzeitig die Zahnform des Kronenrads innen, mittig und aussen gezeigt. Durch Knopfdruck lassen sich die Zahnräder schrittweise drehen. Damit kann das Abwälzen in allen Schnitten überprüft werden. Bei zu spitzem Zahnkopf oder ungünstigen Eingriffsverhältnissen muss, wie Bild 5 zeigt, die Zahnhöhe verkürzt werden.

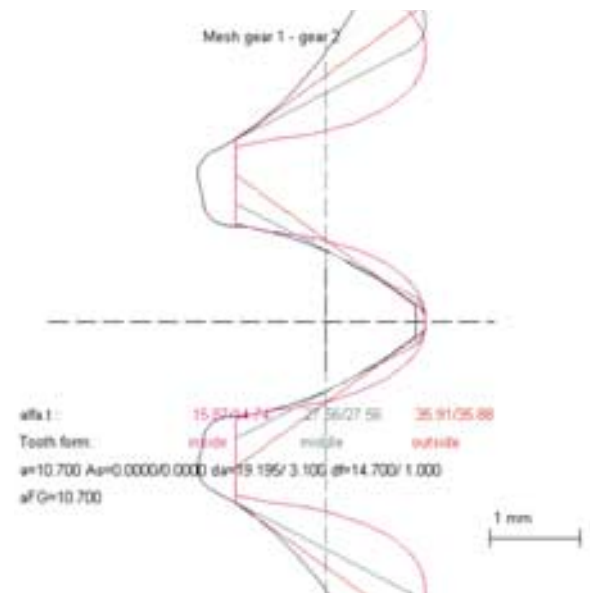
Eine Breitenballigkeit der Zahnflanke kann erzeugt werden, indem für die Fertigung ein Stossrad verwendet wird, welches eine um einen oder zwei Zähne grössere Zähnezahl als das Ritzel hat. Mit Hilfe der «Speicherfunktion» in der 2D-Darstellung kann der Unterschied zwischen den erzeugten Zahnformen sehr gut kontrolliert und beurteilt werden. Bei einem grossen Breitenversatz des Kronenrads kann sich die Balligkeit aber einseitig verschieben! In jedem Achsschnitt durch das Stirnrad entspricht das Kronenradgetriebe grundsätzlich einem Ritzel-Zahnstangentrieb. Auf dieser Theorie lassen sich der Eingriffswinkel, die Berührlinien und die Überdeckung in jedem Schnitt bestimmen (Bild 6).

## Festigkeitsberechnung

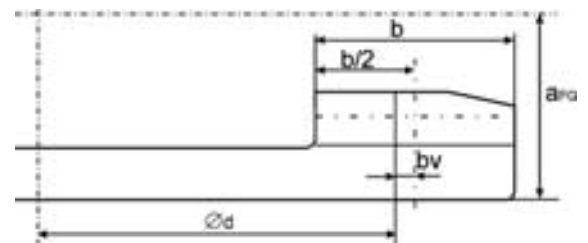
Für die Festigkeitsberechnung stehen prinzipiell die drei Vorgehensweisen «Entwicklung einer eigenen Rechenmethode», «Anpassung der Methode zur Behandlung



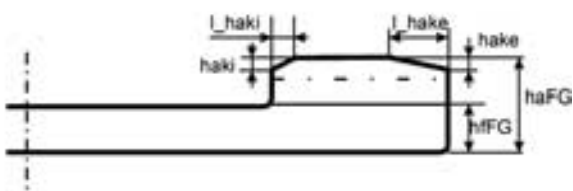
**Bild 1.** 3D-Ansicht eines Crown Gear-Radsatzes, gehäuseoptimiert durch Simulation mit der FEM-Methode. (Bilder: ASS)



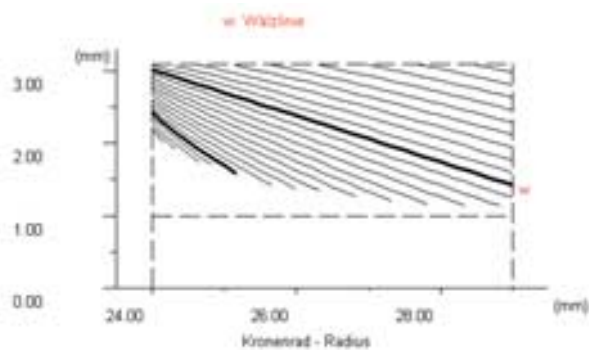
**Bild 2.** Darstellung der Paarung eines zylindrischen Stirnrad-Ritzels mit einem Kronenrad. Vom Kronenrad sind drei Schnitte dargestellt, am Innendurchmesser in violett, in der Mitte in Grün und am Aussendurchmesser in Rot.



**Bild 3.** Definition des Breitenversatzes  $b_v$ .



**Bild 5. Definition der Kopfhöhenänderung am Innen- und Aussendurchmesser.**



**Bild 6. Lage der Berührlinien auf der Kronenradflanke.**

aber eine Art Doppelsprung: die DIN 3991 beinhaltet im Wesentlichen die Ermittlung einer Ersatzstirnradverzahnung, der Rest entspricht der DIN 3990.

Bleibt noch die Anpassung der DIN 3990. Hier kann man sich von der Philosophie der DIN 3991 inspirieren lassen und ein ähnliches Konzept entwerfen. Kritische Punkte sind, dass sich die Eingriffsverhältnisse von innen nach aussen gewaltig ändern, eine Berechnung also entweder nur auf die Verhältnisse in der Mitte der Verzahnung zurückgreift, oder aber eine Mittelung zwischen innen, Mitte und aussen stattfinden muss. Zudem ist bei Stirnrädern immer ein endlicher Teilkreis gegeben, während beim Kronenrad der Teilkreis in einer Ebene liegt.

## Berechnung nach DIN 3990 oder ISO 6336

Die Festigkeitsberechnung von Kronenrädern beruht auf der Stirnradberechnung nach DIN 3990. Die schräg verlaufenden Berührlinien ergeben beim geradzahnten Kronenrad eine Erhöhung der Gesamtüberdeckung wie bei schrägverzahnten Stirnrädern. Aus der Schräge der Berührlinien kann ein virtueller Schrägungswinkel abgeleitet werden, welcher in der Festigkeitsberechnung über den Schrägungsfaktor berücksichtigt wird. Als Profilüberdeckung wird der Wert bei Mitte Zahnbreite verwendet. Die Herleitung des Breitenlastfaktors und Stirnfaktors nach DIN 3990 ist nicht für Kronenräder einsetzbar. In Crown Gear-Berechnungen werden üblicherweise zwei fixe Werte gesetzt.

## Berechnung nach ISO 10300

Als Alternative kann die Festigkeitsberechnung nach ISO 10300 für Kegelräder sinnvoll sein. Kronenräder können als Grenzkegelräder mit Kegelwinkel  $0^\circ$  (Ritzel) und  $90^\circ$  (Kronenrad) angesehen werden. Die Festigkeitsberechnung

von Kegelrädern wird auf der Basis des Stirnrads mit gleicher Zahnform wie das Kegelrad durchgeführt. Im Fall des Kronenrads ergibt sich für das Ritzel die Ersatzzähnezahl 1 und für das Rad unendlich.

## Spannungsverteilung über der Zahnbreite

Eine schnelle Methode zur Abschätzung des Verlaufs der Hertzischen Pressung und der Zahnfußspannungen ergibt die Berechnung in einzelnen Schnitten als Zahnstange. Damit folgt – bei Annahme einer konstanten Linienlast – der Verlauf der Pressung im Wälzpunkt und der Fußspannung längs der Zahnflanke. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Akahori ergibt eine Übereinstimmung der Zahnfußspannung am Kronenrad.

## Soll-Sicherheiten

Die Nachrechnung der Festigkeit ergibt als Resultat Sicherheitsfaktoren für Pitting und Zahnfußbruch. Zur Beurteilung wäre es wichtig, die Mindestsicherheiten zu kennen. Mindestsicherheiten können je nach Einsatzbedingungen und Anforderungen sehr unterschiedlich sein und sollten auf Grund von Erfahrung und Prüfstandergebnissen festgelegt werden. Sofern nichts Näheres bekannt ist, kann für Zahnradberechnungen von einer Mindestsicherheit im Fuss von 1,4 und in der Flanke von 1,0 ausgegangen werden.

Messungen an einem einsatzgehärteten, geschliffenen Kronenrad ergaben bei einem Antriebsdrehmoment von 675 Nm nach  $10^7$  Lastwechsel am Kronenrad ein deutliches Pitting. Risse oder Brüche am Zahnfuß traten keine auf. Eine Nachrechnung ergibt erstaunlich hohe Sicherheiten. Bei der Untersuchung wurden aber Kronenräder verwendet, die extrem genau hergestellt und kontrolliert wurden. Der Breitenlastfaktor dürfte zu hoch sein. Eine Nach-



**Bild 7. Hypoid-Crown Gear-Servoantrieb für optimale Leistungsübertragung. Vorteil: Keine axiale Ritzeinstellung.**

von Stirnrädern (DIN 3990)» und «Anpassung der Methode zur Behandlung von Kegelrädern (DIN 3991)» zur Verfügung.

Die erste Möglichkeit ist nicht empfehlenswert, wenn man nicht gewillt ist, umfangreiche Messreihen durchzuführen. Die dritte Methode ist relativ einfach, macht



**Bild 8. Crown Gear als Hauptantrieb einer Webmaschine, M = 6000 Nm.**

rechnung gemäss ISO 10300 ergibt Flankensicherheiten um 1,0 und Fussicherheiten um 0,8. Die Flankensicherheit entspricht etwa den Erwartungen, die Fussicherheit ist so tief, dass Zahnfussbrüche zu erwarten wären. Auf Grund der Analyse kann interpretiert werden, dass für industrielle Applikationen mit Kronenrädern aus Stahl der Fussbruch unkritischer ist als bei Stirnrädern und die Mindestsicherheiten mit 1,0 für den Fuss und 1,0 für die Flanke angesetzt werden können.

## Herstellung

Crown Gear-Evolvere-Räder werden hauptsächlich nach dem Abwälzverfahren hergestellt. Zwischen KISSsoft und ASS wurde vereinbart, dass Daten von Kronenrädern über eine Schnittstelle im KISSsoft-Programm so ausgegeben werden, dass sie von den entsprechenden Crown Gear-Programmen direkt eingelesen werden können. Damit liegen spezialisierte Berechnungsprogramme vor, mit welchen unter anderem Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

oder Krümmungs- und Schmiegungsanalysen durchgeführt werden können.

Für Anwendungen im Formenbau können spezifische Modifikationen in KISSsoft-Hirware berechnet und im 3D-Modell integriert werden. Damit ergibt sich die Sollkontur für die Form für die Herstellung von Kronenrädern im Spritzguss-, Sinter- oder Formschmiedeverfahren. Die Herstellung der Form kann mit verschiedenen Verfahren realisiert werden. Die Optimierung der Zahnform von nicht spanend gefertigten Kronenrädern hängt vom Fertigungsverfahren ab. Bei spanlosen Fertigungsverfahren kann man mit dem entsprechenden Know-how nahezu alle Einsatzgebiete abdecken.



**Bild 9. Antriebsschema in der Webmaschine.**

Die Sintertechnik ist für Elektrowerkzeuge wie Winkelschleifer (z.B. für Bosch, Black + Decker, Metabo) geeignet, von denen jeweils bis zu 1 Mio Stück hergestellt werden.

Die Spritzgusstechnik wird zum Beispiel im Miniaturbereich für Video-Schubladenantriebe eingesetzt. Mit vielen ähnlichen Applikationen werden heute Stückzahlen von bis zu 10 Mio erreicht und Bauteile für die Automobilindustrie hergestellt.

## Zusammenfassung

Das Crown Gear-Evolvere-Winkelgetriebe basiert auf einer langjährigen Entwicklung. Der Anwendungsbereich dieser Antriebe im Einsatz als neuzeitliches Leistungsgetriebe erfordert auch gezielte Innovationen. Die Vorteile liegen auf der Hand:

- achsiale Freiheit des Ritzels
  - einfache Herstellung mit hoher Qualität
  - keine Achsialkräfte auf die Eingangslagerung
  - keine Tragbild-Einstellung des Ritzels
  - hohe Untersetzung möglich, auch mit Mehr-Motorenantrieben / Mehrabtrieben
  - einfache Gestaltung für verschiedene Achsenwinkel (90 bis 135°)
- Diese Vorteile richtig zu nutzen – von der Leistungsauslegung bis zur Zahngeometrie und Herstellung – braucht jedoch viel Erfahrung und bedingt eine konstante Weiterentwicklung. ■



**FLUIDTEC**  
**HYDRAULIK**

Wisentalstrasse 4  
8185 Winkel  
Tel. 01 863 40 48  
Fax 01 863 40 59

- Schlauchschnellservice und Serienfertigung bis DN 100
- Zylinder Reparatur und Neuanfertigung

- Hydraulikmontagen vor Ort
- Hydraulik-Komponenten und Zubehör

info@fluidtec.ch  
www.fluidtec.ch