

Software für Getriebeentwicklung

## Radkörpergestaltung bei Kegelrädern

Die FVA-Workbench ist ein herstellerneutrales Werkzeug zur Simulation und Berechnung von Getriebesystemen. Bei kürzer werdenden Produktentwicklungszyklen ist es besonders wichtig, auf performante Modellierungsansätze und Berechnungsalgorithmen zu setzen. Die vorwiegend analytischen Ansätze garantieren schnelle und verlässliche Lösungen für alle wichtigen Fragen der Antriebstechnik. Dabei werden die Ergebnisse bei analytisch nicht beschreibbaren Körpern um geeignete numerische Verfahren ergänzt. Die intuitive Modellierungstechnik der FVA-Workbench garantiert stets ein vollständiges, valides und herstellbares Getriebe.

Entwickelt, diskutiert und validiert werden die Berechnungen in Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA). Durch die Mitgliedsbeiträge und öffentliche Förderungen werden in der FVA jährlich 14,9 Mio. Euro in Forschungsvorhaben, an den führenden deutschen Universitäten, Lehrstühlen und Forschungseinrichtungen, umgesetzt. Die FVA-Workbench versteht sich hier als Wissensplattform, um das Wissen der FVA für jede Ingenieurin und jeden Ingenieur anwendbar und zugänglich zu machen.

## Grundlagen der Kegelradberechnung in der FVA-Workbench

Die FVA-Workbench bietet verschiedene Möglichkeiten zur Berechnung von Kegelrädern. Einfache Verfahren werden mit gängigen ISO-, DIN- oder AGMA-Normen, Vorschriften der Schiffsklassifikationsgesellschaften und Berechnungen der FVA durchgeführt. Diese Ansätze rechnen mit Ersatzstirnradverzahnungen und sind daher auch ohne konkrete Fertigungsmaschine und detaillierte Geometrie sehr einfach anzuwenden. Allerdings bilden sie die Kegelradgeometrie nicht exakt ab. Genau an dieser Stelle setzt die lokale Simulation von Kegelrädern an. Im Gegensatz zu den einfachen Methoden basiert sie auf einer exakten Fertigungssimulation und auf einer Betrachtung aller Punkte im Eingriffsbereich. Durch den lokalen Ansatz können alle relevanten Einflüsse berücksichtigt werden, wie z. B. Wellenverlagerung, die Relativlage der Kegelräder zueinander und die umliegenden Steifigkeiten. Über einfache Sicherheitskennwerte hinaus können lokale Tragfähigkeitsnachweise einschließlich lokaler Schadensakkumulationsberechnungen oder Schadensfortschrittsberechnungen durchgeführt werden.

Im vorliegenden Artikel geht es um Modellverbesserungen durch lokale Verzahnungsberechnungen.

## Die Radkörpergestaltung in der FVA-Workbench

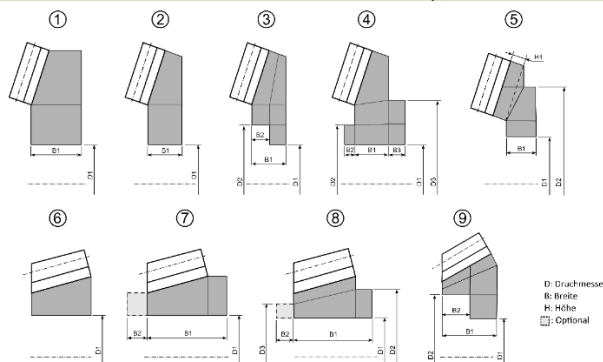
Die Berechnung der Lastverteilung an Kegel- und Hypoidrädern wird maßgeblich durch die umliegende Steifigkeit beeinflusst. Berücksichtigt wird die Steifigkeit der umliegenden Lager, der Welle, des Zahns und des Radkörpers.

Bisher wurde die Steifigkeit des Radkörpers in der FVA-Workbench durch einen elastischen Halbraum angenähert. Im Forschungsprojekt FVA 223 XVI „Methode zur Einbeziehung der Steifigkeit komplexer Radkörper in die Lastverteilungsberechnung und deren Umsetzung in BECAL“ (IMM der TU Dresden, Prof. Dr. Schlecht, CAD der Universität Bayreuth, Prof. Dr. Rieg) wurden Methoden

entwickelt, die Steifigkeit des Radkörpers präzise durch ein passendes FE-Modell zu ergänzen. Mit diesem Modell können Bohrungen im Radkörper, die Position, an der das Rad an der Welle befestigt ist, und die Geometrie des Radkörpers exakt mitberücksichtigt werden.

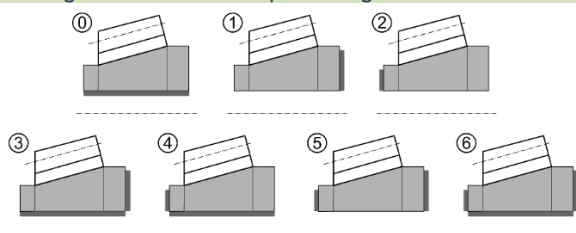
**Berücksichtigung der Radkörperverformungen in der frühen Auslegungsphase mit parametrisierbaren Standard-Radkörpern:** In der frühen Auslegungsphase ist die genaue Radkörpergeometrie oftmals noch nicht finalisiert. Daher lassen sich im ersten Schritt Radkörper parametrisch erstellen. Aus einer Auswahl von 9 Standard-Radkörpern und 6 verschiedenen Einspannmöglichkeiten lassen sich alle wichtigen Größen parametrisch definieren. Damit können in der FVA-Workbench sehr schnell und einfach erste Abschätzungen zum Einfluss des Radkörpers in sehr frühen Phasen des Projekts durchgeführt und damit zeit- und kostenintensive Änderungen an der Konstruktion vermieden werden. Die Eingabe in der FVA-Workbench wird durch zahlreiche Skizzen und Hilfetexte unterstützt. Um den Projektfortschritt zu unterstützen lassen sich die Radkörper als CAD-Bauteile exportieren. Damit kann der Konstrukteurin oder dem Konstrukteur eine Grundkonstruktion zur Verfügung gestellt werden, die nur noch ausdetailliert werden muss.

#### Parametrisierbare Standard-Radkörper:



Für eine gute Vernetzungsqualität wird empfohlen, die Varianten 1-5 als typische Tellerradradkörper, und die Varianten 6-9 als typische Ritzelradkörper einzusetzen. Standardmäßig wird für das Ritzel die Variante 6 und für das Tellerrad die Variante 1 gewählt.

#### Konfiguration der Einspannungsbereiche:



Standardmäßig ist beim Ritzel die Ferseneinspannung (1) und beim Tellerrad die Nabeneinspannung (0) gewählt. Eine weitere Einspannungsmöglichkeit ist die Zeheneinspannung 2. Mit den Optionen 3 - 6 ist eine Kombination der Einspannungsbereiche möglich.

Abbildung 1: Darstellung der parametrischen Radkörper- und Einspannmöglichkeiten in der FVA-Workbench

**Berücksichtigung der Verformungen komplexer Radkörpergeometrien im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess:** Alle Radkörper können als CAD-Modell eingelesen und verarbeitet werden. Der erste Schritt dabei ist die Positionierung. Die Positionierung stellt sicher, dass das Bauteil später an der richtigen Stelle sitzt und macht die CAD-Konstruktion unabhängig von der späteren Berechnung. Bei der Positionierung wird das CAD-Modell zugeschnitten, wodurch sichergestellt werden kann, dass die Schnittfläche genau auf die

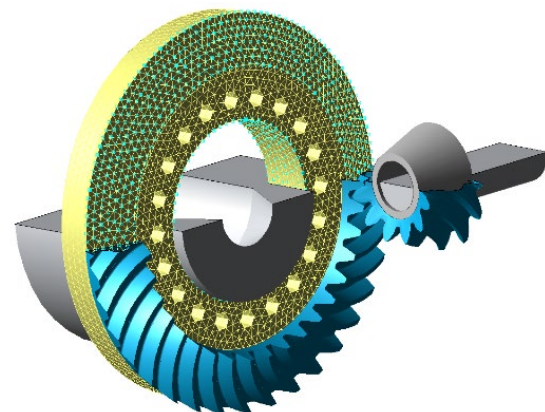


Abbildung 2: Tellerrad mit komplexen CAD-Radkörper und Ritzel mit Standardradkörper in der FVA-Workbench

Verzahnung passt und ggf. enthaltene Zähne auf dem Radkörper weggeschnitten werden. Mathematisch entspricht der Positionierungsvorgang einer Koordinatentransformation. Die grafische Unterstützung stellt sicher, dass bei diesem komplexen Prozess keine Fehler passieren.

Im nächsten Schritt wird das Bauteil vernetzt. Die Netzqualität wird von der FVA-Workbench überwacht und sobald zu viele verzerrte oder ungeeignete Elemente entstehen, wird eine Warnung ausgegeben. Über den FEM Qualitäts-Checker kann einfach festgestellt werden, an welchen Stellen ungünstige Elemente entstehen. Diese können dann im CAD Modell entfernt oder durch eine feinere Vernetzung aufgelöst werden. Abschließend werden die Koppelknoten definiert. Das Fangen der Koppelknoten ist ein automatischer Prozess, der alle FEM-Knoten markiert, die die Verzahnung oder die Welle berühren.

**Die örtliche Tragfähigkeitsberechnung unter Berücksichtigung von Radkörperverformungen:** Die örtliche Tragfähigkeitsberechnung besteht aus einer Vielzahl an Berechnungsschritten, die automatisch abgearbeitet werden. Die Grundlage bildet die exakte Geometrie der Kegelnradzähne, einschließlich aller topologischen Modifikationen. Diese exakte Geometrie wird entweder aus der Fertigungssimulation auf Grundlage der Maschineneinstellenden berechnet oder durch Import der Oberflächenbeschreibung in Form einer Punktwolke (3D-Neutralsdaten) eingelesen. Die Relativlageabweichungen unter Last, die durch Gehäuseverformungen, Wellendurchbiegung, Lagereinsenkung während der Betriebszeit auftreten, kommen aus der Gesamtsystemberechnung. Mit der exakten Verzahnungsgeometrie und unter den ermittelten Relativlageabweichungen wird der Zahnkontakt simuliert. Die so berechneten Kontaktverhältnisse können als Ease-Off, Tragbild und Drehfehler visualisiert werden. Sogenannte Klaffmaße beschreiben die Kontaktabstände zwischen den Zähnen entlang der Traglinien unter Beachten von Wälzabweichung, Mehrfacheingriff und Voreingriff. Darauf baut die Lastverteilungsberechnung auf. Die Steifigkeitsverhältnisse von Kegelnradverzahnungen mit elastischem Radkörper werden hier durch die Summe aus BEM- und FEM-Einflusszahlen abgebildet. Die Radkörperelastizität steckt in den FEM-Einflusszahlen. Ebenso neu ist, dass bei modellierten Radkörpern die Koppelnflüsse aller im Eingriff befindlichen Zähne berücksichtigt und der Einflusszahlenmatrix hinzugefügt werden. Aus der örtlichen Lastverteilungsberechnung und den Kontaktverhältnissen folgen schließlich die örtlichen Beanspruchungen sowie die Fußspannungen über der Zahnbreite und daraus werden entsprechende örtliche Tragfähigkeitswerte und Sicherheiten ermittelt.

## Einflüsse aus der Radkörpergestaltung auf die Flankenlastverteilung

### Einfluss der Tellerrad-Radkörperbreite

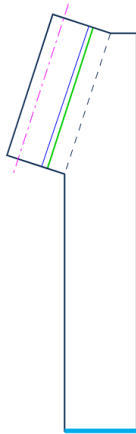
Die Breite des Radkörpers hat einen direkten Einfluss auf die Steifigkeit der Verzahnung und damit auf das Ergebnis. Im Folgenden soll der Einfluss der Breite des Radkörpers am Rad auf die Pressungsverteilung und die Zahnfußspannung diskutiert werden. Dazu werden mit Hilfe der Standardradkörper ein parametrisches Modell in der FVA-Workbench aufgebaut, welches sich sehr leicht anpassen und erneut rechnen lässt. In diesem Modell wird der Radkörper des Rades in der Breite variiert und die Ergebnisse gegeneinander verglichen. Nach unten hin wird die Radkörperbreite dahingehend begrenzt, dass die FE-Vernetzung eine minimale Kranzdicke von

einem Profilschnittmodul benötigt. Ein dünnerer Radkörper ist nur mit einer individuellen Konstruktion möglich.

Die Radkörpergeometrie für die dickste und die dünnste Variante wird in Abbildung 3 dargestellt. Die türkisfarbene Linie stellt die Fesselungsrandbedingung an der Nabe dar. Hier wird der Radkörper an der Welle festgehalten.

Radkörperbreite 17,1 mm

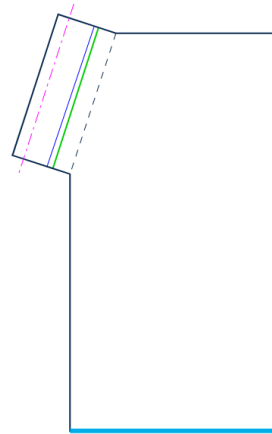
Wheelbody of Bevel or hypoid gear [9]



- Reference cone
- Transition tooth flank-root zone
- Root curve
- Hub clamping
- Heel clamping
- Toe clamping
- Wheel axis

Radkörperbreite 50 mm

Wheelbody of Bevel or hypoid gear [9]



- Reference cone
- Transition tooth flank-root zone
- Root curve
- Hub clamping
- Heel clamping
- Toe clamping
- Wheel axis

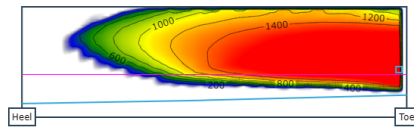
Abbildung 3: Radkörpergeometrie – Darstellung im Report der FVA-Workbench

In Abbildung 4 ist die Pressungsverteilung auf der Zahnflanke für einen Radkörper mit der Breite 17,1 mm und für 50 mm dargestellt. Im direkten Vergleich wird deutlich, dass durch die geringe Steifigkeit des Radkörpers die Zähne nicht mehr optimal in den Eingriff kommen und ein Kantenträger mit deutlichen Spannungsüberhöhungen entsteht. Dies legt den starken Einfluss des Radkörpers auf das gesamte Betriebsverhalten nahe.

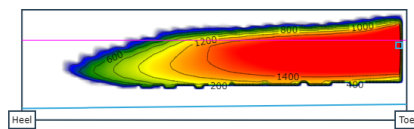
FVA GmbH – Radkörpergestaltung bei Kegelrädern

Radkörperbreite 17,1 mm

Bevel or hypoid gear [8]



Bevel or hypoid gear [9]

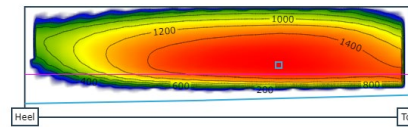


max. pressure: 2023.29 N/mm²

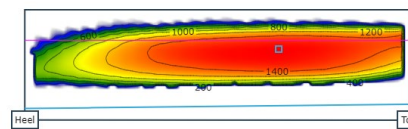


Radkörperbreite 50

Bevel or hypoid gear [8]



Bevel or hypoid gear [9]



max. pressure: 1610.14 N/mm²

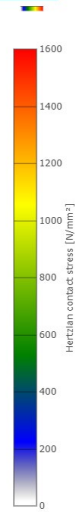


Abbildung 4: Auswirkung der Radkörperbreite des Tellerrades auf die maximalen Hertzischen Pressung auf der Ritzel- (oben) und der Tellerradflanke (unten)

In Abbildung 5 ist die Zahnfußsicherheit über der Radkörperbreite aufgetragen. Mit zunehmender Breite des Radkörpers wird deutlich, dass die Zahnfußsicherheit weiter degressiv wächst. Im Rahmen einer solchen Betrachtung lässt sich ein Optimum aus der Masse und einer ausreichenden Sicherheit bilden.

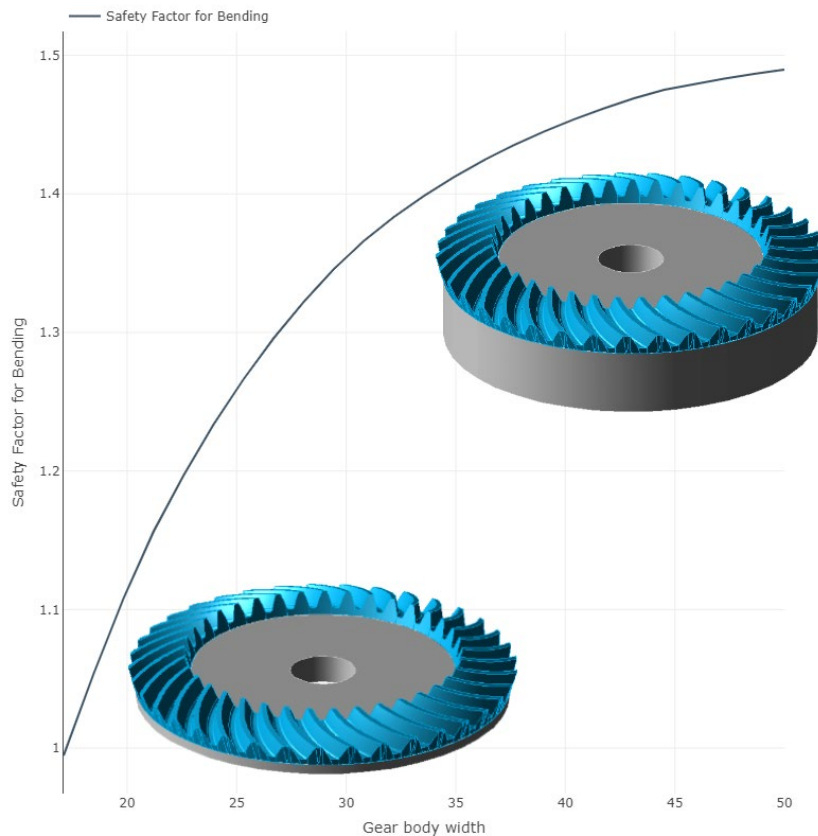


Abbildung 5: Verlauf der Zahnfußsicherheit über der Radkörperbreite

## Fazit

Mit der FVA-Workbench lässt sich der Einfluss der Radkörpersteifigkeit für den Kegelngriff vollständig beschreiben. Eine Überdimensionierung mit bekanntem „Angst-Eisen“ ist nicht mehr notwendig. Mit dem Kegelnradmodul kann einfach und präzise simuliert werden, wo kritische Betriebsbedingungen auftreten und wie diese konstruktiv gelöst werden können.

Vergleicht man die Pressungsverteilungen bei den beiden Radkörperbreiten, wird deutlich, dass die dünnere Konstruktion zu einem starken Kantenträger führen wird. Eine Berücksichtigung der Radkörpersteifigkeit ist damit unerlässlich bei der Auslegung der Verzahnung.

Die Möglichkeit parametrische Radkörper in der FVA-Workbench zu definieren, macht es sehr einfach, den Radkörpereinfluss schon in frühen Produktentwicklungsphasen mit zu berücksichtigen. Auf diesem Weg lassen sich sowohl Änderungskosten als auch eine Überdimensionierung vermeiden.

## Über die FVA GmbH:

Die FVA GmbH ist ein Gemeinschaftsunternehmen des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.) und der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.). 2010 gegründet, arbeitet die FVA GmbH Hand in Hand mit der deutschen Spitzenforschung und den führenden Unternehmen der Antriebstechnik, am aktiven Transfer der FVA-Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis. Kernkompetenzen des Unternehmens sind die Entwicklung von Berechnungs- und Simulationssoftware für die Antriebstechnik, die Aufbereitung und Überführung von gewachsenen Legacy Code Strukturen in moderne Softwarearchitekturen, professioneller Service und Support sowie die Durchführung von Fachseminaren und Kongressen.

[www.fva-service.de](http://www.fva-service.de) #FVAWorkbench #FVA DriveTechnology