

§. 213.

Zahnreibung bei den Stirnrädern.

Die Reibung der Stirnradzähne hängt sehr wesentlich von der Verzahnungslinie ab und lässt sich aus Form, Ausdehnung und Lage der Eingriffkurve beurtheilen. Im Allgemeinen wächst die Reibung mit der Eingriffdauer ε . Wegen der Lage der Eingriffslinie führt ε einen Koeffizienten bei sich, welcher $= \frac{1}{2}$ ist, wenn, wie durchschnittlich bei unserer Radlinienverzahnung, die Eingriffsbogen gleichmässig zu beiden Seiten der Centrale vertheilt sind; er ist $= 1$, wenn wie bei manchen Verzahnungen, z. B. den Triebstockverzahnungen, die Eingriffslinie ganz auf einer Seite der Centrale liegt; er kann $= \frac{3}{4}$ gesetzt werden, wenn, wie bei der Evolventenverzahnung, die Vertheilung der Eingriffslinie die Mitte zwischen den beiden genannten Anordnungen hält. Von den Zähnezahlen hängt die Zahnreibung in starkem Maasse ab, indem sie proportional deren harmonischem Mittel ist, mithin mit wachsenden Zähnezahlen rasch abnimmt.

Beim Reibungskoeffizienten f und den Zähnezahlen z und z_1 hat man für den Arbeitsverlust p_r durch die Zahnreibung:

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) bei der Radlinienverzahnung:} \\ p_r = \pi f \left(\frac{1}{z} \pm \frac{1}{z_1} \right) \frac{\varepsilon}{2} \cdot \cdot \cdot \cdot \\ \text{b) bei der Evolventenverzahnung:} \\ p_r = \pi f \left(\frac{1}{z} \pm \frac{1}{z_1} \right)^{3/4} \varepsilon \cdot \cdot \cdot \cdot \\ \text{c) bei der Triebstockverzahnung*):} \\ p_r = \pi f \left(\frac{1}{z} \pm \frac{1}{z_1} \right) \varepsilon \cdot \cdot \cdot \cdot \end{array} \right\} \cdot \cdot \cdot \cdot (191)$$

Der Koeffizient f selbst ist auch bei gut eingefetteten Rädern nicht klein, da der Flächendruck in der Regel hoch ist; meistens passend ist $f = 0,15$, bei neuen und trocken gehenden Rädern indessen steigt f auf 0,20 bis 0,25 und höher. Das Minuszeichen in der Formel wird gebraucht, wenn ein Hohlrad (z_1) im Paare vorkommt.

*) Annähernd.

1. *Beispiel.* Bei einem Paare siebenzähliger Räder mit Radlinienverzahnung ist $\varepsilon = 1,225$. Bei $f = 0,15$ hat man nach (191 a) für den Verlust durch Zahnreibung: $p_r = 3,14 \cdot 0,15 \cdot 2 \cdot 1,225 : 2 \cdot 7 = 0,08243 \sim 8\frac{1}{4}$ Proz.

2. *Beispiel.* Radlinienverzahnung. $\mathfrak{Z} = \mathfrak{Z}_1 = 40$. Hier ist $\varepsilon = 1,44$, und kommt: $p_r = 3,14 \cdot 0,15 \cdot 2 \cdot 1,44 : 2 \cdot 40 = 0,016995 \sim 1,7$ Proz.

3. *Beispiel.* Radlinienverzahnung. $\mathfrak{Z} = 7$, $\mathfrak{Z}_1 = -60$ (Hohlrad). Hier ist $\varepsilon = 1,40$ und demnach $p_r = 3,14 \cdot 0,15 \cdot 0,7 (\frac{1}{7} - \frac{1}{60}) \sim 4,2$ Proz.

4. *Beispiel.* Radlinienverzahnung. $\mathfrak{Z} = 7$, $\mathfrak{Z}_1 = \infty$ (Zahnstange). Hier ist $\varepsilon = 1,37$, und somit $p_r = 3,14 \cdot 0,15 \cdot 1,37 : 2 (\frac{1}{7} + 0) \sim 4,6$ Proz.

5. *Beispiel.* Triebstockverzahnung $\mathfrak{Z} = 6$, $\mathfrak{Z}_1 = 40$. Hier sei, wie in Fig. 583 durch die Konstruktion bewirkt, $\varepsilon = 1\frac{1}{6}$. Es folgt nach (189 c): $p_r = 3,14 \cdot 0,15 \cdot 1\frac{1}{6} : (\frac{5}{24}) \sim 2,6$ Proz.

6. *Beispiel.* Evolventenverzahnung. $\mathfrak{Z} = \mathfrak{Z}_1 = 40$. Hier ist $\varepsilon = 1,92$. Dies gibt nach (180 c): $p_r = 3,14 \cdot 0,15 \cdot 2 \cdot 0,75 \cdot 1,92 : 40 = 0,0339 \sim 3,4$ Proz., d. i. zweimal soviel als im 2. Beispiel.

Man sieht also, dass von den behandelten die Radlinienverzahnung die kleinste Reibung hat, die Evolventenverzahnung in der Mitte, die Triebstockverzahnung am ungünstigsten steht.

Die Abnützung der Zähne hängt ausser vom Reibungskoeffizienten vom Drucke der Zahnflanken aufeinander und von dem Verhältniss der übereinander hingleitenden Profiltheile ab. Sie ist deshalb bei konstantem Zahndrucke nicht ohne weiteres konstant, und es ist ein grosser Irrthum, wenn man, wie häufig geschieht, annimmt, dass bei der Evolventenverzahnung die Abnützung die Zahnform nicht ändere. Im Gegentheil findet gerade bei dieser Verzahnung verhältnissmässig die stärkste Formänderung durch die Abnützung statt, indem hier das geriebene Flankenstück innerhalb des Theilkreises gegen das darauf reibende des anderen Zahnkopfes besonders klein ist. Man kann die Richtigkeit des Gesagten in der Praxis vielfach beobachten, wo das kleinere Rad in einem mit Evolventenverzahnung versehenen Paare oft tiefe Kerben dicht unter dem Theilkreis zeigt. Die Radlinienverzahnung ist auch in diesem Punkte die günstigere.

Schliesslich sei noch bemerkt, dass man die oben berechneten Reibungsverluste auch geometrisch auffinden kann, und zwar wie folgt. Man bilde die Differenzen der zusammenarbeitenden Profiltheile, dividire dieselben durch die zugehörigen Sehnen der Eingrifflinienbogen, multiplizire sie mit dem Verhältniss des zugehörigen Eingriffbogens zur ganzen Eingriffstrecke, und multiplizire die Summe der erhaltenen Quotienten mit dem Reibungskoeffizienten. Das Resultat ist der Verlust p_r . Die genannte Sehne ist bei der Evolventenverzahnung die Eingriff-

strecke selbst. Die Regel liefert p_r auch für die Punktverzahnungen; sie gibt dem Zeichner das Mittel an die Hand, beim Auftragen der Verzahnung deren Reibungsverlust gleichsam mit dem Zirkel abzustechen.

§. 214.

Vor- und Nachteile der behandelten Verzahnungsmethoden.

Jede von den beiden Satzräderverzahnungen hat ihre Vorzüge und ihre Nachteile.

Radlinienverzahnung. Sie gewährt den grossen Vortheil, dass man bei ihr für gleichgrosse Räder mit der Zähnezahlszahl bis auf 7 herabgehen kann, während bei der Evolventenverzahnung die kleinsten gleichgrossen Räder 14 Zähne haben müssen, man auch die Zähnezahlszahl bei der Evolventenverzahnung nicht unter 11 nehmen darf. Der Reibungsverlust ist bei dieser Verzahnung verhältnissmässig sehr klein, die Abnützung wenig nachtheilig für die Zahnform. Als ein kleiner Nachtheil ist zu betrachten, dass die Zahnprofile eine S-förmige Krümmung haben, was die Anfertigung erschwert; auch können zusammenarbeitende Räder nicht viel auseinandergerückt werden, ohne den genügend richtigen Eingriff einzubüssen.

Evolventenverzahnung. Vortheile sind: vor allem die einfache Form der Zähne und sodann die Eigenschaft, dass man die Räder auseinanderdrücken darf, ohne die Richtigkeit des Eingriffes zu beeinträchtigen. Diesen Vorzügen stellt sich aber der oben besprochene Nachtheil entgegen, vermöge dessen bei kleinen Zähnezahlen der Zahnkopf nach Beendigung des richtigen Eingriffstückes eine solche Bahn gegen den ihn angreifenden Zahn oder genauer gegen dessen radialen Fuss beschreibt, dass er ihm eine unrichtige Geschwindigkeit ertheilt. Der Uebelstand wird ausser durch die oben angegebenen Mittel bei fertigen Rädern gehoben, wenn man die betreffenden Räder auseinanderdrückt, und zwar so weit, dass bei beiden Rädern die Zähne wenigstens gleichzeitig aus der Eingriffslinie treten. Somit trägt die Verzahnung das Heilmittel für ihren Fehler zwar in sich selbst; allein für starke Kraftübertragung sind doch, namentlich wo Stösse häufig