

# KALTWALZEN VON ZAHNRÄDERN MIT KLEINEM MODUL

Von

D. MOLNÁR

Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 19. Oktober, 1966)

Vorgelegt von Prof. Dr. I. Vörös

Die Massenproduktion von Zahnrädern tendiert von der spanabhebenden zur wirtschaftlicheren spanlosen Formung durch Profilierung. Das Abwälzverfahren kann sowohl bei der Kalt- wie auch bei der Warmformung des Werkstoffes angewendet werden. Auf Grund von Versuchs- und Betriebserfahrungen der letzteren Jahre kommt in den industriell entwickelten Ländern immer mehr die profilierende bildsame Formung des Werkstoffes in kaltem Zustande in den Vordergrund, da sie ein billigeres und genaueres Endprodukt liefert als die zum selben Zwecke angewendete Warmverformung.

Ein bekannter Vorteil der Kaltverformung besteht in der hervorragenden Oberflächengüte und der besseren Verschleißfestigkeit infolge der Aufhärtung der Werkstoffschichten in der Nähe der geformten Oberfläche.

In jüngster Zeit wurden mehrere neuartige Verfahren zur Herstellung von Zahnrädern durch Kaltverformung ausgearbeitet. Von diesen werden die folgenden auch in der Praxis erfolgreich angewendet:

Walzen mit Zahnstange [1].\*

Walzen durch zylindrische Formungswerkzeuge [2].

Kaltverformung der Zahnräder durch Ziehen durch ein profiliertes Ziehloch [3].

Bearbeitung durch Planetenwalzen [1], [4].

Das Wesen des im Titel der gegenwärtigen Arbeit erwähnten Verfahrens besteht darin, daß die zu verzahnende Werkstoffstange durch eine Vorrichtung hindurchgezogen wird, welche die den Zahnücken des gewünschten Zahnrades entsprechenden Profilwalzen enthält.

Die Befestigung der Walzen in der notwendigen Lage und ihre Einstellung in der erforderlichen Tiefe wird von der Vorrichtung sichergestellt.

Von der durch die Vorrichtung durchgezogenen Stange können Zahnräder beliebiger Breite abgestochen werden.

Abb. 1 veranschaulicht die Vorrichtung mit einigen Zubehörteilen und eine Probestange vor bzw. nach der Verzahnung. In der Vorrichtung befinden sich die U-förmigen Fassungen  $f$ , in welche die Walzen  $g$  gelagert sind.

\* Die Ziffern in den Klammern weisen auf die benützte Literatur hin.

Die Walzen sind um das Werkstück in einer Anzahl einzubauen, die der Zahnstückzahl des herzustellenden Zahnrades entspricht.

Abb. 2 zeigt die Schnittzeichnung der Vorrichtung. Mittels der durch die Keile  $\epsilon$  laufenden Schraubenspindel können die einzelnen Walzen radial gestellt werden.\*

Die zu verzahnende Stange ist je nach dem Maß der Verformung und der Kaltverformungseigenschaften des Werkstoffes einmal oder mehrere Male durch die Vorrichtung durchzuziehen. Vor dem Durchziehen werden die Walzen

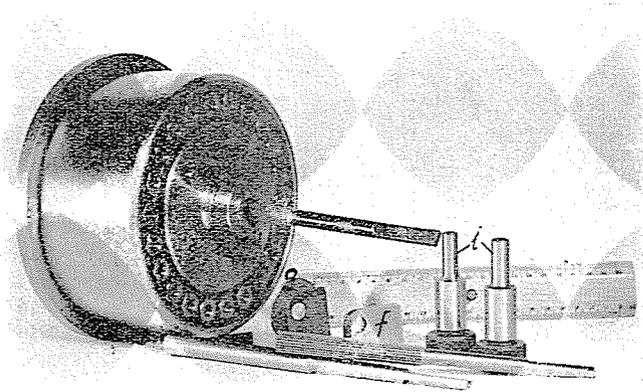


Abb. 1. Die Walzvorrichtung 120×80

mit den zwischen sie eingelegten Zylinderlehren  $i$  eingestellt, deren Durchmesser dem Grad der Verformung entspricht (Abb. 1). Die eingestellte Lage wird mit den auf den Schraubenspindeln befindlichen Muttern fixiert.

Die Vorrichtung muß mit größter Genauigkeit und Sorgfalt hergestellt werden, da sämtliche in den Profilen der Walzen und in der Teilung der Vorrichtung vorhandene Fehler natürlich auch am Werkstück erscheinen werden. Zur Sicherstellung der Teilungsgenauigkeit dient die Zwischenlage  $k$  (Abb. 2), deren unterer Teil zwischen die Walzen hineinreicht und sie seitlich, in der Nähe der aus den Fassungen herausragenden und die Verformung durchführenden Walzenteile abstützt.

Das Walzen der Zahnräder wird im allgemeinen in mehreren Stufen durchgeführt; zur Schonung der kostspieligeren Profilwalzen beginnt die Ver-

\* Die Grundidee der Vorrichtung stammt von dem inzwischen verstorbenen Peter BEHEJNIK, ehemaligem Werkzeugschlosser der Telephonfabrik. Im Auftrage des Hauptausschusses für Maschinenbau der Ung. Akademie der Wissenschaften wurde in die praktische Verwirklichung der Idee von Behejnik auch der Lehrstuhl für Maschinenelemente an der Technischen Universität Budapest eingeschaltet.

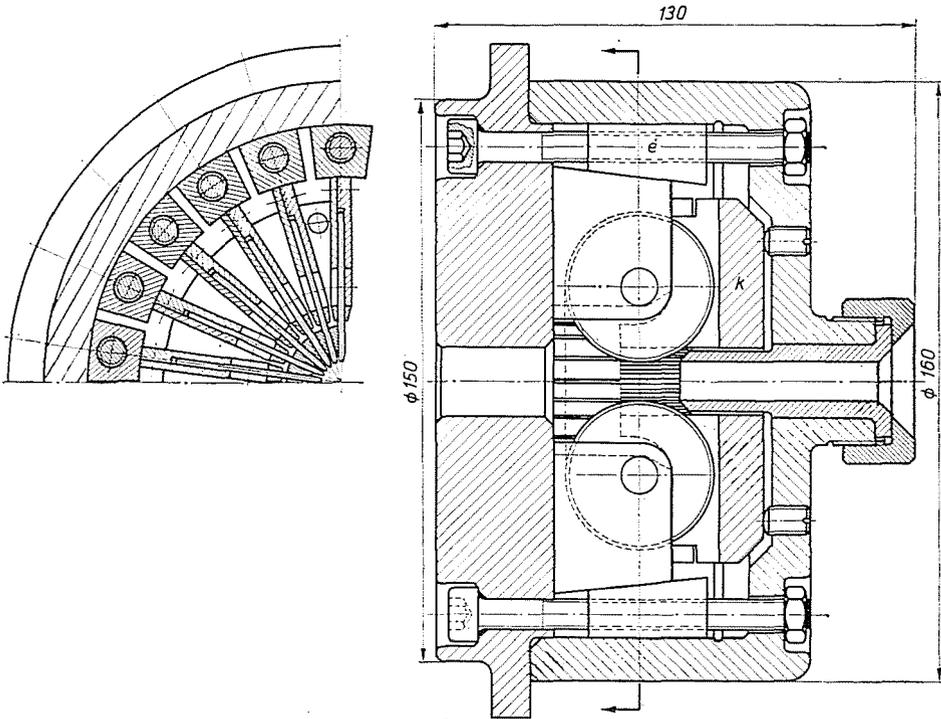


Abb. 2. Schnitt durch die Walzvorrichtung

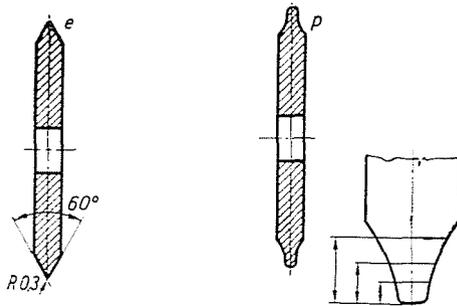


Abb. 3. Die Formwalzen

formung mit den in Abb. 3 dargestellten Vorwalzen und erst in der letzten Stufe werden die Profilwalzen  $p$  angewendet.

Mit der in Abb. 2 dargestellten Verzahnungsvorrichtung wurden versuchsweise Normzahnäder mit einer Zähnezahl  $z = 22$  und dem Modul  $m = 0,5$  mm sowie Zahnäder mit  $z = 11$ ,  $m = 0,4$  und einem Profilverschiebungsfaktor  $x = 0,511$  gewalzt.

Die Profile der Walzen wurden vorher in 200facher bzw. 250facher Vergrößerung mit dem vom Lehrstuhl gebauten, nach dem Prinzip des Abwälzverfahrens arbeitenden Zahnformzeichengerät gezeichnet. Auf dieser Grundlage wurden die zur Herstellung der Profilwalzen nötigen Maße auf die in Abb. 3 gezeigte Weise im Koordinatensystem angegeben. Diesen Maßen entsprechend wurden die Profilwalzen an einer optischen Pantograph-Schleifmaschine ausgeführt.

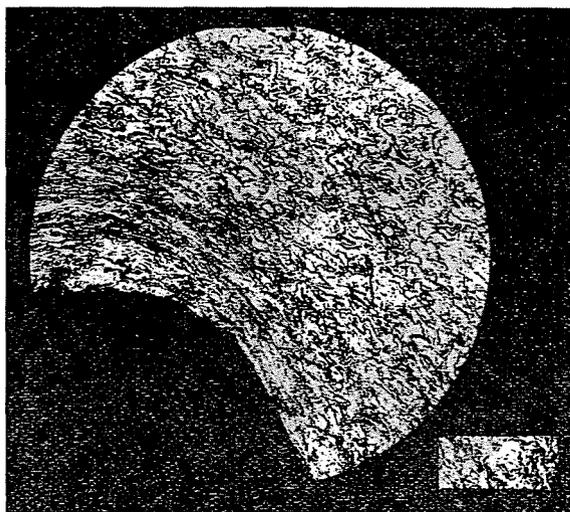


Abb. 4. Faseranordnung im gewalzten Zahnradstoff in der Zahnprofilzone (150fache Vergrößerung)  $125 \times 90$

Die formgebenden Walzen sind einer erheblichen Beanspruchung ausgesetzt, weshalb sie aus vergütetem Edelstahl guter Qualität gefertigt sein müssen. Für das entsprechende Schmieren der an der Verformung teilnehmenden Walzenprofile und -wellen ist Sorge zu tragen.

Bei den durch Walzen hergestellten Zahnradern bekommt man glatte und im Vergleich zum Ausgangswerkstoff bedeutend härtere Zahnoberflächen, die dem Verschleiß gut widerstehen. Ein weiterer Vorteil ist, daß die Faseranordnung des Werkstoffes den Zahnflanken folgt, d. h. nicht unterbrochen ist, wie bei den durch Fräsen hergestellten Zahnradern. Die Faseranordnung ist in Abb. 4 gut sichtbar, die den Zahnfuß eines gewalzten Zahnrades mit dem Modul  $m = 0,5$  mm in 150facher Vergrößerung darstellt.

Bezüglich der Genauigkeit der gewalzten Zahnradern führten wir mit einem Profilprojektor Messungen auf die Weise durch, daß die von den verzahnten Stangen abgestochenen etwa 1 mm breiten Zahnradern in einer entsprechenden Vergrößerung projiziert und die Bilder mit den Zahnradzeichnungen verglichen

wurden welche wir mit den zu diesem Zweck hergestellten theoretischen Profilen gezeichnet hatten.

Die Modellradzeichnung wurde mit dem erwähnten Zahnformzeichengerät auf Grund eines theoretischen, zum Modulwert  $m = 100 \text{ mm}$  gehörenden Profils ausgeführt, wobei die einzelnen Profilpunkte im Koordinatensystem

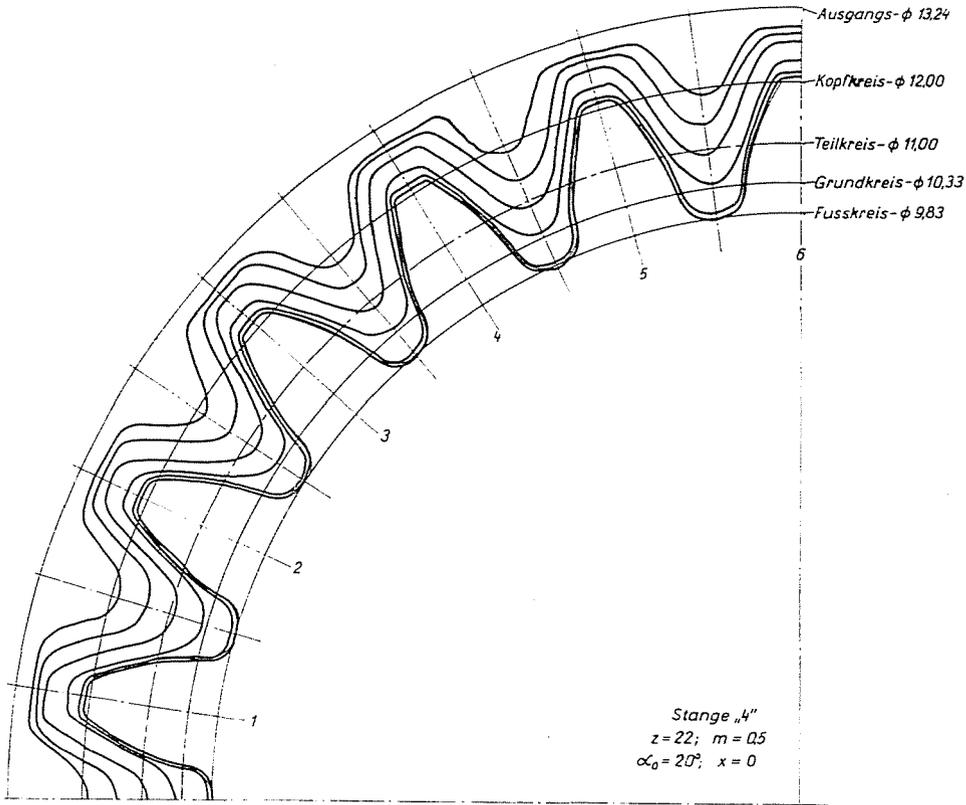


Abb. 5. Zahnprofile des gewalzten Zahnrades (Zähnezahl  $z = 22$ , Modul  $m = 0,5 \text{ mm}$ )

bestimmt und das theoretische Profil im erforderlichen Maßstab umgezeichnet wurde.

Abb. 5 zeigt die Bilder der Zahnprofile einer gewalzten Stange mit der Zähnezahl  $z = 22$  und dem Modul  $m = 0,5$  neben den dünn gezeichneten theoretischen Profilen.

Ein Vergleich der am obigen Zahnrad gemessenen Fehler mit den Toleranzwerten der verschiedenen Genauigkeitsgrade der Norm MSz 10 762 T führte zu folgenden Ergebnissen:

Summenteilungsfehler:

$$\Delta \Sigma t = \Delta \Sigma t_{\text{pos}} + (\Delta \Sigma t_{\text{neg}}) = 50 \mu\text{m}.$$

Die Toleranz des 9. Genauigkeitsgrades:  $T \Sigma t = 55 \mu\text{m}$ .

Die Schwankung der Mehrzahnweite:

$$\Delta W = W_{\max} - W_{\min} = 20 \mu\text{m}.$$

Die Toleranz des 10. Genauigkeitsgrades:  $TW = 25 \mu\text{m}$ .

Kreisteilungsfehler:

$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min} = 32 \mu\text{m}.$$

Die Toleranz des 9. Genauigkeitsgrades:  $Tt = 32 \mu\text{m}$ .

Grundteilungsfehler:

$$\Delta t_a = t_{a \text{ gemessen}} - t_{a \text{ berechnet}} = 30 \mu\text{m}.$$

Die Toleranz des 10. Genauigkeitsgrades:  $Tt_a = \pm 40 \mu\text{m}$ .

Profilfehler:

$$\Delta p_{\max} = 36 \mu\text{m}.$$

Die Toleranz des 9. Genauigkeitsgrades:  $T_p = \pm 36 \mu\text{m}$ .

Wegen des Mangels an Geräten konnten wir nicht sämtliche in der Norm vorgeschriebene Fehlerarten feststellen, obige Auswertung läßt aber darauf schließen, daß die Genauigkeit der gewalzten Zahnräder im Vergleich zu den gefrästen Zahnrädern praktisch ausreichend ist.

Hierzu muß aber bemerkt werden, daß obige Genauigkeit durch die Erfahrungen bei der Anfertigung der Werkzeuge sowie beim Walzen der Zahnräder wesentlich gesteigert werden kann. Die Erhöhung der Genauigkeit kann teilweise innerhalb der Vorrichtung durch eine genauere Ausführung der Profile, der Teilungsgenauigkeit und der Walzstützen, teilweise aber durch eine genauere Einstellung der Formwalzen und durch die Verbesserung der Verformungsmethoden erreicht werden. Es ist z. B. zweckmäßig, die Verformung mit einem kleinen, berührungsartigen Eingriff anzufangen und die letzte Formungsstufe bei sehr sorgfältiger Einstellung der Tiefe der Walzen als einen glättenden Griff einzuschalten.

Als ein wichtiger Faktor muß auch der Umstand in Betracht gezogen werden, daß unsere bei der Verformung gebrauchten Walzen infolge der ungenügenden Erfahrungen ziemlich ungenau angefertigt wurden. Eine Messung der in der letzten Stufe gebrauchten Profilwalzen mit einem Zeißschen Universal-Meßmikroskop erwies, daß die Abweichung von den Zahnevolventen bei mehreren Walzen sogar einen Wert von 20–25  $\mu\text{m}$  erreichte.

Diese beachtlichen Fehler der Profilwalzen erschienen natürlich in gesteigertem Maße bei den mit ihnen hergestellten Zahnrädern.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit kann folgender Vergleich gemacht werden:

Bearbeitungskosten der durch Fräsen an einer Mikro-Verzahnungs-  
maschine hergestellten ZÄhräder:

Herstellungszeit	5,38 Stunden/100 St
Verrechnet mit einem durchschn.	
Stundenlohn von Ft 12,50	Ft 67,25/100 St
Mit 350%-igen Regiekosten	Ft 302,63/100 St

Beim Walzen kann die Ziehgeschwindigkeit vorsichtig mit 1 m/min berechnet werden. Ist die Breite der abzustechnenden Räder 11 mm, mit der Abstechungszugabe 16 mm, so braucht man für 100 Räder eine 1,6 m lange verzahnte Stange. Wenn die Verhältnisse der Massenproduktion betrachtet werden, beträgt die Zeit eines einmaligen Ziehens bei 100 Rädern 1,6 Minuten. Beim Ziehen in 6 Stufen gestalten sich die Kosten der Zahnverformung folgendermaßen:

Herstellungszeit	ca. 10 min/100 St
Verrechnet mit einem durchschn.	
Stundenlohn von Ft 12,50	Ft 2,08/100 St
Mit 700% Regiekosten	Ft 16,64/100 St

Aus einem Vergleich der Ergebnisse kann man feststellen, daß die Kosten der gewalzten ZÄhräder nur etwa 5,5% der Kosten des FräSENS ausmachen, d. h. durch Walzen können die Verzahnungskosten fast auf ein Zwanzigstel vermindert werden. Die Kosten des Drehens und die zur Einstellung der Verzahnungsmaschine bzw. der Walzvorrichtung erforderlichen Zeiten können bei beiden Verfahren gleich gesetzt werden. (Die Investitions- und Amortisationskosten der Verzahnungsmaschine bzw. der Walzvorrichtung wurden beim Vergleich außer acht gelassen.)

Auf dieser Grundlage wäre es zweckmäßig, bei den ZÄhrädern mit kleinem Modul auf die Herstellung durch Walzen überzugehen, da solche ZÄhräder auf dem Gebiete der Feinmechanik und Instrumentenherstellung, in den verschiedenen Geräten, Konstruktionen, Spielwaren usw. in sehr großen Mengen gebraucht werden.

Mit der in den Abb. 1 und 2 dargestellten, zur Einfassung von 22 Formwalzen geeigneten Vorrichtung wurden versuchsweise

NormzÄhräder mit einer Zähnezahl  $z = 22$ , einem Modul  $m = 0,5$  mm, einem Eingriffswinkel  $\alpha_0 = 20^\circ$  und einem Kopfspielfaktor  $c'_0 = 1/6$  sowie

ZÄhräder mit Evolventenprofil,  $z = 11$ ,  $m = 0,5$ ,  $\alpha_0 = 20^\circ$ ,  $c'_0 = 0,2$  und mit einem positiven Profilverschiebungsfaktor  $x = 0,511$

hergestellt. Die zur Verformung erforderliche Zugkraft konnten wir während des Walzvorganges durch einen in die Vorrichtung eingebauten Kraftmesser registrieren.

Die Vorbereitungs- und Ausführungsmomente des Walzens der Zahnräder wurden folgendermaßen vorgenommen:

1. Bestimmung der geometrischen Maße der herzustellenden Zahnräder.
2. Zeichnen der theoretischen Zahnprofile.
3. Ausführung der zu den Vor- und Profilwalzen erforderlichen Profilzeichnungen.
4. Bestimmung der Ziehstufen und der zur Einstellung der Walzen nötigen Kaliberlehren.
5. Durchziehen der zu verformenden Probestangen zwischen den zu den einzelnen Stufen eingestellten Walzen.
6. Messung der geometrischen Formen des gewalzten Werkstoffes und der Festigkeitszunahme vor bzw. nach den einzelnen Formungsstufen. Kraftmessung während des Ziehvorganges.
7. Abstechen der Zahnräder in der erforderlichen Breite aus der profilierten Probestange.

Zu unseren Versuchen brauchten wir Kohlenstoffstahl verschiedener Qualität. Die Werkstoffqualitäten wurden durch vorherige Härteprüfungen abgestimmt und die einzelnen Probestangen so gewählt, daß ihre Bruchfestigkeit beim Ausgang zwischen den Werten 35 und 70 kp/mm<sup>2</sup> lag. Aus den durchgeführten Versuchen sind die  $\sigma$ -Kennwerte in Verbindung mit der Verformung von 5 Probestangen (gezeichnet von »1« bis »5«) in einer Tabelle zusammengefaßt. Die in der Tabelle registrierten Festigkeitswerte sind Durchschnittswerte von mehreren Messungen den ganzen Querschnitt entlang. Die Änderung der Bruchfestigkeitswerte, die sich bei den einzelnen Probestangen ergaben, ist in ihrer Abhängigkeit von der Querschnittabnahme in Abb. 6 dargestellt. Zwecks Vergleichs wurden auch die Änderungen der Bruchfestigkeit des kaltgewalzten kohlenstoffarmen Stahls in das Diagramm eingezeichnet.

Von den in 6 Stufen geformten Probestangen »1« bis »4« wurde bei den Stangen »1« und »2« nach der vierten Verformungsstufe ein Weichglühen vorgenommen, dessen Wirkung im Diagramm gut zu sehen ist.

Bei den dem Weichglühen ausgesetzten Probestangen erhöhten sich die Festigkeitswerte nicht zu einem solchen Endwert, wie bei den Stangen »3« und »4« von annähernd identischer Ausgangsfestigkeit. Gemäß unseren Erfahrungen ergab das eingefügte Weichglühen keine bedeutende Abnahme der zur Verformung erforderlichen Leistung; es kann also zur Minderung der Kosten aus dem Herstellungsprozeß weggelassen werden.

Gemäß den Werten des Diagramms ist die Aufhärtung des Werkstoffes während der Verformung beträchtlich, weshalb es ausreichend ist, Werkstoffe mit einer Bruchfestigkeit von 30—40 kp/mm<sup>2</sup> zu walzen, deren Festigkeit nach der Verformung am Profil und besonders im Zahnfuß 70—90 kp/mm<sup>2</sup>, d. h. die Bruchfestigkeit der Werkstoffe besserer Qualität erreichen wird.

Die Festigkeitsprüfungen ergaben, daß die Härte des zu verformenden Werkstoffes auch während der Vorbereitung durch Spanabheben um einen gewissen Wert zunimmt. Abb. 7 zeigt an bestimmten Stellen des Querschnittes

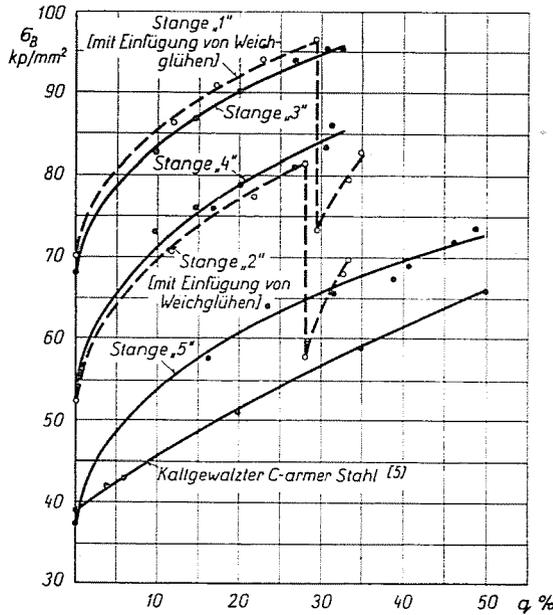


Abb. 6. Änderung der Bruchfestigkeit ( $\sigma_B$ ) in Abhängigkeit von der spezifischen Querschnitts-abnahme ( $q\%$ )

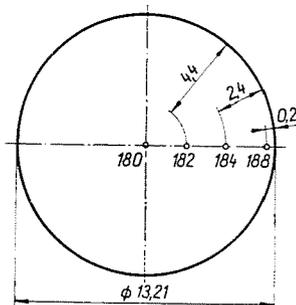


Abb. 7. Härteverteilung im Querschnitt einer gefrästen Stange

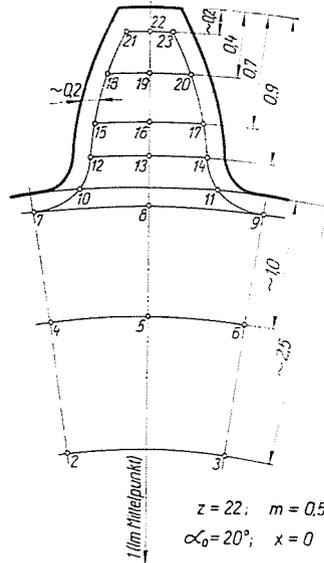


Abb. 8. Härteverteilung im Querschnitt eines gewalzten Zahnrades

der Probestange »3« die Werte  $H_v$ /kp/mm<sup>2</sup> nach der spanabhebenden Formung zum Ausgangsdurchmesser.

Abb. 8 zeigt die Meßpunkte der Festigkeitsmessungen in den Querschnitten der Probestangen nach der letzten Verformungsstufe. Die den einzelnen Meßpunkten zugehörigen Festigkeitswerte sind in Tabelle 1 enthalten.

Tabelle 1

Stelle d. Messung	$H_v$ kp/mm <sup>2</sup> -Werte		
	Stangen		
	»1«	»3«	»4«
1	210	245	195
2	222	248	226
3	220	248	225
4	230	266	245
5	226	250	237
6	232	270	245
7	257	306	266
8	240	257	241
9	257	306	264
10	253	296	258
11	253	296	256
12	245	280	253
13	234	262	249
14	245	280	252
15	241	270	260
16	230	266	253
17	241	270	259
18	230	276	266
19	226	270	262
20	230	278	265
21	226	280	270
22	223	275	266
23	226	280	272

Der Stoff der nach zwischengelegtem Weichglühen geformten Stange »1« ist am Zahnfuß am härtesten, während er gegen die Zahnspitzen hin weniger hart ist.

Bei den ohne Weichglühen gewalzten Probestangen »3« und »4« ist der Werkstoff am Zahnfußprofil am härtesten, er ist auch in den Zahnspitzen

beträchtlich hart, dagegen ist er in der Mitte der Zahnflanke weniger hart. Der innere Stoff der Zähne härtet sich im allgemeinen gegen die Zahnspitzen hin auf.

Die gewünschte Formung des Werkstoffes kann in einem oder in mehreren Schritten bzw. Stufen erfolgen. Vom Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit aus ist es zweckmäßig, die Zahl der Stufen auf ein Minimum zu mindern, das läßt sich aber wegen anderer Faktoren im Zusammenhang mit der Verformung (ausgedehnte Formänderung, Härte des Werkstoffes, die zu erreichende Genauigkeit, usw.) oft schwer verwirklichen.

Da es unmöglich ist, im Laufe des Walzvorganges sämtliche Änderungen (z. B. die Änderung des Verformungswiderstandes, die Änderung des Reibungsfaktors an den geformten Oberflächen bzw. an den Achsen, die sich aus der Inhomogenität des Werkstoffes ergebenden Unterschiede usw.) genau zu verfolgen, haben wir zur Vermeidung der allzu komplizierten Zusammenhänge in unseren theoretischen Untersuchungen stellenweise Vereinfachungen gemacht.

Unser Ziel war unter anderen

die Zugkraft,

die zur Verformung erforderliche Leistung,

die auf die Verformungswerkzeuge wirkenden Kräfte,

den Durchmesser des Stangenstoffes vor dem Walzen,

d. h. den Ausgangsdurchmesser festzustellen, welcher letzterer im Laufe des Walzvorganges so viel abnimmt, daß man als Außendurchmesser einen Wert erhält, der dem Kopfkreisdurchmesser des gewalzten Zahnrades gleich ist.

Wegen Raummangels befassen wir uns im folgenden nur mit den theoretischen Feststellungen zu dem in einer Stufe durchgeführten profilgebenden Walzen.

### Bestimmung der Zugkraft und des Leistungsbedarfes

Das Profil der Formwalzen, die bei der Herstellung von Zahnrädern zur Verformung der Werkstoffstange dienen, ist in Übereinstimmung mit der Zahnücke des Zahnrades ausgebildet. Im allgemeinen handelt es sich um ein Evolventenprofil. Um unsere Untersuchungen zu vereinfachen, rechnen wir anstatt des Evolventen-Walzprofils mit dem in Abb. 9 dargestellten Profil.

Aus dem bekannten Walzprofil und dem zu verformenden Querschnitt  $f_1$  kann durch Flächenausgleich gemäß Abb. 9 ein mittlerer Walzhalfmesser  $r_m$  bestimmt werden.

Bei der Verformung mit Vielwalzen hat der Werkstoff wegen der auftretenden Kraftwirkungen keine Möglichkeit zum seitlichen Ausweichen, es muß also mit einem Voreilen des Stoffes gerechnet werden. Infolgedessen ist die Geschwindigkeit des Stoffes beim Heraustreten zwischen den Walzen nicht

identisch mit deren mittlerer Umlaufgeschwindigkeit  $v_m$ , die aus dem mittleren Walzradius  $r_m$  berechnet werden kann.

Wenn man die elastische bzw. die bleibende Dehnung des gezogenen Abschnittes zwischen dem Querschnitt des aus den Walzen heraustretenden Werkstoffes und dem Angriffsquerschnitt der Zugkraft vernachlässigt, kann die Ziehgeschwindigkeit  $v_h$  der Geschwindigkeit des aus den Walzen heraustretenden Werkstoffes gleich gesetzt werden.

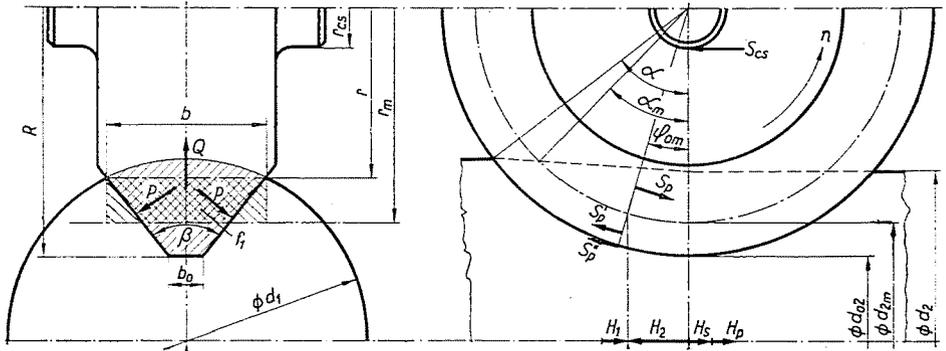


Abb. 9. Walze mit vereinfachtem Profil während des Walzvorganges

Da die Geschwindigkeit  $v_h$  der Zugkraft von der mittleren Umfangsgeschwindigkeit  $v_m$  der Walzen abweicht, werden bei der Bestimmung der Zugkraft

- der Leistungsbedarf der reinen Umformung,
- der Reibungsverlust zwischen den Flächen der Walzen und des zu verformenden Stoffes und
- der Reibungsverlust an den Wellen der sich frei drehenden Walzen gesondert berechnet.

Durch Summierung dieser Größen erhält man die Leistung der Zugkraft, aus welcher die zu einer gegebenen oder angenommenen Ziehgeschwindigkeit  $v_h$  erforderliche Zugkraft  $H$  bestimmt werden kann.

Der Leistungsbedarf der reinen Umformung in  $PS$  ist:

$$N_a \cong \frac{k_m \cdot r_m \cdot n}{716,2} z \cdot f_1,$$

worin

- $k_m$  den mittleren Verformungswiderstand,
- $r_m$  den mittleren Radius der Walzen,
- $n$  die Drehzahl/min der sich frei drehenden Walzen,
- $z$  die Zahl der Zähne (bzw. Zahnücken) und
- $f_1$  den durch je eine Walze zu verformenden Querschnitt bedeutet.

Der Mittelwert der infolge des Stoffvoreilens auftretenden relativen Rutschungen schreibt sich zu

$$v'_{r_m} \cong \frac{r_m \cdot n}{2 \cdot 9,55} \left( 1 - \frac{F_2}{F_1} \frac{1}{\cos \alpha_m} \right),$$

wo  $F_1$  den Querschnitt vor der Verformung,  $F_2$  den Querschnitt nach der Verformung und  $\alpha_m$  den mittleren Einspannwinkel bezeichnen. Der letztere errechnet sich aus dem Zusammenhang

$$\sin \frac{\alpha_m}{2} \cong \frac{l_{dm}}{2r_m}.$$

Die dem mittleren Einspannwinkel  $\alpha_m$  zugehörige Einspannbogenlänge  $l_{dm}$  ist

$$l_{dm} \cong \sqrt{2r_m \frac{f_1}{b}},$$

wo  $b$  die Breite der gemäß Abb. 9 ausgeglichenen Fläche bezeichnet.

Der mittlere Wert der relativen Rutschungen, die sich aus den Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den einzelnen Punkten an den Flankenflächen der Formwalzen ergeben, ist

$$v''_{r_m} \cong \frac{v_2 - v_1}{2} \cong (R - r) \frac{\pi \cdot n}{2 \cdot 30}.$$

An der Kopfzone, auf einem  $b_0$  breiten Abschnitt gemäß Abb. 9 ist der relative Rutschwert

$$v'''_r \cong (R - r_m) \frac{\pi \cdot n}{30}.$$

Die auf die Flankenfläche der mit dem Winkel  $\beta$  gekennzeichneten Walze senkrecht wirkende Kraft ist

$$P \cong k_m \cdot l_{dm} \frac{R - r}{\cos \frac{\beta}{2}}.$$

Die auf den  $b_0$  breiten Kopfteil wirkende Kraft ist

$$Q_{b_0} \cong k_m \cdot b_0 R \cdot \alpha \frac{\pi}{180}.$$

Der infolge der relativen Rutschungen der Berührungsflächen der Walzen an dem zu verformenden Stoff auftretende Reibungsverlust in  $PS$  beträgt

$$N_F \cong \frac{z}{75} \cdot \mu [2P(v'_{r_m} + v''_{r_m}) + Q_{b_0} v'''_r]$$

und mit den Teilwerten

$$N_F \cong \frac{z \cdot k_m \cdot l_{dm} \cdot n (R - r)}{716,2 \cos \beta/2} \mu \left[ r_m \left( 1 - \frac{F_2}{F_1} \frac{1}{\cos \alpha_m} \right) + (R - r) \right] + \\ + \frac{(R - r_m)n}{716,2} \mu \cdot z \cdot k_m \cdot b_0 R \alpha \frac{\pi}{180}.$$

Die auf die Walzenachsen senkrecht wirkende Kraft ist

$$Q = k_m \cdot b \cdot l_{dm}.$$

Der Leistungsbedarf der bei den Lagerungen der Walzen auftretenden Reibungsverluste in  $PS$  ist

$$N_{cs} \cong \frac{z \cdot \mu_{cs} \cdot r_{cs} \cdot n}{716,2} Q = \frac{z \cdot \mu_{cs} \cdot r_{cs} \cdot n}{716,2} k_m \cdot b \cdot l_{dm}.$$

Durch Summierung der Teilergebnisse erhält man die zum Ziehen erforderliche Leistung

$$N_h = N_a + N_F + N_{cs} \cong \\ \cong \frac{z \cdot k_m \cdot n}{716,2} \left[ r_m \cdot f_1 + \mu \frac{l_{dm} \cdot r_m (R - r)}{\cos \beta/2} \left( 1 - \frac{F_2}{F_1} \frac{1}{\cos \alpha_m} \right) + \right. \\ \left. + \mu \frac{l_{dm}}{\cos \beta/2} (R - r)^2 + \mu (R - r) b_0 R \alpha \frac{\pi}{180} + \mu_{cs} \cdot b \cdot l_{dm} \cdot r_{cs} \right].$$

Der Wert des oben gebrauchten mittleren Verformungswiderstandes  $k_m$  kann bei Verformung mit Vielwalzen mit der zulässigen Vernachlässigung für die praktischen Berechnungen folgendermaßen ermittelt werden:

$$k_m = k_f \left( 1 + 5,5 \mu \frac{z \cdot b \cdot l_{dm}}{F_2} \sqrt[4]{v_m} \right),$$

worin

$k_f$  die Verformungsfestigkeit und

$v_m$  die mit dem mittleren Walzradius berechnete Umfangsgeschwindigkeit bezeichnet.

Praktisch kann der Wert des Verformungswiderstandes  $k_f$  beim Kaltwalzen der Fließgrenze des zu verformenden Werkstoffes gleich gesetzt werden.

Zwischen der Drehzahl  $n$  der sich frei drehenden Walzen, der Ziehgeschwindigkeit  $v_h$  und dem Voreilfaktor  $\delta'$  besteht der Zusammenhang

$$v_h = \delta' \frac{r_m \cdot n}{9,55},$$

woraus

$$n = \frac{9,55 \cdot v_h}{r_m \cdot \delta'}$$

Der Voreilfaktor läßt sich gemäß den Bezeichnungen der Abb. 9 auf Grund des Zusammenhanges

$$\delta' = \cos \varphi_{0m} + \frac{z \cdot b \cdot r_m (\cos \varphi_{0m} - \cos^2 \varphi_{0m})}{F_2}$$

berechnen.

Das Maß des Voreilens hängt von der neutralen Linie oder vom Querschnitt bzw. von der Größe des Winkels  $\varphi_{0m}$  ab, der seine Lage bestimmt. Mit Annäherung kann angenommen werden, daß der Wert der relativen Rutschungen, wie sich diese aus der Lage der einzelnen Profilpunkte auf unterschiedlich großen Halbmessern ergeben, an dem durch den Radius  $r_m$  bestimmten Kreisbogen entlang Null ist. An den sich mit dem Stoff berührenden Flanken zonen innerhalb bzw. außerhalb des Radius  $r_m$  sind in diesem Falle die Werte der gegen die Drehung der Walze auftretenden, in Abb. 9 dargestellten Reibungswiderstandsmomente verschiedenen Sinnes gleich groß:

$$S_p \frac{r_m - r}{2} = S'_p \frac{R - r_m}{2} + S''_p (R - r_m).$$

Von der grundlegenden Bedingung ausgehend, daß die Resultierenden der in der Zugrichtung auftretenden Elementarkräfte in dem durch den Winkel  $\varphi_{0m}$  bestimmten Querschnitt in Gleichgewicht sind, d. h. daß

$$H_1 + H_2 + H_s + H_p = 0,$$

kann der Wert von  $\varphi_{0m}$  bestimmt werden:

$$\sin \varphi_{0m} = \frac{\mu \cdot \sin \alpha_m - (1 - \cos \alpha_m) + \mu_{cs} \frac{r_{cs}}{r_m} \alpha_m \frac{\pi}{180}}{2\mu} + \frac{\mu \cdot I_{dm} (r_m - r)^2}{\frac{1}{2} b_0 r_m^2 \cos \beta/2 + (R - r) r_m^2 \sin \beta/2} \cdot \frac{1}{2\mu}.$$

Nach Bestimmung und Summierung der erwähnten Teilleistungen läßt sich die Zugkraft errechnen:

$$H = \frac{(N_a + N_F + N_{cs}) \cdot 75}{v_h}.$$

### Bestimmung des Durchmessers der Werkstoffstange vor dem Walzen

Während des Walzvorganges erleidet der Außendurchmesser des Werkstoffes eine Verkürzung. Deshalb wäre es zweckmäßig, eine Stange mit einem Durchmesser zu walzen, bei welchem sich nach der Minderung während des Verfahrens genau der erforderliche Außendurchmesser ergeben würde. Im folgenden werden wir den Ausgangsdurchmesser unter gewissen praktisch zulässigen Vernachlässigungen bestimmen.

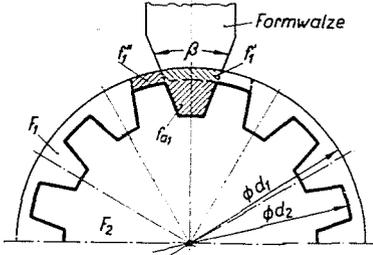


Abb. 10. Querschnitt eines Werkstückes vor und nach der Verformung

Gemäß Abb. 10 ist bei der Profilstange mit einem Außendurchmesser  $d_2$  der Querschnitt der einzelnen Zahnlücken  $f_{a1}$ . Die Verformung beginnt bei einem Durchmesser  $d_1 > d_2$ . Während durch jede Walze eine Zahnlücke  $f_{a1}$  und ein Querschnitt  $f_1'$  geformt wird, verkürzt sich der Außendurchmesser auf  $d_2$ . Außer dem durch je eine Walze geformten Querschnitt  $f_1 = f_{a1} + f_1'$  erfolgt eine weitere Abnahme  $f_1''$  des Querschnittes bei jedem Zahn. Der Wert der Querschnittsabnahme über die Zahnlückenquerschnitte  $f_{a1}$  hinaus ist für den ganzen Querschnitt

$$z(f_1' + f_2'') = \frac{(d_1^2 - d_2^2)\pi}{4}.$$

Wenn der Querschnitt vor dem Walzen mit  $F_1$ , nach dem Walzen mit  $F_2$  bezeichnet wird, gilt

$$F_1 = \frac{d_1^2 \pi}{4} = F_2 + z f_{a1} + \frac{(d_1^2 - d_2^2)\pi}{4}.$$

Wenn man von der Beständigkeit des Volumens des geformten Werkstoffes ausgeht, kann beim Durchziehen zwischen den Profilwalzen unter Beachtung der Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeiten des Werkstoffes, ferner der Querschnitte folgender Zusammenhang geschrieben werden:

$$v_1 F_1 = v_2 F_2.$$

Die Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeiten des Stoffes hängen vom Grade des Voreilens ab, das seinerseits von der neutralen Linie bzw. der Lage des Querschnittes, d. h. dem Winkel  $\varphi_{om}$  abhängt.

In Abb. 11 ist die Verteilung der relativen Rutschgeschwindigkeiten am Einspannbogen bei verschiedenen Werten von  $\varphi_{om}$  angegeben:

a) Beim Walzen. Die Austrittsgeschwindigkeit des Stoffes ist der Umfangsgeschwindigkeit  $v_m$  des Zylinders gleich. In diesem Falle gibt es kein Voreilen, der Stoff hat aber eine Möglichkeit zum Ausweichen.

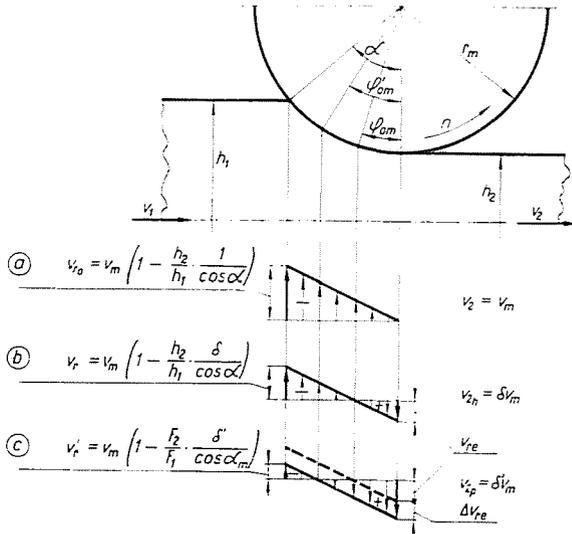


Abb. 11. Relative Rutschgeschwindigkeiten bei neutralen Querschnitten verschiedener Lage

b) Beim Walzen. Wenn ein Ausweichen unmöglich ist, gestaltet sich die Austrittsgeschwindigkeit des Stoffes wie folgt:

$$v_{2h} = \delta \cdot v_m \quad \text{oder} \quad v_{2h} = v_m + v_{re}$$

c) Beim Profiliziehen. Es gibt kein Ausweichen und die Stoffgeschwindigkeit ist:

$$v_{2p} = \delta' \cdot v_m \quad \text{oder} \quad v_{2p} = v_m + v_{re} + \Delta v_{re}$$

Der Wert der relativen Rutschgeschwindigkeit infolge des Stoffvoreilens  $\Delta v_{re}$  hängt offenbar von der Zunahme des Winkels  $\varphi_{om}$  ab.

Die Geschwindigkeit des zwischen die Walzen eintretenden Stoffes ist  $v_i = v_m - v'_r$ .

Die Geschwindigkeit des aus den Walzen heraustretenden Stoffes ist, wenn sie der Ziehgeschwindigkeit gleich gesetzt wird:  $v_2 = v_h = \delta' v_m$ .

Auf Grund der Volumbeständigkeit ist

$$(v_m - v_r') \frac{d_1^3 \pi}{4} = v_h \left( \frac{d_2^3 \pi}{4} - z f_{a1} \right).$$

Da  $\frac{d_2^3 \pi}{4} - z f_{a1} = F_2$ , d. h. der heraustretende Querschnitt ist, erhält man aus obigem Zusammenhang den Ausgangsdurchmesser:

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot v_h \cdot F_2}{(v_m - v_r') \cdot \pi}}.$$

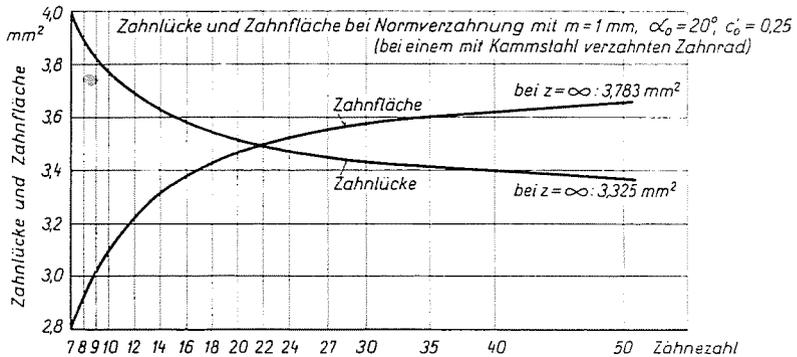


Abb. 12. Zahnlücke und Zahnfläche in Abhängigkeit von der Zähnezahl, bei Normverzahnung

Die Zahnlückenflächen  $f_{a1}$  des herzustellenden Zahnrades können am einfachsten durch Planimetrieren in vergrößertem Maßstab bestimmt werden. Für Normverzahnung mit einem Modul  $m = 1$ , einem Eingriffswinkel  $\alpha_0 = 20^\circ$  und einem spezifischen Kopfspielfaktor  $c'_0 = 0,25$  zeigt Abb. 12 die Flächen der Zähne und Zahnlücken in Abhängigkeit von der Zähnezahl.

Hiernach ist die Zahnfläche nur in einem Falle ( $z \simeq 21$ ) der Zahnlückenfläche gleich. Die Kurven der Zahnfläche und Lückenfläche nähern sich den Flächenwerten der Zahnfläche bzw. Zahnlücke des Zahnrades mit der Zähnezahl  $z = \infty$ , d. h. der Zahnstange asymptotisch. Bei der Zahnstange ist die Zahnfläche größer als die Zahnlückenfläche, da der Kopfspielfaktor  $c'_0$  eine größere Zunahme der Zahnfläche verursacht. Die Zahnlücken- bzw. Zahnflächenkurven der mit kompensierter Zahnkorrektion herzustellenden Zahnräder bei verschiedenen Profilverschiebungsfaktoren sind aus Abb. 13 ersichtlich.

Bei positiver Profilverschiebung wächst zuerst die Zahnfläche wegen der Zunahme der Zahndicke, später aber, sobald der Zahn beginnt, spitz zu werden, nimmt die Zahnfläche ab. Die Fläche der Zahnlücke wächst bei

positiver Profilverschiebung stark, bei negativer Profilverschiebung dagegen nach einer geringfügigen Abnahme schwach an.

Aus der bekannten Zahnflächenfläche  $f_{a1}$  kann der Querschnitt  $F_2$  des Zahnrades bestimmt werden:

$$F_2 = \frac{d_2^2 \pi}{4} - z \cdot f_{a1}.$$

Der Durchmesser  $d_2$  ist eigentlich den Kopfkreisdurchmessern  $d_{k1}$  bzw.  $d_{k2}$  der Zahnräder mit den Zähnezahlen  $z_1$  bzw.  $z_2$  gleich. Diese Kopfkreisdurchmesser lassen sich bei Zahnrädern mit Norm- bzw. kompensierter Verzahnung aus folgenden Zusammenhängen berechnen:

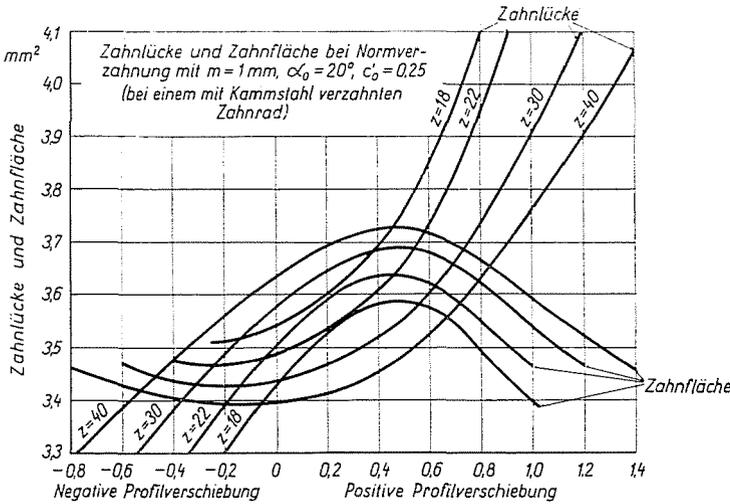


Abb. 13. Zahnfläche und Zahnfläche in Abhängigkeit von der Zähnezahl bei Profilverschiebung

Bei Normverzahnung:  $d_{k1,2} = (z_{1,2} + 2) m$ .

Bei kompensierter Verzahnung:  $d_{k1,2} = (z_{1,2} + 2 \pm 2 x_1) m$ , worin an der

Unterschnittsgrenze  $x_1 = -x_2 = \frac{z_0 - z_1}{z_0}$  den Profilverschiebungsfaktor und

$z_0 = \frac{2}{\sin^2 \alpha_0}$  die Zähnezahl des Grenzrades bezeichnet, wenn der Kopfhöhen-

faktor  $f_0 = 1$  ist.

Bei der Herstellung von Zahnrädern mit allgemeiner Verzahnung wird am Zahnkopf eine Zahnhöhenverkürzung  $(\Sigma x - y) m$  angewendet, damit das Kopfspiel auf konstantem Wert gehalten wird. Hier ist

$$\Sigma x = x_1 + x_2 = \frac{z_1 + z_2}{2} \frac{\text{inv } \alpha_g - \text{inv } \alpha_0}{\tan \alpha_0}$$

die Summe der Profilverschiebungsfaktoren und  $y = \frac{a - a_0}{m}$  bedeutet den Achsabstandsfaktor.

Unter Beachtung dieser Zahnhöhenverkürzung kann der Ausgangsdurchmesser bei den einzelnen Zahnrädern aus folgenden Zusammenhängen berechnet werden:

$$\text{beim Ritzel: } d_{k_1} = [z_1 + 2 + 2x_1 - 2(\Sigma x - y)] m,$$

$$\text{beim Rad: } d_{k_2} = [z_2 + 2 + 2x_2 - 2(\Sigma x - y)] m.$$

Bei der Herstellung von Zahnrädern mit kleinem Modul kann obiger Kopfspielfaktor  $c'_0 = 0,25$  auch mit einem größeren Wert ( $c'_0 = 0,3 - 0,5$ ) angesetzt werden, damit man bei der Herstellung nur den zur Vermeidung des Unterschnittes nötigen Faktor  $x_1 = \frac{z_0 - z_1}{z_0}$  zu berücksichtigen hat und die geringfügige Abnahme des Kopfspiels beim Eingriff des Zahnrades in das Gegenrad außer acht lassen kann.

### Zusammenfassung

Herstellung von Zahnrädern mit kleinem Modul durch Kaltwalzen. — Beschreibung der Walzvorrichtung und des Walzvorganges. — Genauigkeitsmessungen und Ergebnisse der Messungen an kaltgewalzten Zahnrädern. Vergleich der Herstellungskosten mit den Kosten des Fräsen von Zahnrädern. — Wirkung des Walzverfahrens im verformten Werkstoff. — Berechnung des Leistungsbedarfes und der Zugkraft. — Bestimmung des Durchmessers der zu verformenden Werkstoffstange, damit sich nach dem Walzen der Kopfkreisdurchmesser des Zahnrades als Außendurchmesser ergebe.

### Literatur

1. POCHON, I. I.: A Cold Rolling Process for the Manufacture of Gears. Machinery, 12. Dec. 1962.
2. GROB, E.: Kaltwalzen von Zahnrädern und Nutwellen. Technische Rundschau, 22. Juni 1962.
3. VÖRÖS, E.: Die neuesten Forschungen und Herstellungsverfahren für Zahnräder. Vorlesungen der Fortbildungskurse für Ingenieure, 3062/1955.
4. GROB, E.: Kaltwalzmaschinen für Keilwellen und Zahnräder. Werkstatttechnik, Juli 1960.
5. GELEJI, A.: Bildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch. Akademie Verlag, Berlin, 1961.

dr. Dezső MOLNÁR, Budapest, XI., Műegyetem rpt 1/3.