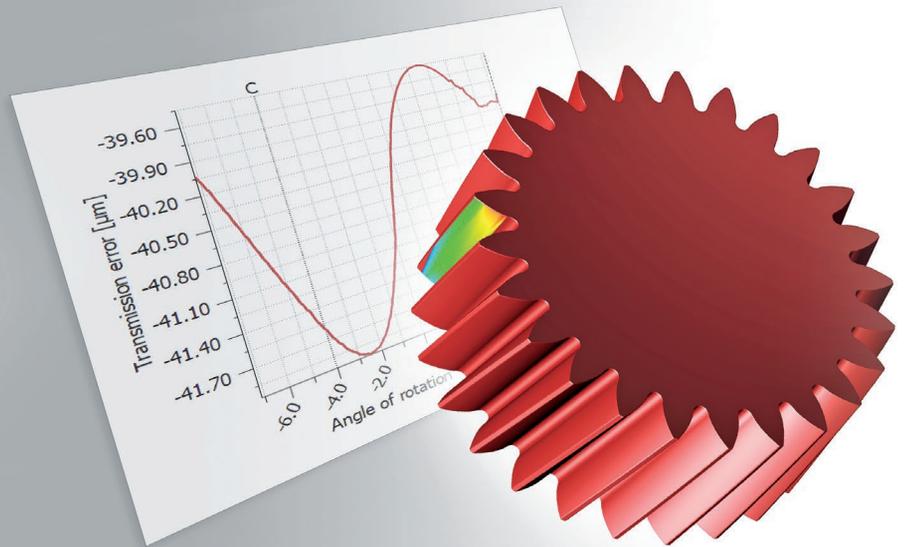


# EFFIZIENTER AUSLEGUNGSPROZESS FÜR STIRNRÄDER – TEIL 1

Die Auslegung von Stirnrädern lässt sich in drei Schritte unterteilen. Wir stellen dazu ein effizientes Verfahren für die Auslegung von Zahnrädern vor, das auf internationalen Normen für die Berechnung von Zahnradgeometrien und Festigkeiten basiert. Was Sie dabei beachten sollten und wo die Herausforderungen liegen, erfahren Sie im ersten Teil unserer Artikelserie. Hier werden die ersten drei Schritte ausführlich beschrieben.



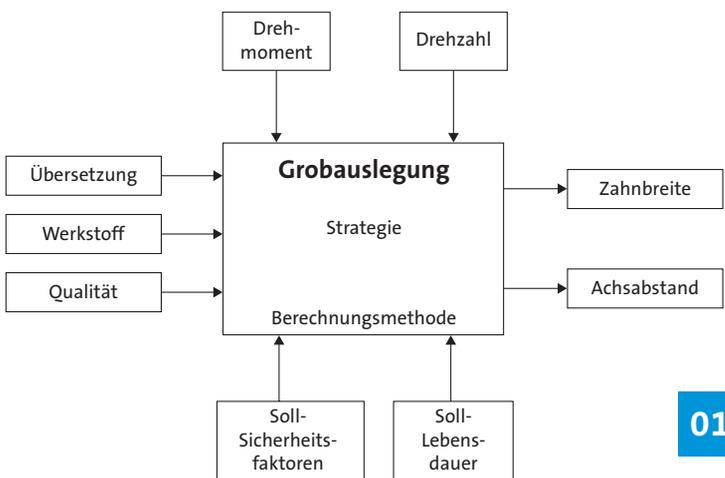
*Ilja Tsikur, M. Sc. ETH, ist Vertriebsingenieur bei der Kisssoft AG in Bubikon, Schweiz*

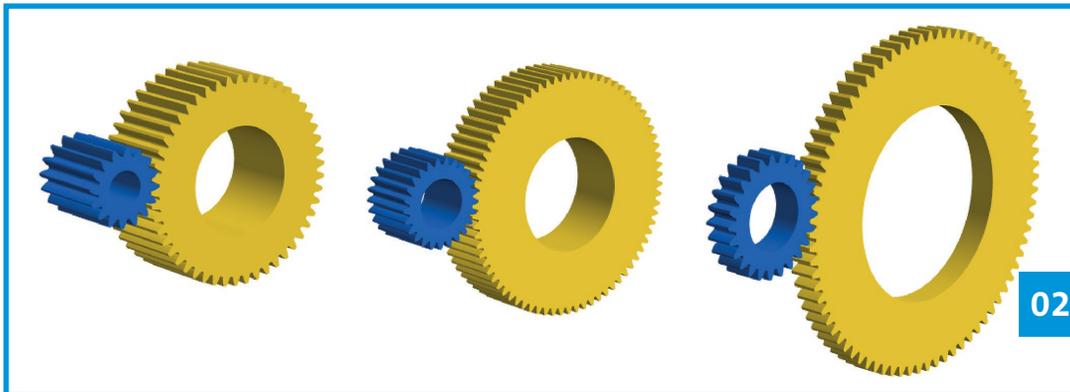
Im ersten Schritt werden verschiedene Grobdimensionen der Zahnradpaare wie Achsabstand und Zahnbreite grob geschätzt. Der Achsabstand und die Zahnbreite sind direkt mit dem zur Verfügung stehenden Platz verknüpft (Gehäuse-dimensionen) und beeinflussen Größe, Gewicht und Kosten der Zahnräder insgesamt. Darüber hinaus hängt die Drehmomentkapazität stark von den gewählten Zahnradwerkstoffen, der Art der Wärmebehandlung und der Zahnradqualität ab. Mit einsetz-

gehärteten Zahnrädern lassen sich tendenziell höhere Drehmomentkapazitäten als mit nitrierten Zahnrädern erzielen. Nichtsdestotrotz ist ein Fertigbearbeitungsprozess, bspw. Schleifen, erforderlich, um den Verzug durch das Härten auszugleichen. Will man all diese Faktoren bei der Grobauslegung von Zahnrädern berücksichtigen und die beste Lösung finden, steht man vor einer echten Herausforderung.

Im nächsten Schritt wird die Makrogeometrie der Zahnräder definiert. Bei einem herkömmlichen Herstellverfahren für Zahnräder sind Normalmodul, Eingriffswinkel und Bezugsprofil direkt mit der Fräsergeometrie verknüpft. Die Berücksichtigung der verfügbaren Werkzeuge in einer frühen Konstruktionsphase kann bei den späteren Herstellschritten viel Aufwand sparen. Darüber hinaus muss die resultierende Zahnradgeometrie den Sollsicherheitsfaktoren unter Beachtung der gewählten Methode für die Berechnung der Zahnradfestigkeit entsprechen. Zwar lassen sich mit einem größeren Zahnrad-Fußrundungsradius tendenziell höhere Zahnfußsicherheiten erzielen, jedoch kann es dadurch zu Eingriffsstörungen kommen, die den Einsatz eines Sonderfräasers erforderlich machen. Die Auswertung von auf verschiedenen Geometrien basierenden Lösungen und das Ausschließen nicht realisierbarer Lösungen in einer frühen Konstruktionsphase werden zu wichtigen Aufgaben.

In der letzten Phase wird die Mikrogeometrie der Zahnräder bestimmt. Das Ziel dieses Schritts besteht darin, die Flankenlinien- und Profilkorrekturen für ein optimales Tragbild, geringere Geräuschemissionen und zahlreiche weitere Parameter zu optimieren. Hier ist die Auswahl der Korrekturparameter direkt mit dem Fertigbearbeitungsprozess verknüpft. Häufig kommt eine Schleif-





**01** Vorgehensweise für die Grobauslegung

**02** Lösung mit kleinstem Achsabstand vs. größtem Achsabstand

schnecke mit passender Abrichtscheibe zum Einsatz. Steht eine spezifische Liste von Schleif-/Abrichtwerkzeugen zur Verfügung, ist es sinnvoll, sie im Auslegungsprozess zu berücksichtigen, um zusätzliche Kosten im Herstellverfahren zu vermeiden.

## ZAHNRAD-GROBDIMENSIONIERUNG

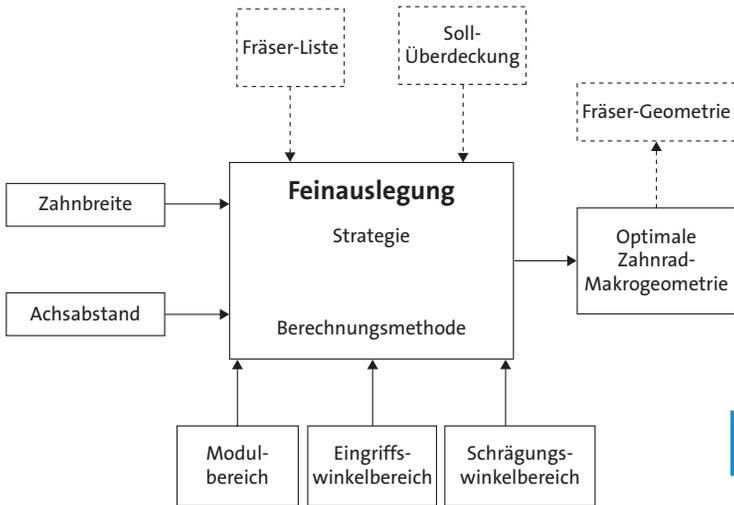
Im ersten Schritt erfolgt die Grobdimensionierung der Zahnräder. Das Ziel besteht darin, den optimalen Achsabstand und die optimale Zahnbreite zu ermitteln. Über diese beiden Parameter werden im Wesentlichen die Gesamtdimensionen des Getriebes (einstufig oder mehrstufig) definiert. Sie sind direkt mit den Dimensionen des Gehäuses verknüpft. Die Schätzung basiert auf der gewählten Berechnungsmethode für die Zahnradgeometrie und -festigkeit. Die Berechnungsmethode gründet auf den gewählten Normen (DIN, ISO, AGMA, VDI, GOST usw.) und den Sollsicherheitsfaktoren: i. d. R. für Fuß und Flanke, in manchen Fällen jedoch auch für Fressen, Graufleckigkeit, Verschleiß etc.

Die wichtigsten Eingabeparameter für die Grobauslegung sind Drehmoment (oder Leistung), Drehzahl, erforderliche Übersetzung, Zahnradwerkstoff und -qualität, Wärmebehandlung und Soll-Lebensdauer (**Bild 01**). Gemäß ISO 6336 [1] hängen die Dauerfestigkeiten der Werkstoffe von der Oberflächenhärte, der Werkstoffqualität und der Wärmebehandlung ab. Das bedeutet, dass wenn die Anforderungen an die Getriebedimensionierung nicht erfüllt werden, ein anderer Werkstoff, eine andere Wärmebehandlung oder eine höhere Zahnradqualität gewählt werden sollten.

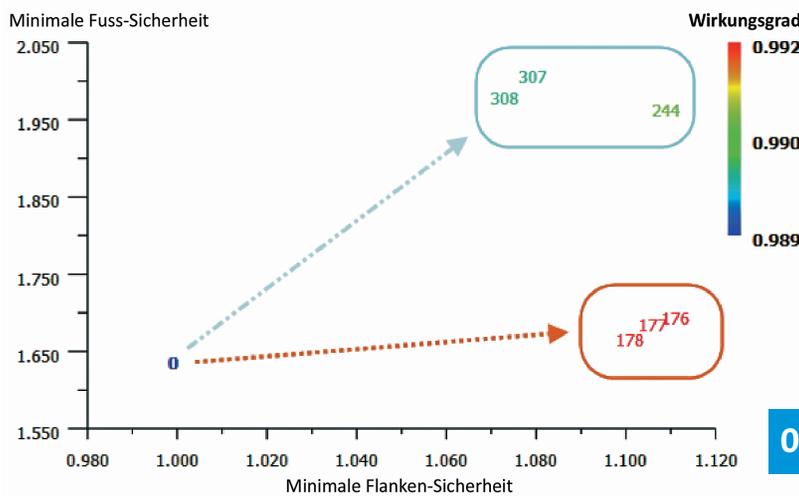
Sobald Eingabedaten, Sollsicherheitsfaktoren und Berechnungsmethode feststehen, kann eine Batchberechnung durchgeführt werden, um die verschiedenen geometrischen Lösungen zu extrahieren. Die Grundidee besteht darin, nach allen realisierbaren Lösungen hinsichtlich Achsabstand und Zahnbreite unter Berücksichtigung der Sicherheitsfaktoren und Beibehaltung eines sinnvollen Verhältnisses der Zahnbreite zum Normalmodul zu suchen ( $b/mn$  – bei Anwendungen im Bereich Automotive liegt es typischerweise bei  $b/mn \approx 6$ , bei Getrieben in der Industrie bei  $b/mn \approx 20$ ).

Die Lösung mit dem kleinsten Achsabstand ermöglicht kleine Getriebedimensionen, ist jedoch weniger attraktiv hinsichtlich Gewicht und Leistungsdichte. Die Lösung mit dem größten Achsabstand hat in diesem Beispiel das geringste Gewicht und die

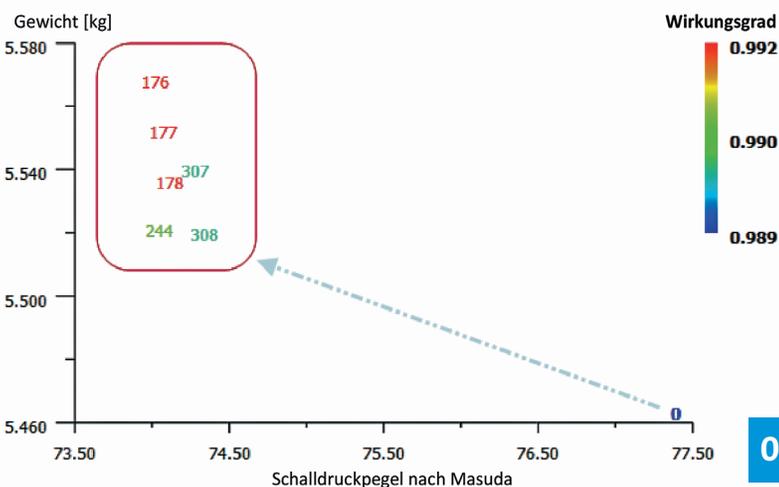
höchste Leistungsdichte, findet jedoch aufgrund der oberen Grenzwerte für die Getriebegröße keine Anwendung. Die dazwischenliegende Lösung ( $a = 112$ ) stellt einen guten Kompromiss aus kleiner Getriebegröße, niedrigem Gewicht und zweithöchster Leistungsdichte dar.



03



04



05

In **Bild 02** sind zwei Lösungen mit minimalem und maximalem Achsabstand dargestellt. Beide Lösungen sind realisierbar, da die Sollsicherheitsfaktoren erfüllt sind. Zu diesem Zeitpunkt muss der Ingenieur festlegen, welche Lösung sich optimal für die jeweilige Anwendung eignet. Bei der Suche nach der optimalen Lösung lassen sich verschiedene Strategien verfolgen.

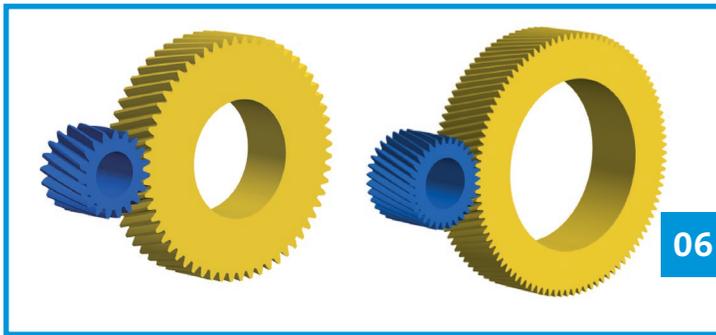
Ein häufig verfolgter Ansatz besteht darin, das Gewicht der Zahnräder zu reduzieren, da es direkt mit den Herstellkosten verbunden ist (Werkstoffpreis pro kg). Durch Auswahl eines entsprechenden Achsabstands lassen sich bis zu 25 % Zahnradgewicht einsparen (Lösungen zwischen 5,4 und 7,1 kg). Ein weiterer Ansatz besteht darin, die Leistungsdichte der Zahnräder zu maximieren (max. übertragbares Drehmoment/kg) – ein guter Kompromiss zwischen niedrigem Gewicht und hoher übertragbarer Leistung. In manchen Anwendungen, bspw. bei Zahnrädern aus Kunststoff, stellen Lösungen mit minimalem Achsabstand (kleinste Getriebedimensionen) aufgrund des begrenzten, im Endprodukt zur Verfügung stehenden Bauraums die bevorzugte Variante dar. In anderen Anwendungen wiederum werden Lösungen mit dem höchsten Modul bevorzugt, um den Einfluss von Fertigungstoleranzen zu verringern.

Die Grobauslegung von Zahnrädern stellt also einen wichtigen Schritt im Konstruktionsprozess von Zahnrädern dar. Sie zeigt verschiedene Möglichkeiten realisierbarer Getriebedimensionen auf und ermöglicht die Durchführung von Optimierungen in den Bereichen Gewicht, Größe und Herstellkosten von Zahnrädern. Im nächsten Schritt muss die Makrogeometrie der Zahnräder optimiert werden.

## MAKROGEOMETRIE VON ZAHNRÄDERN UND OPTIMIERUNG

Sobald Achsabstand und Zahnbreite feststehen, kann die Makrogeometrie der Zahnräder mit der sogenannten Feinauslegung optimiert werden. Hierbei geht es hauptsächlich darum, eine Berechnung der möglichen Variationen der Hauptparameter der Zahnräder durchzuführen, z. B. des Normalmoduls, des Eingriffswinkels, des Schrägungswinkels, der Zähnezahl, der Profilverziehung und des Bezugsprofils (**Bild 03**). Bei Einsatz moderner Programmierwerkzeuge stehen am Ende einer solchen Berechnung schnell über 1000 verschiedene geometrische Lösungen zur Verfügung. Die größte Herausforderung besteht darin, alle nicht realisierbaren Varianten auszuschließen und eine intelligente Strategie für das Erkennen der optimalen Lösung zu entwickeln.

Beim herkömmlichen Abwälzfräsen oder Erzeugen einer Verzahnung mithilfe eines Stoßrads ist die Auswahl von Normalmodul, Eingriffswinkel und Zahnrad-Bezugsprofil direkt mit der Werkzeuggeometrie verknüpft. Einschränkungen bei der Herstellung können somit die Anzahl der realisierbaren Lösungen begrenzen. In **Bild 04** sind zwei mögliche Ansätze dargestellt: Eine Liste verfügbarer Fräser kann als Vorgabe für das Feinauslegungsverfahren verwendet werden, um Kosten zu sparen, die sich durch die Erfordernisse eines Sonderfräasers beim späteren Herstellprozess ergeben können. Anders sieht es aus, wenn die optimierte Zahnradkonstruktion einmalig sein soll. Dann ist die Fräsergeometrie ein Resultat der Be-



rechnung, und es eröffnet sich neues Potenzial für Optimierungen. Beispielsweise kann man eine gewünschte Profilüberdeckung ( $\text{eps}_a \geq 2$ ) definieren und diese Einschränkung dazu nutzen, das Bezugsprofil des Zahnrads zu iterieren, um Lösungen mit hoher Überdeckung und geringerer Variation der Eingriffsteifigkeit zu erhalten.

Nachdem man den Achsabstand und die Zahnbreite festgelegt hat, kann man verschiedene Normalmodule sowie Eingriffs- und Schrägungswinkel über verschiedene Kombinationen aus Zähnezah und Profilverchiebungsfaktoren hinweg iterieren und dabei Lösungen ausschließen,

- bei denen die Mindestanforderungen an die Sicherheitsfaktoren nicht erfüllt sind,
- die einen Unterschnitt aufweisen,
- bei denen die Zahndicke am Zahnkopf zu klein ist,
- bei denen die Abweichung vom geforderten Zähnezahverhältnis zu groß ist oder
- bei denen das spezifische Gleiten (Verschleiß, Reibung) zu hoch ist.

Mithilfe eines einfachen Algorithmus lassen sich die besten Lösungen hinsichtlich Zähnezahverhältnis, Festigkeit, Gewicht, Eingriffsteifigkeit, spezifischem Gleiten etc. sortieren und extrahieren. Ein solcher Algorithmus kann zudem für die Erzeugung einer Liste der besten Gesamtlösungen auf der Grundlage einer gewichteten Kombination der vorstehend aufgeführten Kriterien verwendet werden. In Bild 04 und **Bild 05** ist die letzte Phase einer solchen Optimierung dargestellt, bei der nur einige wenige Kandidaten übrig bleiben, welche die besten Lösungen darstellen. Lösung Nr. 0 war der Ausgangspunkt nach Abschluss der Grobauslegung. Alle sonstigen Lösungen sind das Resultat der Optimierung bei identischem Achsabstand und identischer Zahnbreite (identische Getriebedimensionen).

Sämtliche optimierten Lösungen weisen beträchtliche Verbesserungen bei den Sicherheitsfaktoren und beim Wirkungsgrad sowie einen geringeren Schalldruckpegel nach Masuda [2] auf. Die Lösung Nr. 244 stellt einen guten Kompromiss aus hoher Festigkeit und hohem Wirkungsgrad einerseits und geringem Gewicht und niedrigem Geräuschpegel andererseits dar.

Wir haben hiermit eine effektive Methode für die Optimierung der Makrogeometrie von Zahnrädern bei vorgegebenen Einschränkungen für die Herstellung vorgestellt. Im nächsten Schritt wird die Mikrogeometrie der Zahnräder definiert. Für die weitergehende Analyse werden wir zwei unterschiedliche Varianten (**Bild 06**) aus dem Feinauslegungsverfahren verwenden. Die Zahnräder auf der linken Seite haben ein Bezugsprofil C nach der Norm ISO 53 [3]. Die Zahnräder auf der rechten Seite weisen ein hohes Zahnprofil auf, das mit einer Profilüberdeckung von 2 optimiert wurde. Sie haben außerdem ein etwas geringeres Normalmodul. Sonstige Parameter wie Achsabstand, Zahnbreite, Eingriffswinkel, Schrägungswinkel und Zähnezahverhältnis bleiben unverändert.

Fotos: Kisssoft AG

www.kisssoft.com

### 03 Feinauslegung

### 04 Feinauslegung, Sicherheitsanalyse

### 05 Feinauslegung und Analyse zu Schalldruckpegel, Gewicht und Wirkungsgrad

### 06 Beispiele für zwei optimale geometrische Lösungen mit Standardbezugsprofil (links) und Hochverzahnung (rechts)

#### Literaturverzeichnis:

[1] ISO 6336, Tragfähigkeitsberechnung von gerad- und schrägverzahnten Stirnrädern, Teile 1, 2, 3 und 6, 2006

[2] Masuda, T.: Prediction Method of Gear Noise Considering the Influence of the Tooth Flank Finishing Method, Japan, 1986

[3] ISO 53, Stirnräder für den allgemeinen und Schwermaschinenbau - Standard-Bezugszahnstangen - Zahnprofile, 1998

#### DIE IDEE



„Zur Nachrechnung von Stirnrädern gibt es diverse Normen wie ISO, DIN, VDI, AGMA usw. In den Normen ist jedoch nicht enthalten, wie eine Verzahnung ausgelegt werden soll. Es fehlte bis anhin also eine technische Anleitung, welche die einzelnen Schritte zur Stirnradauslegung durchläuft und dabei die aktuellen technologischen Herausforderungen mitberücksichtigt. Die vorliegenden Ausführungen bieten dem Ingenieur einen Vorschlag, wie eine solche Auslegung in der Praxis durchgeführt werden kann.“



Ilja Tsikur, Vertriebsingenieur,  
Kisssoft AG