

ZAHNKONTAKT RELOADED

Die einfachste Variante einer Zahnradstufe ist ein Paar Stirnräder mit evolventischem Zahnprofil. Aber auch in diesem Fall kann es bereits zu überraschenden Effekten beim Zahnkontakt kommen. Deshalb lohnt es sich, diese Effekte etwas näher anzuschauen.

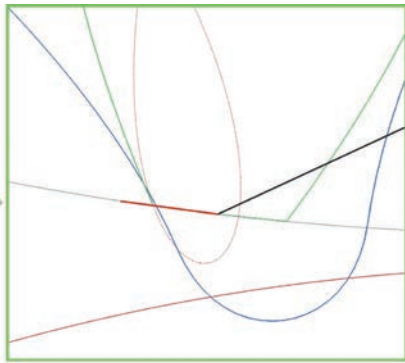
Betrachten wir zunächst den einfachsten Fall von zwei Stirnrädern, Zähnezahl z_1 und z_2 , Drehzahlen n_1 und n_2 , Drehmomente T_1 und T_2 , keine Herstellabweichungen, keine Verformungen, keine Modifikationen der Zahnform. Dies wird gerne als der „theoretische“ Eingriff bezeichnet. Das Übersetzungsverhältnis ist $-z_2/z_1$, d. h. $n_2 = -n_1 \cdot z_2/z_1$, $T_2 = T_1 \cdot z_2/z_1$. So lernt man es auch im Unterricht. Aber warum ist das eigentlich so? Klar ist, dass ein anderes Übersetzungsverhältnis recht schnell zu sehr grundlegenden Problemen beim Eingriff führen würde, da ja immer ein Zahn des einen Rades auf eine Zahnücke des Gegenrades treffen muss. Bei Zahnradern mit nicht evolventischen Zahnprofilen erzwingen die Zähne daher – durch den formschlüssigen Kontakt – auch immer dieses Übersetzungsverhältnis. Bei evolventischen Profilen müssen sie dies nicht, dank

des Verzahnungsgesetzes. Wird dieses eingehalten, ergibt sich automatisch die richtige Übersetzung. Um dies zu verstehen, kann man sich die Wälzkreise anschauen. Diese teilen den Abstand der beiden Mittelpunkte, also den Achsabstand, gerade im Verhältnis der Zähnezahlen auf. Hätte man zwei Reibräder mit den Wälzkreisdurchmessern, so würde sich dasselbe Übersetzungsverhältnis wie bei den Zahnradern ergeben, ganz ohne Zähne.

Gehen wir noch einen Schritt weiter: Die Kinematik des Zahnkontakts ergibt sich aus den Kontaktpunkten der aktuell im Eingriff befindlichen Flanken, die irgendwo zwischen den beiden Grundkreisen liegen. Wobei, so irgendwo dann doch nicht: Da die Flanken durch die Abwicklung einer Geraden auf den Grundkreisen entstehen (was dann eben die Evolvente ergibt), befinden sich alle „theoretischen“ Kontaktpunkte auf einer Geraden, der sogenannten Eingriffslinie (**Bild 01**). Diese wiederum entspricht der erzeugenden Geraden der Evolvente. Da wir zwei Grundkreise haben, muss die Eingriffslinie auf einer der beiden gemeinsamen Tangenten an die Grundkreise liegen. Welche, ergibt sich daraus, ob die rechte oder die linke Flanke in Kontakt ist.

Autor: Dr. Stefan Beermann, CEO, KISSsoft AG, Schweiz

03



01 Theoretischer Eingriff ohne Last und ohne Profil-Modifikationen

02 Kontaktsituation mit Modifikationen

03 Das tut weh: Ohne ausreichende Kopfrücknahme „kratzt“ der Kopf des Gegenrades von oben nach unten über die Flanke (Detailansicht: Die rote Schleife zeigt die Kurve des Kopfes aus Sicht des treibenden Rades)

Grundkreis passt (rot markiert in **Bild 02**). Dies hat verschiedene unangenehme Folgen: Zum einen ist dies die Stelle, an der sich sehr schnell das Übersetzungsverhältnis ändert. Der sich ergebende Ruckler heißt vornehm Eingriffswinkelwechselstoß, ein Wort, das sich für einen Rap-Song eignet. Zudem ist der Kontakt für einen gewissen Drehwinkel auf einen kleinen Bereich am korrigierten Rad konzentriert, bei einer gleichzeitig potenziell sehr großen Krümmung. Das kann zu Spannungsspitzen bei der Hertzschen Pressung führen und somit zur Grübchenbildung, Fressen, Verschleiß.

Nach all diesen unschönen Dingen stellt sich die Frage, warum man die schöne reine Evolvente überhaupt durch eine Kopfrücknahme kaputt machen sollte. Dazu kommen wir jetzt.

VERFORMUNGEN

In der Regel möchte man mit einer Stirnradstufe ja ein Drehmoment übertragen. Dieses Drehmoment führt zu Verformungen, unter anderem der Zähne in Form eines Verbiegens. Dieses hat zur Folge, dass die beiden Räder ein wenig gegeneinander verdreht sind und so der Kopf des getriebenen Rades etwas zu früh in Kontakt mit der treibenden Gegenflanke kommt. Nehmen wir nun vereinfachend an, dass der Kopf nicht modifiziert wurde (kein Radius am Kopf), dann ist klar, dass dieser verfrühte Eingriff so lange am Kopf des getriebenen Rades bleibt, bis er in den Bereich des theoretischen Eingriffs kommt, (rot markiert in **Bild 03**). Auf der getriebenen Seite ist der Kontakt also entlang des Kopfkreises. Aus Sicht des treibenden Rades bedeutet dies aber, dass der Kontakt oberhalb des Fußnutzkreises beginnt, sich am Profil nach unten bewegt bis zum theoretischen Eingriffsbeginn, um dann wieder am Profil nach oben Richtung Kopf zu wandern. Der Bereich oberhalb des Fußnutzkreises wird also zweimal durchfahren, wobei zu Beginn der Kopf des getriebenen Rades zunächst auf die Flanke stößt und dann nicht sauber abwältzt, sondern sich gewissermaßen über die Flanke kratzend nach unten bewegt. Das Phänomen wird unter Eintrittsstoß zusammengefasst und ist der Grund, warum man Kopfrücknahmen erfunden hat: Diese sollen den verfrühten Eingriff verhindern oder zumindest abmildern, indem so viel Material am Kopf entfernt wird, dass der erste Kontakt wieder im theoretischen Bereich liegt. Durch diese Maßnahme handelt man sich allerdings die oben beschriebenen Schwierigkeiten ein. Auch für die Kopfrücknahme gilt also, dass die Probleme mit ihr mal eine Lösung waren.

Bilder: Aufmacher: dTosh – stock.adobe.com, Sonstige: KISSsoft AG

www.kisssoft.com

Die Flanken stehen im Kontaktpunkt senkrecht auf der Eingriffslinie. Der Hebelarm, mit dem die Zahnnormalkraft in ein Drehmoment umzurechnen ist, entspricht also dem Radius des Grundkreises. Das Übersetzungsverhältnis ergibt sich damit als Quotient der Grundkreisradien, oder auch Durchmesser, was derselbe Wert ist: d_{b2}/d_{b1} . Der Winkel zwischen der Eingriffslinie und der Senkrechten auf der Verbindungslinie der beiden Rad-Mittelpunkte ist der Betriebseingriffswinkel.

PROFILMODIFIKATIONEN

Die ersten Komplikationen kommen mit Profilmodifikationen ins Spiel. Der Einfachheit halber betrachten wir nur eine lineare Kopfrücknahme. Für andere Modifikationen gilt Entsprechendes.

Eine lineare Kopfrücknahme entsteht durch einen „Knick“ im Bezugsprofil, das dadurch im Profilbereich also aus zwei gerade Strecken besteht. Das sich ergebende Zahnprofil knickt im Kopfbereich nach hinten, wobei der korrigierte Bereich wieder aus einer Evolvente besteht, die aber zu einem anderen Profilverhältnis gehört.

Wandert der Kontakt bei Abwälzen vom unkorrigierten in den korrigierten Bereich, ändert sich also der Eingriffswinkel, in **Bild 02** dargestellt mit den beiden grauen Geraden, welche die jeweiligen Eingriffsstrecken verlängern. Wie wir oben gesehen haben, bestimmt sich das Übersetzungsverhältnis aber aus dem Verhältnis der Grundkreisradien, wobei der eine Grundkreis sich soeben geändert hat: im Bereich der Korrektur haben wir also ein anderes Übersetzungsverhältnis!

Im Übergang zur Korrektur passiert noch etwas: Durch das „nach hinten Kippen“ der Flanke ändert sich in einem kleinen Bereich der Flanke die Normale. Der Kontakt bleibt an diesem Knick hängen, bis die Normale zur Tangente an den neuen