

Die Maag-Zahnräder und ihre Bedeutung für die Maschinen-Industrie

Autor(en): **Maag, Max**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **69/70 (1917)**

Heft 12

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-33944>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Maag-Zahnräder und ihre Bedeutung für die Maschinen-Industrie.

Vortrag von Ing. MAX MAAG, gehalten am 20. April 1917 im technischen Verein Winterthur.

Verehrte Versammlung!

Indem ich Ihnen zunächst meinen Dank ausspreche für die mir erwiesene Ehre, vor Ihnen über meine Arbeiten auf dem Gebiete der Zahnräderfabrikation sprechen zu dürfen, möchte ich Sie gleichzeitig um Nachsicht bitten, wenn es mir nicht gelingen sollte, Ihr Interesse für eine Stunde wach zu halten, da es das erste Mal ist, dass ich vor einem Kreise von Fachleuten spreche, deren Interessen natürlicherweise sich nicht wie das meine auf das scheinbar engbegrenzte Spezialgebiet der Zahnräderfabrikation konzentriert. Sollte es mir trotzdem gelingen, Ihnen ein Bild des heutigen Standes der Zahnräderfabrikation zu entwerfen und Ihnen zu zeigen, in wie mannigfacher Weise die neueren Errungenschaften auf diesem Gebiet befruchtend auf die verschiedensten Zweige des Maschinenbaues einzuwirken vermögen, so ist der Zweck meiner Ausführungen völlig erreicht. Wenn nebenbei etwas abfällt für die Anerkennung des von den zünftigen Ingenieuren und Praktikern so gerne über die Achsel angesehenen Zahnrades, so wird mir das zu ganz besonderer Freude gereichen, nachdem ich dasselbe nun einmal zu meinem Steckenpferd gemacht habe.

Mein Thema lautet: *Die Maagzahnäder und ihre Bedeutung für die Maschinenindustrie*, sodass ich Ihnen in erster Linie wohl einiges über die Besonderheiten dieser Räder zu sagen und nachher auf die verschiedenen Anwendungsgebiete derselben überzugehen habe.

Das Maag-Zahnrad unterscheidet sich vor andern:

- 1) Durch seine besondere Verzahnung und
- 2) durch die Art seiner Herstellung.

Die bei allen Maagrädern angewendete Maagverzahnung ist eine nach dem Abwälzverfahren hergestellte reine Evolventenverzahnung. Das wäre an und für sich nichts besonderes. Das besondere liegt aber darin, dass die Maagverzahnung für jede einzelne Uebersetzung so ausgebildet ist, wie sie für diese am günstigsten ist, worin sie sich von der sonst allgemein gebräuchlichen Normalverzahnung vorteilhaft unterscheidet.

Um Ihnen die Bedeutung dieser Tatsache klar zu machen, gestatten Sie mir wohl, Sie ein paar Minuten in den Ihren Erinnerungen wohl schon längst entschwindenen Gefilden der Verzahnungstheorie spazieren zu führen.

Wie Sie wohl noch wissen, ist die Hauptforderung, die man z. B. an ein Stirnräderpaar stellen muss die, dass das sich mit gleichförmiger Winkelgeschwindigkeit drehende Ritzel eine, der Grösse nach im allgemeinen zwar verschiedene, aber ebenfalls gleichförmige Winkelgeschwindigkeit auf das getriebene Rad überträgt. Es wird dies theoretisch dadurch erreicht, dass man die zu den Achsen der beiden Räder konzentrischen, sich berührenden Kreise gleicher Umfangsgeschwindigkeit, die sogenannten Teilkreise, ohne Gleiten aufeinander rollen lässt.

Praktisch wird dies dadurch bewirkt, dass am äusseren Umfang der Radkörper in gleichen Abständen Lücken derart eingeschnitten werden, dass die so entstehenden Vorsprünge des einen Rades in die Lücken des anderen beim Lauf der Räder ohne Spiel und ohne Klemmung einzugreifen vermögen. Während es sofort einleuchtet, dass bei gleichem Abstand der Zähne beider Räder bei gleichförmiger Winkelgeschwindigkeit des treibenden Ritzels das Rad im Grossen und Ganzen eine ebenfalls gleichförmige Winkelgeschwindigkeit erhält, so ist dies innerhalb einer Drehung um einen Zahnabstand oder eine sogenannte Teilung nicht ohne weiteres der Fall. Vielmehr bedingt die Forderung, dass die Bewegungsübertragung nicht nur im Grossen und Ganzen, sondern in jedem Moment gleichförmig sein muss, eine besondere Profilierung der Zahnflanken und zwar müssen die Profile so geformt sein, dass die gemeinsame Normale der beiden Profile in deren jeweiligem Berührungspunkt durch den Berührungspunkt der beiden Teilkreise geht.

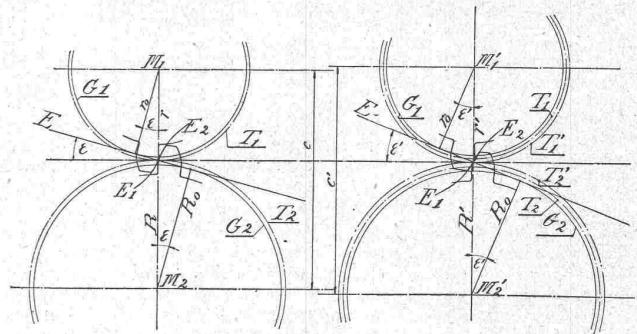
Diese für alle Zahnprofilpaare gültige und genügende Forderung ermöglicht es, zu einem beliebigen gegebenem Profil das zugehörige Gegenprofil zu konstruieren. Die Wahl des ersten Profils ist aber aus praktischen Gründen bedeutenden Einschränkungen unterworfen, sodass nur ganz wenige Profilarten praktische Bedeutung erlangt haben. Unter diesen spielen die sogenannten cyklischen Kurven die Hauptrolle, das sind Kurven, welche beliebige Punkte einer auf einer andern Kreislinie abrollenden Kreislinie beschreiben. Wenn der abrollende Kreis unendlich gross, d. h. eine Gerade ist, so beschreiben deren Punkte Kreisevolventen zu dem festen, oder dem sogen. Grundkreise.

Während früher die Zykloiden ungefähr gleich häufig als Zahnkurven angewendet wurden, wie die Evolventen (welche übrigens auch nur eine besondere Art der Zykloide ist), so wird heute sozusagen ausschliesslich noch die Evolvente benutzt.

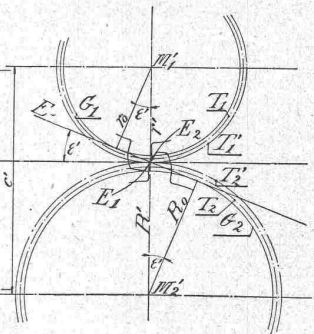
Diese Bevorzugung verdankt sie zwei wichtigen Eigenschaften, welche sie sehr vorteilhaft vor den Zykloiden auszeichnet, nämlich:

- 1) der theoretisch richtigen Bewegungsübertragung bei Aenderung des Achsabstandes der zusammenlaufenden Räder und
- 2) der einfachen Herstellung, welche durch das Abwälzverfahren ermöglicht wird.

Die erstere Eigenschaft, d. h. die Unempfindlichkeit gegen Aenderungen der Achsdistanz, hat ihren tieferen Grund in der *Teilkreislosigkeit* der Evolvente, wie folgende Betrachtung zeigt:



Figur 1. Evolventenverzahnung.



Figur 2. Die gleiche Verzahnung bei vergrösserter Achsdistanz.

Bezeichnen in Fig. 1 T_1 und T_2 die Teilkreise eines Räderpaares mit den Achsen M_1 und M_2 , deren Abstand $= c$ ist, so bilden die von den Punkten M_1 und M_2 auf eine durch den Berührungspunkt der Teilkreise gehende Linie E gefällten Lote r_0 und R_0 die Radien der Grundkreise G_1 und G_2 , denen die beiden Evolventen E_1 und E_2 angehören.

Da $r_0 = r \cos \epsilon$ und $R_0 = R \cos \epsilon$, also

$$\frac{r_0}{R_0} = \frac{r}{R}$$

so sind die Grundkreise wie die Teilkreise Kreise gleicher Umfangsgeschwindigkeit.

Zieht man nun, wie in Fig. 2, die Achsen der beiden Räder auseinander, sodass der Abstand $M_1' M_2' = c'$ wird, so können sich die ursprünglichen Teilkreise T_1 und T_2 nicht mehr berühren, sind also im neuen System nicht mehr Teilkreise. Die neuen Teilkreise T_1' und T_2' ergeben sich aber sofort als um M_1' und M_2' geschlagene Kreise durch den Schnittpunkt der Zentrale $M_1' M_2'$ mit der an die ursprünglichen Grundkreise G_1 und G_2 gezogenen gemeinsamen Tangente E' , denn da G_1 und G_2 nach wie vor Kreise gleicher Umfangsgeschwindigkeit sind, so sind es auch T_1' und T_2' wegen

$$r' = \frac{r_0}{\cos \epsilon'} \quad \text{und} \quad R' = \frac{R_0}{\cos \epsilon'}, \quad \text{also}$$

$$\frac{r'}{R'} = \frac{r_0}{R_0} = \frac{r}{R}$$

Die den Grundkreisen G_1 und G_2 angehörigen Evolventen E_1 und E_2 sind natürlich genau dieselben geblieben wie in Fig. 1, da sie ja durch die gleichgebliebenen Grundkreise eindeutig bestimmt sind. Sie bilden aber im neuen System ebensogut wie im ursprünglichen ein regelrechtes Profilpaar, trotzdem ihre Teilkreispunkte nicht mehr an gleicher Stelle liegen. Die Aenderung des Achsabstandes hat also weiter nichts bewirkt als eine Aenderung der Neigung ϵ in ϵ' der gemeinsamen Tangente an die Grundkreise. Diese Tangente ist bekanntlich die Eingriffslinie der beiden Evolventenprofile, sodass man auch sagen kann, dass die Aenderung des Achsabstandes weiter nichts als eine Aenderung des Eingriffswinkels ϵ herbeiführt, wobei jeder Aenderung des Achsabstandes auch neue Teilkreise entsprechen. Dass sich dabei aber die Evolventen nicht ändern, kommt davon her, dass deren Gestalt eben nicht von den Teilkreisen, sondern allein von den bei der Aenderung stets gleichbleibenden Grundkreisen abhängen.

Im Gegensatz zu den „teilkreislosen“ Evolventen haben alle anderen Zahnprofilkurven fest gegebene Teilkreispunkte, in welchen die Kurven Brech- oder Wendepunkte aufweisen, sodass eine Veränderung der Achsdistanz, mit welcher stets eine Veränderung der System-Teilkreise verbunden ist, nicht möglich ist, ohne dass plötzliche Geschwindigkeitsänderungen des getriebenen Rades herbeigeführt werden. Während bei einer Evolventenverzahnung die Teilkreise erst nach Festlegung der Achsdistanz bestimmt sind, diese also bei gegebenen Evolventen

beliebig gewählt werden kann, sind sie bei allen anderen Verzahnungsformen durch deren Teilkreispunkte selber gegeben und die Achsdistanzen also zum vornherein bestimmt.

Ich habe diesen Punkt besonders gestreift, weil die „Teilkreislosigkeit“ der Evolvente bei der Maagverzahnung ausserste ausgenutzt wird, wie aus den späteren Ausführungen noch ersichtlich sein wird.

Zur Begründung des zweiten Vorzuges der Evolvente, nämlich deren einfacher Herstellung, diene Ihnen folgendes: Neben den seit Alters geübten Verfahren, die Lücken der Zahnräder durch nach der endgültigen Form der Zahnprofile geformte Fräser herauszuschneiden, hat in neuerer Zeit ein anderes Verfahren mehr und mehr Verbreitung gefunden, welches unter dem Namen Abwälzverfahren bekannt ist. Sein Grundgedanke ist am besten an der bekannten Stirnräderhobelmaschine v. Fellows zu verfolgen. Das Werkzeug *W* (Fig. 3) dieser Maschine besteht aus einem mit regelrecht profilierten Zähnen versehenen Rad, welches in einem Stossmaschinen-Stössel befestigt ist und mit diesem auf und nieder bewegt wird, während das zu schneidende Rad horizontal unter der Stösselführung aufgespannt ist. Der Stössel hat die Besonderheit, dass er um das Zentrum des Werkzeugrades drehbar ist. Ebenso ist das zu schneidende Rad *R* (Fig. 3) bzw. der dasselbe tragende Aufspanntisch drehbar, und zwar geschehen diese beiden Drehungen jeweils um einen kleinen Ruck beim Leerhub des Stössels und in der Weise, dass das Werkzeugrad und das zu schneidende Rad zwangsläufig gleichsam eine sehr langsame Zahnradbewegung ausführen. Die Zähne des Werkzeugrades werden also aus dem zu schneidenden Rad nicht mehr und nicht weniger Material herausgeschneiden, als für die ungehinderte Abrollung eines dem Werkzeugrad in Zähnezahl und Profil genau entsprechenden Rades erforderlich ist, d. h. das zu schneidende Rad wird nach dem Schneiden mit Zähnen ausgerüstet sein, welche es befähigen, mit einem dem Werkzeugrad gleichen Rad richtig zusammenzulaufen.

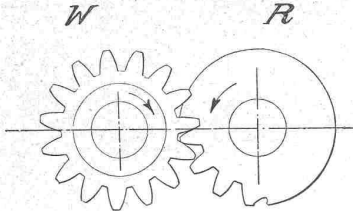


Fig. 3. Fellows Schema.

Anstatt eines eigentlichen Rades kann auch ein unendlich grosses Rad, d. h. eine Zahnstange, als Werkzeug verwendet werden. Die Nachahmung der Roll- oder Walzbewegung zwischen Zahnstange und Rad kann hierbei entweder durch geradlinig fortschreitende Bewegung des Werkzeuges und gleichzeitige Drehbewegung des Rades oder durch Vereinigung von fortschreitender und Drehbewegung am Rad bewirkt werden.

Wenn man auf diesen mittels zahnstangenförmigen Werkzeugen arbeitenden Maschinen irgend welcher Art mit ganz beliebig profiliertem Werkzeug arbeitet, so erhält man Räder, welche bei ganz beliebiger Zähnezahl mit den Werkzeugen ähnlichen Zahnstangen richtig zusammenlaufen würden. Damit ist aber der beabsichtigte Zweck noch nicht erreicht, denn dieser besteht darin, mit einem Werkzeug Räder beliebiger Zähnezahl zu erzeugen, welche beliebig unter sich gepaart, richtig zusammenlaufen. Diese Forderung ergibt bedeutende Einschränkungen in der Wahl der erzeugenden Profile der Werkzeugzahnstangen, indem nur *inbezug auf ihren Teiltrisppunkt symmetrische erzeugende Profile* hierfür brauchbar sind. Das einfachste derartige Profil ist die Gerade und die Untersuchung zeigt, dass diese an Rädern beliebiger Grösse theoretisch richtige Evolventen erzeugt, was der bekannten Tatsache entspricht, dass die Zahnstange mit Evolventenverzahnung gerade Profile hat.

Ebenso wie bei der Evolvente ein bestimmter Teilkreis zum vornherein nicht gegeben ist, ist auch bei dem Evolventen-Zahnstangenprofil ein bestimmter Teiltrisppunkt nicht vorhanden, es kann vielmehr jeder beliebige Punkt desselben der Teiltrisppunkt sein. Die Erkenntnis der Bedeutung dieser „Teilkreislosigkeit“ des Evolventen-Zahnstangenprofils war der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Maagverzahnung und dieser Eigenschaft besonders ist es zu danken, dass die Verwendung der Evolventenverzahnung für jede beliebige Uebersetzung praktisch möglich wurde. Daneben ist die geradlinige Form des Werkzeugprofils von höchster praktischer Bedeutung für die zur Erzeugung gutlaufender Räder erforderliche ausserordentliche Genauigkeit des Werkzeuges.

Es dürfte dies am besten einleuchten, wenn man sich die Schwierigkeiten vergegenwärtigt, welche die Herstellung von nicht geradlinigen Zahnstangenprofilen und das Arbeiten mit solchen bieten. Denn nicht nur müssten solche Profile wegen der erforderlichen Symmetrie inbezug auf den Teiltrisppunkt doppelt gekrümmt sein, sondern es müsste auch der Brech- oder Wendepunkt des Profils als gegebener Teiltrisppunkt beim Arbeiten stets genau auf die Teilkreise der zu schneidenden Räder eingestellt werden, alles Forderungen, welche praktisch nicht mit genügender Genauigkeit zu erfüllen sind und welche beim geradlinigen Profil von selber in Wegfall kommen.

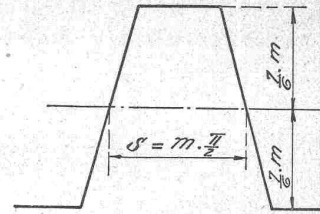


Fig. 4. Normales Zahnstangenprofil.

Bei der bei uns allgemein gebräuchlichen Dimensionierung der Zahnräder mit Evolventenverzahnung, bei der die Zahnhöhe $\frac{13}{6}$ Modul gemacht wird, welche zu $\frac{6}{6}$ ausserhalb des Teilkreises als Kopfhöhe und zu $\frac{7}{6}$ innerhalb des Teilkreises als Fusshöhe bezeichnet werden, ergeben sich beim Schneiden von Zahnradern mit kleiner Zähnezahl mehr oder weniger stark unterschnittene Zähne. Die Figuren 5, 6 und 7 zeigen solche Normalzähne bei Zähnezahlen von 15, 7 und 3. Wie ersichtlich, wird bei diesen kleinen Zähnezahlen fast das ganze Fussprofil nur durch die Relativbahn *R* der Werkzeug-Kopfeckpunkte gebildet, welche aber kein brauchbares Profil liefert. Solange diese Relativbahn keine für den Eingriff des Rades mit seinem Gegenrad notwendige Profilstücke wegschneidet, hat sie auf die Eingriffsverhältnisse der Räder keinen besonders schlimmen Einfluss. Wenn sie aber wie bei dem in Zeichnungen 6 und 7 gezeigten 7- oder gar 3-zähligen Rad bis über den Teilkreis hinaufreicht, so zerstört sie das ganze Fussprofil des Rades und nimmt selbst noch Teile des Kopfprofils weg, und zwar gerade die für den guten Eingriff der Räder wertvollsten, weil hier die Abwicklung fast rein rollend ist. (Vergl. hiermit Fig. 2 in Tafel II, in welcher zwei mit Maag-Verzahnung ausgeführte 3-zählige Räder im Eingriff dargestellt sind.)

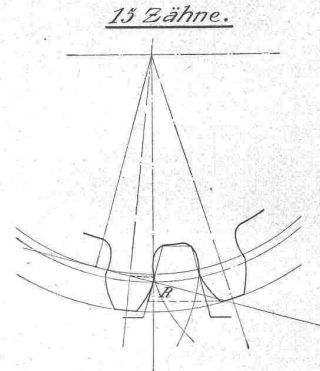


Fig. 5. 15 zähliges Rad.

Wenn auch in der Praxis derart kleine Zähnezahlen wenig vorkommen, so kann diese doch auf solche von 15, 12, 10, 8, ja sogar 7 nicht verzichten. Zudem wäre eine anstandlose Verwendbarkeit noch kleinerer Zähnezahlen in vielen Fällen sehr vorteilhaft. Es ist daher nicht zu verwundern, wenn mit der Verbreitung des Abwälzverfahrens und damit der beginnenden Vorherrschaft der Evolventenverzahnung Bestrebungen Hand in Hand gingen, welche bezwecken, die Nachteile der Evolventenverzahnung bei kleinen Zähnezahlen zu beseitigen. Als solcher Nachteil wurde vor allem das Unterschneiden der Zähne bekämpft, welches durch das unangenehme Wegschneiden des für die Kraftübertragung gerade wichtigsten Materials an den Zahnfüssen, wie wir gesehen haben, besonders schädlich wirkt. Dass man zwar die Evolventenverzahnung für kleine Zähnezahlen sehr zweckentsprechend ausbilden kann, war theoretisch längst bekannt, doch konnte die Praxis aus dieser Erkenntnis keinen Nutzen ziehen, denn die individuelle Ausbildung der Verzahnung für jede einzelne Uebersetzung hätte eine solche Unmenge von Werkzeugen nötig gemacht, und bei dem Mangel an einheitlichen Grundsätzen für die Gestaltung der Verzahnung einen derartigen Wirrwarr mit sich gebracht, dass man sich auf solche Vorschläge nicht einlassen konnte, wie die Praxis überhaupt bei den hohen Kosten der üblichen Form- und Abwälzfräser am möglichst weitgehende Normalisierung geradezu gebunden war.

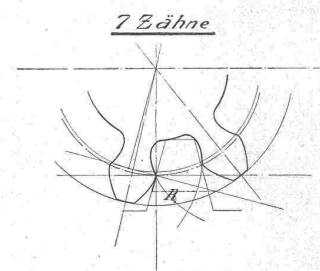


Fig. 6. 7 zähliges Rad.

Was für eine Bedeutung man aber dem Vermeiden des Unterschnittes beilegte, mag das Vorgehen einer mir gut bekannten Firma beweisen, welche sich nicht scheute, das erzeugende Profil ihrer sämtlichen Abwälzfräser nach einem Kreis-

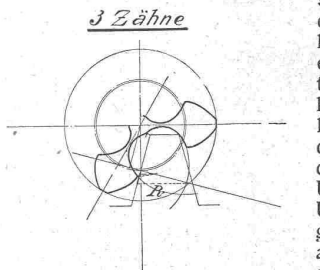


Fig. 7. 3 zähliges Rad.

Es dürfte dies am besten einleuchten, wenn man sich die Schwierigkeiten vergegenwärtigt, welche die Herstellung von nicht geradlinigen Zahnstangenprofilen und das Arbeiten mit solchen bieten. Denn nicht nur müssten solche Profile wegen der erforderlichen Symmetrie inbezug auf den Teiltrisppunkt doppelt gekrümmt sein, sondern es müsste auch der Brech- oder Wendepunkt des Profils als gegebener Teiltrisppunkt beim Arbeiten stets genau auf die Teilkreise der zu schneidenden Räder eingestellt werden, alles Forderungen, welche praktisch nicht mit genügender Genauigkeit zu erfüllen sind und welche beim geradlinigen Profil von selber in Wegfall kommen.

Was für eine Bedeutung man aber dem Vermeiden des Unterschnittes beilegte, mag das Vorgehen einer mir gut bekannten Firma beweisen, welche sich nicht scheute, das erzeugende Profil ihrer sämtlichen Abwälzfräser nach einem Kreis-

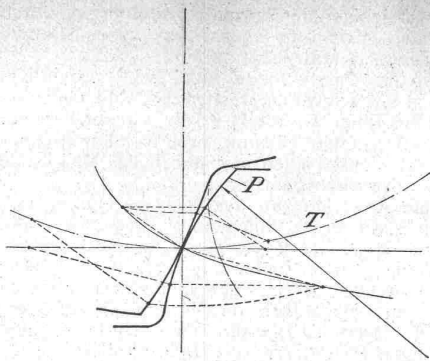


Fig. 8. Kreisbogenprofil.

bogen zu krümmen, wie dies in Fig. 8 angedeutet ist, wodurch natürlich die unterschneidende Wirkung der Kopfeckpunkte bedeutend gemildert wurde. Wegen der Unsymmetrie dieses Profils *P* in bezug auf den Teilkreispunkt *T* musste dabei allerdings auf regelrechte Zahnprofile an den zu schneidenden Rädern verzichtet werden. Da es sich in

diesem Fall aber um Räder mit Pfeilverzahnung handelte, welche trotz unrichtiger Profile zwar nicht brauchbaren, aber doch kinematisch richtigen Lauf aufweisen, so wurde dieser Uebelstand in Kauf genommen, trotzdem es zur Erzielung einer einigermaßen guten Zahnanlage und der Innehaltung der vorgeschriebenen, beim Fräsen aber so ziemlich aufs Geratewohl herauskommenden Achsdistanz erforderlich war, die Räder nach dem Fräsen stunden-, ja tagelang einzuschmirgeln.

Dieses Mittel war natürlich bei der gegen Profilverfäher sehr empfindlichen Stirnverzahnung nicht zulässig. Für Stirnräder hat daher ein anderes Verfahren, nämlich die fälschlicherweise oft Teilkreisverlegung genannte Verlegung der Kopf- und Fusskreise als sogen. AEG oder *korrigierte Verzahnung* grössere Verbreitung gefunden. Das Wesen dieser Verzahnung geht aus einem Vergleich der Figuren 9 und 10 hervor, und besteht darin, dass die Kopfhöhe am Ritzel sowie die Fusshöhe am Rad gegenüber der Normalverzahnung vergrössert, die Fusshöhe des Ritzels und die Kopfhöhe des Rades bei gleichbleibender Gesamtzahnhöhe entsprechend verkleinert wurden. Dadurch wird in der Tat der Unterschnitt des Ritzels in vielen Fällen vermieden, denn das Werkzeug dringt nicht mehr so weit hinter den Grundkreis der Evolvente wie bei der Normalverzahnung. Abgesehen davon, dass derart korrigierte Verzahnungen

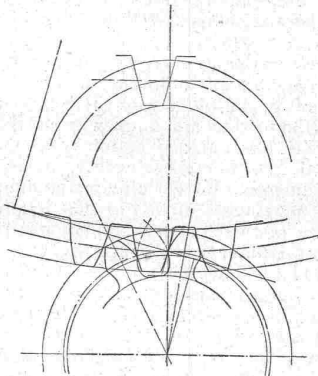


Fig. 9. Normale Verzahnung. 10/60

im allgemeinen schlechtere, d. h. mehr gleitende Abwicklung aufweisen als normale, so ist das Verfahren nur bei stark verschiedener Zahnzahl von Ritzel und Rad anwendbar. Denn die Verbesserung des Ritzelzahnes bedingt eine Verschlechterung des Radzahnes, welche bei kleiner werdender Uebersetzung die Verbesserung des Ritzelzahnes mehr oder weniger kompensiert.

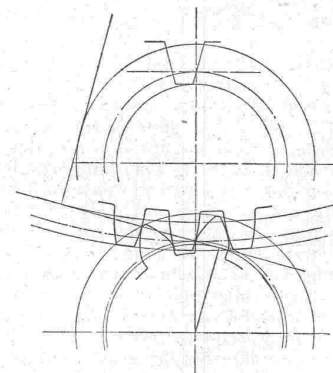


Fig. 10. AEG Verzahnung. 10/60

Bei Uebersetzungen von 1:1 versagt das Verfahren überhaupt gänzlich, sodass z. B. für Zahnradpumpen übliche Getriebe mit 12:12, 10:10, 9:9 oder gar 8:8 Zähnen nach diesem Verfahren nicht mehr hergestellt werden können. Andere Vorschläge zur Vermeidung oder doch zur Milderung des Unterschnittes gingen dahin, den Eingriffswinkel zu erhöhen. So sind z. B. in Amerika zwei Systeme im Gebrauch, deren eines auf einem Eingriffswinkel von 20° und deren anderes auf einem solchen von 22½° basiert. Derartige Verzahnungen ergeben in vielen Fällen recht brauchbare Verhältnisse, wenn im allgemeinen auch die Eingriffswinkel und damit die Zahndrücke unnötig gross sind. Für viele Fälle genügen aber auch diese Winkel noch nicht, so dass auch dieses Verfahren das gesuchte Ideal, nämlich die praktisch einfache Ausführbarkeit der für jeden Fall günstigsten Verzahnung nicht erreicht.

Alle diese Korrekturverfahren weisen ein gemeinsames Merkmal auf, nämlich die ängstliche Anklammerung an den Teilkreis. Denn immer dienen die beim Lauf der fertigen Räder auftretenden Teilkreise auch bei der Erzeugung der Verzahnung als Teilkreise. Es ist aber nach den vorausgegangenen Ausführungen über die Zulässigkeit von Achsdistanzveränderungen bei

der Evolventenverzahnung nicht mehr schwer zu verstehen, dass dies keineswegs nötig ist, denn schon dort zeigte sich, dass die ursprünglichen Teilkreise nach dem Auseinanderziehen der Radachsen nicht mehr die Teilkreise des neuen Systems bildeten, sondern dass andere Kreise, welche also bei der Erzeugung der Räder nicht die Teilkreise waren, die Rolle dieser letzteren übernahmen, und dass trotzdem die Verzahnung kinematisch richtig war. Wenn man also die Achsdistanz des neuen Systems als die gewollte betrachtet, so kann man unbeschadet richtiger Verzahnung die Teilkreise des alten Systems bei der Erzeugung zu Grunde legen, und wenn man dann zum vornherein die Dimensionierung der Aussendurchmesser und der Zahnstärken dem neuen System entsprechend vornimmt, so ist von der Auseinanderziehung der Radachsen überhaupt nichts zu bemerken, die Räder laufen viel mehr auf der neuen Achsdistanz geradeso, wie wenn sie unter Zugrundelegung des neuen Eingriffswinkels und der neuen Teilkreise geschnitten worden wären. Allgemein folgt hieraus, dass jede Evolventenverzahnung unter Zugrundelegung beliebiger erzeugender Teilkreise erzeugt werden kann, wenn nur darauf geachtet wird, dass der Beziehung $r = r' \frac{\cos \epsilon'}{\cos \epsilon}$

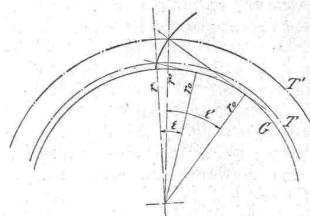


Fig. 11. Verzahnung mit erzeugendem und Lauf-Teilkreis.

Genüge geleistet wird, worin mit *r* der Halbmesser des erzeugenden Teilkreises *T*, mit *r'* der Halbmesser des Laufteilkreises *T'*, mit ϵ der erzeugende Eingriffswinkel und mit ϵ' der Laufeingriffswinkel bezeichnet wird, deren Richtigkeit aus Figur 9 in der Schreibweise

$$r \cos \epsilon = r' \cos \epsilon' = r^0$$

unmittelbar aus Figur 11 abgelesen werden kann, wenn mit *r*⁰ der Halbmesser des Evolventengrundkreises *G* bezeichnet wird. Dieser theoretisch schon längst bekannte, aber in seiner praktischen Bedeutung bisher nicht erfasste Zusammenhang ist nun bei der Maagverzahnung aufs äusserste ausbeutet worden, indem bei Erzeugung derselben tatsächlich nie die beim Lauf der fertigen Räder auftretenden Teilkreise als erzeugende Teilkreise benutzt werden, sondern beliebige andere, natürlich dem zu erreichenden Zweck und den verwendeten Mitteln angepasste, so dass schliesslich mit einem einzigen Werkzeugsatz von unveränderlichem Eingriffswinkel Verzahnungen mit ganz beliebigem Eingriffswinkel und ganz beliebiger Teilung geschnitten werden können, auch wenn diese letzteren nicht mit solchen der ein für allemal festgesetzten Satzwerkzeuge übereinstimmen.

Dadurch ist ein sehr einfaches Mittel an die Hand gegeben, die Evolventenverzahnung für jede beliebige Uebersetzung so auszuführen, dass in bezug auf gesunde, kräftige Zähne, lange aktive Profile, geringes Gleiten und vorwiegendes Rollen, grosse Eingriffsdauer u. s. w. die für jeden Fall günstigsten Verhältnisse geschaffen werden. Es geschieht dies im Prinzip durch Bestimmung der Eingriffswinkel, der Aussendurchmesser der eingreifenden Räder und der Zahndimensionen derselben, welche Grössen alle von der sog. Normalverzahnung abweichen. Die Ermittlung der für jeden Fall günstigsten Verhältnisse geschah durch sorgfältige rechnerische und zeichnerische Untersuchung, unzähliger Varianten für eine grosse Anzahl von Uebersetzungen, welche nach den verschiedensten Gesichtspunkten konstruiert wurden. Aus systematischem Vergleich der möglichen Lösungen ergaben sich dann gewisse Gesetzmässigkeiten, welche durch empirische Formeln festgehalten wurden. Aus diesen Formeln, welche für alle nur denkbaren Fälle passen, liess sich alsdann ein festgefügtes und lückenloses System ableiten, in welchem die Aenderung von Eingriffswinkel, Aussendurchmesser und Zahndimensionen für alle Uebersetzungen von 3:3+∞+50:50+∞ in völlig stetiger Reihenfolge vor sich geht. (Bei Ritzelzahnzahlen über 50 ergibt die bekannte Normalverzahnung derart günstige Verhältnisse, dass eine Aenderung derselben keine erkennbaren Vorteile mehr bietet.)

Da bei der Maagverzahnung also für jede Uebersetzung andere Abmessungen der Verzahnung und ein anderer Eingriffswinkel vorhanden sind, so fehlt ihr im allgemeinen eine Eigenschaft, die man bisher als das Ideal der Zahnradfabrikation betrachtete, nämlich die *Satzradereigenschaft*, welche fordert, dass sämtliche Räder gleicher Teilung beliebig unter sich gepaart, richtig zusammenlaufen sollen. Das scheint auf den ersten Blick ein Nachteil der Maagverzahnung zu sein, welcher denn auch anlässlich eines durch alle Instanzen des Patentamtes durchgeschleppten Einspruches gegen eines meiner Verfahrenpatente von einem der ersten deutschen Zahnradfachleute stets wieder erhalten musste. Der Mann verstieg sich geradezu zu der Behauptung, dass die nach meinem Verfahren erzeugte Verzahnung eben wegen dieses Mangels der *Satzradereigenschaft* einen technischen Rückschritt bedeute. Es ist dies so gut wie der bereits berührte „Teilkreisglaube“ ein schlagender Beweis dafür, wie hemmend solche alten Glaubenssätze auf die freie Entwicklung wirken und eine Mahnung an alle schaffenden Techniker, auch bei der Lösung einfacher Aufgaben stets auf den Grund der Sache zu gehen und sich nicht blos an die in schön abgerundeten Aufsätzen zusammengestellten Resultate anderer

zu halten, da man dadurch nur auf bereits ausgetretene Bahnen gerät, während ein wirklicher Fortschritt nur durch Beschreiten neuer Wege erreicht wird.

Denn was könnte unsinniger sein, als die Forderung, dass z. B. ein Trambahnritzel so zu verzahnen sei, dass es sagen wir mit einem Drehbankvorlegegerad von zufällig gleicher Teilung zusammenlaufen könnte. Mit genau demselben Recht könnte gefordert werden, dass die Zylinder eines stationären Dieselmotors ohne weiteres auch in einem Flugzeugmotor gleicher Bohrung eingebaut werden könnten.

In diesem wie in jenem Falle handelt es sich vielmehr darum, die für einen bestimmten Zweck verwendeten Organe gerade so auszubilden, dass sie zur Erreichung dieses Zweckes bestmöglichst geeignet sind. Wenn es sich dann einmal, wie z. B. bei Wechselrädern von Drehbänken, darum handelt, dass wirklich alle Räder des Satzes beliebig unter sich gepaart richtig zusammenlaufen sollen, so rüstet man eben die Räder mit Satzverzahnung aus, was natürlich nach meinem Verfahren ebenso gut möglich ist als nach irgend einem andern, aber ebenso natürlich den teilweisen Verzicht auf bestmögliche Zahnformen und Eingriffsverhältnisse nach sich zieht.

Nachdem ich Sie, verehrte Herren, in kurzen Zügen in das Verständnis des Wesens der Maagverzahnung eingeführt habe, bliebe mir die Aufgabe, die besonderen Vorzüge der Maagverzahnung gegenüber der Normalverzahnung zu beschreiben, doch kann ich mich hierbei kurz fassen, da alles Wesentliche darüber in meiner Broschüre über „Maagräder“ zusammengestellt ist, welche ich Interessenten gerne zur Verfügung stelle.

Es möge mir immerhin gestattet sein, an Hand eines Beispiels einen kurzen Vergleich anzustellen, aus welchem das Wichtigste hervorgeht.

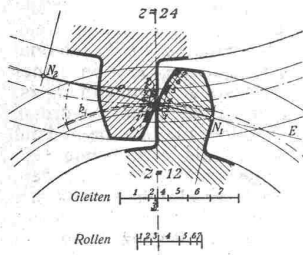


Fig. 12.
Normalverzahnung 12/24

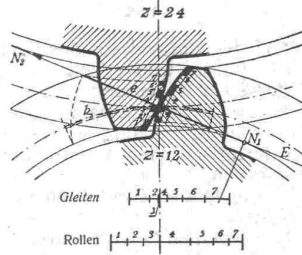


Fig. 13.
Maagverzahnung 12/24

Die Figuren 12 und 13 zeigen ein Getriebe $12/24$ und zwar ist die Verzahnung nach Fig. 12 mittels „normaler“ Formfräser hergestellt, während Fig. 13 die nach dem Maag'schen Verfahren ausgeführte Verzahnung darstellt.

Der augenfälligste Unterschied liegt in den verschiedenen Zahnstärken. Bei der Normalverzahnung ist dieselbe im Teilkreis stets gleich der halben Teilung. Da aber die Evolventengrundkreise sehr nahe an den Teilkreisen liegen und die hinter den Grundkreisen angesetzten Fussprofilstücke radial verlaufen, so ist die Zahnstärke in den Fusskreisen, also an der Stelle der höchsten Beanspruchung stets am kleinsten und zwar an dem häufiger beanspruchten Kolbenzahn noch kleiner als am Radzahn. Wie Fig. 13 zeigt, liegen die Verhältnisse bei der Maagverzahnung viel günstiger, indem dort die Zahnstärke am Fuss am grössten ist und zwar am Kolbenzahn etwas grösser als am Radzahn. Der Zahn hat angenähert die Form eines Körpers gleicher Biegezugfestigkeit und besitzt daher die grösstmögliche Widerstandsfähigkeit gegen Bruch.

Ein zweiter Unterschied zeigt sich in der Länge der aktiven Profile. Bei der „Normalverzahnung“ werden, wie bereits betont wurde, die Fussprofile fast ganz von den radialen Verlängerungen gebildet, welche natürlich für die Bewegungsübertragung keinerlei Wert haben. Zudem ist am Kopfe des Radzahnes ein grosses Stück (σ) ebenfalls gänzlich nutzlos, da es an dem kurzen regelrechten Stück des Fussprofils am Kolbenzahn kein Gegenstück besitzt. Beim Eingriff der Zähne kommen daher nur relativ sehr kurze Profilstücke zur Wirkung, die dementsprechend stark beansprucht werden.

Im Gegensatz hiezu sind die aktiven Profile bei der Maagverzahnung sehr lang und reichen vom Kopf bis in die Nähe der Fusskreise. Es nehmen also bei der Bewegungsübertragung fast die gesamten Profile teil, so dass sich auch die Abnutzung auf viel grössere Stücke verteilt als bei der Normalverzahnung.

Ein tiefgreifender innerer Unterschied besteht ferner in der ganz verschiedenen Art der Abwicklung beider Verzahnungen. Diese ist nämlich bei der Normalverzahnung wegen der starken Längenunterschiede der zusammenarbeitenden Kopf- und Fussprofile vorwiegend *gleitend*, während sie bei den viel ausgeglicheneren Verhältnissen bei der Maagverzahnung vorwiegend *rollend* geschieht. Hierin ist die wesentlich geringere und gleichmässige Abnutzung und der bessere Wirkungsgrad der Maagverzahnung begründet.

Endlich fällt die geringere *Profilkrümmung* bei der Maagverzahnung auf, deren Profile annähernd doppelt so grosse Krümmungs-

radien aufweisen als diejenigen der Normalverzahnung, wodurch wegen der resultierenden *geringeren spez. Pressung* weit höhere Belastungen der Maagverzahnung möglich sind.

Diese grundlegenden Unterschiede sind, wie ersichtlich, durch die einfachen Mittel zweckentsprechender Wahl der Ausendurchmesser und des Eingriffswinkels erreicht worden. Theoretisch war dies natürlich längst bekannt, praktisch konnte aber von den dadurch gebotenen Vorteilen erst durch das Maag'sche Herstellungsverfahren Gebrauch gemacht werden.

Bevor ich auf die Anwendungen der Maagverzahnung eingehen, kann ich es nicht umgehen, Ihnen noch einiges über die *Maschinen* zu sagen, da gerade auch diese für die Güte der Maagräder von ausschlaggebender Bedeutung sind. Da ich aber das Vergnügen haben werde, Sie morgen in meiner Fabrik zu begrüssen und Ihnen die Maschinen im Betriebe vorzuführen, so kann ich mich auch hierbei kurz fassen und möchte nur einige persönliche Bemerkungen über deren Werdegang anführen.

Die beste Verzahnung ist nichts wert, wenn sie nicht gut gemacht ist. Mit dieser Erkenntnis ging ich nach der theoretischen Entwicklung meines Verzahnungssystems bei dem Bestreben nach praktischer Erprobung desselben auf die Suche nach für meinen Zweck brauchbaren Maschinen. Es existierten zur damaligen Zeit, d. h. im Jahre 1908, schon eine ganze Anzahl von Wälzmaschinen, die ich aber der Reihe nach entweder wegen ungenügender Genauigkeit oder Leistung verwarf. Denn entweder arbeiteten diese Maschinen mit schwierig herzustellenden Schneidrädern, die zudem zur Erzielung grosser Leistungen untauglich schienen, oder aber sie arbeiteten mit schneckenförmigen Abwälzfräsern, deren Härte- und sonstigen Fehler ich aus meiner Praxis bereits zur Genüge satt hatte, oder endlich benutzten sie einen zur genau herstellbaren Schneidstahl von der Form eines Zahnstangenzahnes, konnten aber wieder in bezug auf Leistung nicht in Betracht kommen. Es schien daher nichts anderes übrig, als selber an die Konstruktion einer allen meinen Anforderungen gerecht werdenden Maschine heranzugehen. Während ich mich eingehend mit dieser Aufgabe beschäftigte, machte mich eines Tages ein Kollege auf die Beschreibung einer neuen Zahnrad-hobelmaschine im American Machinist aufmerksam mit den Worten: Da, Sie Zahnradmensch, das ist etwas für Sie. Das der Beschreibung beigefügte Bild wirkte auf mich wie ein Blitz aus heilerem Himmel, denn wie ich auf den ersten Blick sah, enthielt die Maschine das Ideal, das mir vorschwebte, nämlich das Werkzeug, das ich haben musste. Es war eine mehrzählige Zahnstange, eine wahrhaftige Zahnstange, nicht nur das Symbol einer solchen. Am selben Tage noch lief ich zu einem mir bekannten Herrn, den ich schon einige Male bezüglich der Verwertungsmöglichkeiten meiner Ideen konsultiert hatte, und meine Begeisterung muss ihn derart angesteckt haben, dass wir an jenem Abend noch den Entschluss fassten, einige dieser Maschinen zu kaufen und die Fabrikation von Zahnradern mit meiner neuen Verzahnung aufzunehmen. Ich ging also nach England, wo die Maschine beim Erfinder im Betriebe zu sehen war, und obwohl ich an deren Konstruktion allerlei auszusetzen hatte, und ihr Erbauer selber nicht theoretisch richtig arbeitete, so sah ich doch sofort, dass das Prinzip der Maschine das für mich allein in Frage kommende war. Ich glaube, ich hätte damals die Maschinen gekauft, auch wenn sie aus Holz gebaut gewesen wären, denn ich erkannte und sah nur die grossen, in den hervorragenden Eigenschaften des Werkzeuges begründeten Entwicklungsmöglichkeiten.

Meine Erwartungen wurden denn auch von den Maschinen zum guten Teil erfüllt, doch sah ich bald ein, dass mit der ursprünglichen Konstruktion weder in bezug auf Leistung noch Genauigkeit aus dem Werkzeug herauszuholen war, was in demselben steckte. Denn das Werkzeug hätte stets wesentlich höhere Leistungen ertragen, als sie die Maschine geben konnte, und das Werkzeug war stets bedeutend genauer als die mit demselben geschnittenen Räder. Nach Erwerbung der vom Erfinder noch nicht abgegebenen Patente ging ich daher an einen völligen Um- und Neubau der Maschine, bei welchem mir allein die Erzielung höchster Genauigkeit und Leistung wegleitend waren, und ich habe die Genugtuung, dass die in der Folge von meinen Konstrukteuren und erstklassigen Maschinenbauern erstellten Maschinen meines Systems sowohl in bezug auf Leistung, als auch vor allem auf Genauigkeit den besten Maschinen anderer Systeme tatsächlich überlegen sind. Diese Ueberlegenheit ist aber, wie ich nochmals betone, in den hervorragenden Eigenschaften des Werkzeuges begründet, welche darin bestehen, dass

- 1) dasselbe ausserordentlich schwere Schnitte mit mehreren Zähnen zugleich gestattet, und dass es
- 2) geradlinige Profile besitzt, welche nach dem Härten mit höchster Genauigkeit geschliffen werden können.

Trotz dieser geradezu idealen Grundlage blieben auch mir allerlei Enttäuschungen nicht erspart und weil eine der schwersten besonders fruchtbar wirkte, so kann ich nicht unterlassen, Ihnen dieselbe zu klagen.

Ich hatte im Jahre 1911 den Auftrag von einer belgischen Automobilfabrik erhalten, ihr einige Wechselgetriebe zu verzahnen. Weil dies für mich neu war, so nahm ich an den Fahrversuchen mit denselben teil. Die Räder wurden fein gehobelt aber ungehärtet abgeliefert und ein mit den ungehärteten Rädern angestellter Versuch berechtigte zu den höchsten Erwartungen.

Aber o weh! Wie brach meine Zuversicht zusammen, als dieselben Räder nach dem Härten sich benahmen, als seien sie nie bei mir in die Schule gegangen. Man suchte mich zwar bei einem opulenten Frühstück über mein Missgeschick damit zu trösten, dass es andern auch schon so gegangen sei. Doch glaubte ich dem technischen Direktor raten zu müssen, dass er seinem Explosionsmotor zu einem ausgeglicheneren Gang verhelfen müsse, denn ich wusste, dass ihn dieses Problem schon längst umtrieb, wogegen er mit Recht ins Feld führte, dass der Motor beim ungehärteten Getriebe genügend gleichmässig gelaufen sei, ich solle vielmehr meine Räder schleifen, dann werden sie seinen Motor schon ertragen. Der Hieb sass, wenn ich auch sofort bewies, dass man wohl ebene oder zylindrische Flächen mit einiger Genauigkeit schleifen könne, niemals aber Evolventenprofile. Glücklicherweise kannte ich damals die schon früher in dieser Richtung von anderen Konstrukteuren gemachten Anstrengungen noch nicht, sonst wäre ich schwerlich einige Tage nachher mit einer im Kopf so ziemlich fertigen Maschine zum Schleifen von Evolventenprofilen zu Hause angekommen, sondern zweifellos in den ausgefahrenen Geleisen meiner Vorgänger stecken geblieben. So viel war mir als Verfechter des Abwälzverfahrens klar: Die Maschine musste nach dem Abwälzverfahren arbeiten und zwar mit zwei Scheiben, deren wirksame Schleifebenen die Flanken eines Zahnstangenzahnes repräsentieren mussten, ferner musste das zu schleifende Rad unter diesen Scheiben hin- und herwälzen und die Wälzbewegung musste wie bei der Bilgram-Kegelraderhobelmaschine durch Rollbogen und Bänder bewirkt werden. Mit einigen nebensächlichen Fragen, wie das genaue Teilen und das Wiedergerademachen der sich wahrscheinlich ziemlich stark abnutzenden Schleiffläche dachte ich noch fertig zu werden. Ich war auch in der Tat kurz entschlossen, die Scheiben mittelst zweier zwangsläufig und geradlinig geführter Diamanten von Zeit zu Zeit automatisch wieder eben zu drehen, während allerdings das genaue Teilen viel mehr Mühe verursachte. Als ich aber während des Baues meiner ersten Maschine die Entdeckung machte, dass sich bereits eine ganze Anzahl Konstrukteure mit dem Problem des Zahnraderschleifens beschäftigt hatten und bereits einige ihr Glück mit meiner Abdrühvorrichtung auf Haar gleichenden Vorrichtungen versucht hatten, da sank mir der Mut wieder, um so mehr, als auch noch verschiedene Patente auf derartige Vorrichtungen im Wege standen, und mir von irgend einem nennenswerten Erfolg nichts bekannt war. Wenn ich die ganze Sache also nicht ins Wasser fallen lassen wollte, so musste ich sie anders anpacken. Dies gelang mir auch in einer Weise, welche erst meiner Maschine das Gepräge gab, nämlich durch die Verwendung einer flachen Topscheibe mit sehr schmalen wirksamem Schleifrand an Stelle der ursprünglich ebenen Scheibe. Damit war die Schwierigkeit der Erhaltung einer ebenen Schleiffläche mit einem Schlage aus dem Wege geräumt, denn die gerade Flanke war nun nicht mehr materiell vorhanden, sondern nur noch als Projektion des schmalen, kreisförmigen Schleifrandes. Dieser schmale Schleifrand bleibt nämlich, soweit er für die Profilerzeugung in Betracht kommt, trotz seiner Abnutzung stets in einer Ebene, so dass auch seine Projektion immer gerade bleibt. Durch die Abnutzung wird allerdings die Lage dieser Ebene nach und nach verändert, was eine unzulässige Verdickung der später geschliffenen Zähne gegenüber den erstgeschliffenen ergibt. Dieser Verschiebung der Schleifebene kann aber, wie ich gleichzeitig erkannte, durch eine der Abnutzung der Schleifscheibe entgegengerichtete Verschiebung des Schleifscheibenträgers begegnet werden. Die Vorrichtung dazu, welche im Prinzip sehr bald festgelegt war, deren praktische Ausbildung aber jahrelange Arbeit verursachte, besteht heute aus einem Fühlorgan, welches den schmalen Rand der Schleifscheibe in kurzen Zwischenräumen betastet und einen Kontaktstift trägt, welcher bei der geringsten Abweichung der Schleifscheibe von ihrer normalen Lage einen Schwachstromkreis schliesst, wodurch ein Relais betätigt wird, welches eine Verstellung des Schleifscheibenträgers um einzelne Beträge von je $\frac{1}{1000}$ mm bewirkt und sie arbeitet so zuverlässig, dass die Genauigkeit der auf der Maschine geschliffenen Zahnräder von der mehr oder weniger grossen Schleifscheibenabnutzung tatsächlich völlig unabhängig ist. Die später noch vorgenommenen konstruktiven Aenderungen der Maschine beziehen sich zum Teil auf Vereinfachungen, zur Hauptsache aber auf die Erreichung der äusserst möglichen Genauigkeit der Räder, in welcher Richtung trotz der erreichten sehr erfreulichen Resultate auch heute noch rastlos gearbeitet wird. Denn ebenso gut wie bei der Hobelmaschine hat auch das Werkzeug der Schleifmaschine das Zeug zu etwas Rechtem in sich, dort ist es die grosse *Leistungsfähigkeit* und die Möglichkeit *genauester Herstellung* der Werkzeughaltstände, hier der *schmale Schleifrand* mit der nur ihm möglichen *Unabhängigkeit von der Abnutzung*, welche die eigentlichen Seelen der beiden Maschinen sind, denen der Konstrukteur den ebenbürtigen Leib geben musste, und ich darf wohl sagen, auch gab (siehe Tafel III).

Wenn ich nun noch einen Blick auf die Bedeutung der Maagräder für den allgemeinen Maschinenbau werfe, so geschieht dies am besten durch Voranstellung einiger allgemeiner Forderungen, welche heutzutage an gute Zahnräder gestellt werden müssen und dürfen. Dabei treten vor allem zwei Gesichtspunkte

in den Vordergrund, nämlich der *ruhige* und *möglichst geräuschlose Gang* und die *Haltbarkeit*, und es zeigt sich, dass bezüglich des ruhigen, d. h. stoss- und vibrationfreien Ganges in erster Linie eine *peinliche Teilungsgenauigkeit*, in zweiter Linie auch die *Profilgenauigkeit*, für den möglichst *geräuschlosen Gang* neben geeigneter Material- und Formwahl, namentlich eine *peinliche Profilgenauigkeit* und für die *Haltbarkeit* neben den günstigen Eingriffsverhältnissen der Verzahnung und geeigneter Materialwahl, namentlich auch die *Beschaffenheit der Zahnflanken* von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Bezüglich der günstigen *Eingriffsverhältnisse* dürfte es nach den vorausgegangenen Ausführungen einleuchten, dass die Maagverzahnung die besten Resultate ergibt, so dass sich ein weiteres Eingehen auf diesen Punkt erübrigt.

Bezüglich der *Profilgenauigkeit* dürfte gleichfalls einleuchten, dass die nach dem Abwälzverfahren ohne jede Annäherung und mit geradezu idealen Werkzeugen arbeitenden Maagmaschinen dem Ideal ebenfalls am nächsten kommen, speziell darf dies von der Schleifmaschine behauptet werden, welche tatsächlich heute schon Profile von ausserordentlicher Genauigkeit erzeugt. Ich sage ausdrücklich: heute schon, um anzudeuten, dass auch ich diese Entwicklung noch keineswegs als abgeschlossen betrachte. Denn ein wirklich geräuschloser Gang schnelllaufender Zahnräder stellt an die Genauigkeit der Profile derart hohe Ansprüche, dass es noch jahrelanger Entwicklung aller für die Erzielung desselben massgebenden Organe bedarf, um dem Ideal schrittweise näher zu kommen. Wenn ich Ihnen sage, dass hierbei wirklich die letzten Zehntausendstel von Millimetern den Ausschlag geben, so wiederhole ich nur ein Wort, das mir ein Pionier auf dem Gebiete der Kugellagerfabrikation bezüglich seiner Lager ausführte und welches auch für Zahnräder in vollem Umfange zu trifft.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der *Teilungsgenauigkeit*. Dabei handelte es sich zunächst darum, ein wirklich genaues Teilrad zu schaffen, an welchem Problem wir seit Jahren rastlos arbeiten, nachdem sich gezeigt hatte, dass alle käuflichen Räder den heutigen Anforderungen bei weitem nicht genügen. Auch hierbei kann nur etappenweise *vorgegangen* werden, denn alle hiefür nötigen Hilfsorgane sind mit solchen Fehlern behaftet, dass das Endprodukt unmöglich im ersten Mal genau sein kann. Man muss vielmehr zufrieden sein, wenn dabei eine solche Verbesserung herauskommt, dass das einmal korrigierte Teilrad tauglich ist zur Vervollkommnung der genannten Hilfsorgane, mit welchen dann wieder eine weitere Verbesserung des Hauptrades vorgenommen werden kann. Auf diese Weise muss es schliesslich möglich werden, den praktisch überhaupt erreichbaren Grad von Genauigkeit zu erreichen, welcher ebenfalls wieder mit Tausendstels mm rechnen muss. Es dürfte einleuchten, dass für alle diese Arbeiten besonders Mess- und Arbeitsmethoden ersonnen werden mussten und dass bei allen diesen Operationen die peinlichste Sorgfalt beobachtet werden muss. Es mag Ihnen vielleicht auch scheinen, dass das Streben nach so grosser Profil- und Teilungsgenauigkeit zu weit gehe, und dass auf diese Weise die Grenze der Wirtschaftlichkeit bald erreicht werden müsse. Sicher ist es nicht erforderlich, dass jedes Zahnrad mit dieser Präzision ausgeführt wird, aber ebenso sicher ist, dass die moderne Technik mit ihrem immer rascher laufenden Kraftmaschinen heute schon Anforderungen stellt, welche von dem alten Zahnrad nicht erfüllt werden können. Ich erinnere blos an die Kraftübertragung von Dampfmaschinen auf Arbeitsmaschinen aller Art, die man schon längst gerne mit Zahntrieben bewirkt hätte, wenn diese befriedigen würden, anstatt die Tourenzahl der Turbinen künstlich hinunter und diejenige der Arbeitsmaschinen künstlich hinaufzuschrauben. Und der einzige Grund, warum das Zahnrad nicht befriedigte, war seine ungenügende Genauigkeit, welche nicht nur einen stark lärmenden, sondern auch den Lagern ausserordentlich schädlichen vibrierenden Gang verursachte. Dass es bei diesen Getrieben in der Tat nur auf äusserste Genauigkeit ankommt, bewiesen die mit geschliffenen Maagrädern erzielten Resultate, welche eine unserer in der Turbinenbranche führenden Schweizerfirmen dazu veranlasste, die bisher übliche Tourenzahl ihrer normalen Typen von 3000 auf 6000 Touren zu erhöhen. Und sie wird auch hierbei nicht stehen bleiben, sondern mit der weiteren Vervollkommnung der Zahnräder weiterschreiten. Was ferner die sicher kommende, mit noch viel höheren Tourenzahlen laufende Gasturbine dem Zahnradbau für neue Probleme stellen wird, lässt sich heute nur ahnen; sicher ist nur eins, dass in erster Linie eine weitere Steigerung der Genauigkeit erforderlich sein wird.

Unter diesem Gesichtspunkt betrachtet, erscheint das Streben nach äusserster Präzision wohl kaum mehr als besondere Liebhaberei. Auch dürfte einleuchten, dass das unablässige Kontrollieren und Vervollkommen der erreichten Resultate auch derart vervollkommend auf die Maschinen und deren Arbeit wirkt, dass die wirtschaftlich zulässige Grenze für die Genauigkeit immer weiter gesteckt wird, so dass auch das billige Produkt von selber immer genauer und besser ausfällt, welches Streben sich heute auf allen Gebieten des Maschinenbaues mehr und mehr Geltung verschafft.

Neben der Erzielung hochgradiger Genauigkeit ist im Zahnradbau die Erreichung möglicher *Haltbarkeit der Profile* der wichtigste Faktor.

Bestimmend für diese ist neben möglichst günstiger d.h. vorwiegend rollender Abwicklung natürlich auch die Wahl geeigneter Materialien. Denn den Zahnradern werden durchschnittlich derartige Leistungen zugemutet, dass nur die gegen Bruch und Abnutzung widerstandsfähigsten Materialien genügen können. Das speziell gegen Abnutzung widerstandsfähigste Material ist gehärteter Stahl. Für die Fälle schwerster Beanspruchung verwendet man daher schon längst im Einsatz gehärtete Zahnräder. Leider leidet deren Genauigkeit beim Härten stets erheblich, sodass sie schon bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten stark lärmend laufen. Diesem Uebelstand kann heute durch das Schleifen der Profile begegnet werden. Das Schleifen hat aber eine viel grössere Bedeutung. Denn es ist das wirksamste Mittel zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Abnutzung, wie sich aus zahlreichen Anwendungen geschliffener Ritzel im Tramwaybetrieb einwandfrei ergeben hat. Da näheres hierüber in einem kürzlich herausgekommenen Prospekt meiner Firma erwähnt ist, welcher Interessenten gerne zur Verfügung gestellt wird, so brauche ich mich an dieser Stelle wohl nicht näher auf diese interessante Tatsache einzulassen. Es genügt die Erwähnung, dass dieselbe auf der polierenden und verdichtenden Wirkung beruhen, welche die glatten, geschliffenen Profile gehärteter Ritzel auf den weichen Profilen gehobelter Räder ausüben. Erfahrungsgemäss ergibt sich nämlich eine *drei- bis vierfache Lebensdauer* solcher ungehärteter Räder, welche mit gehärteten und geschliffenen Ritzeln zusammenlaufen gegenüber solchen, die mit ungehärteten oder gehärteten aber nicht geschliffenen Ritzeln zusammenarbeiten. (Vergleiche Figuren 3 und 4 von Tafel II).

Nachdem ich Ihnen nunmehr einen Einblick in das Wesen und die Vorzüge der Maagverzahnung und in die konstruktive Basis der Maagmaschinen verschaffen durfte, aus welchem die theoretisch und praktisch geschlossene Einheit unserer Fabrikationsmethoden hervorging, so erlauben Sie mir wohl noch einen ganz kurzen Streifzug durch die verschiedenen Zweige des Maschinenbaues, für welche die Verwendung von Maagrädern besondere Vorteile bietet bzw. bei denen die sinngemässe Auswertung der durch sie gebotenen Vorzüge in konstruktiver oder anderer Hinsicht befruchtend zu wirken vermag.

Sehen wir uns zunächst in dem grossen Gebiet *des Werkzeugmaschinenbaues* um, so erkennen wir in erster Linie, dass durch die grosse Genauigkeit der Maagräder ein wirksames Mittel zur Steigerung der Antriebsgeschwindigkeiten geboten wird, was eine gedrängtere und damit leichtere und billigere Dimensionierung aller der Transmission dienenden Organe gestattet. Im besonderen Masse gilt dies von den in jüngerer Zeit so beliebt gewordenen Räderkasten für die sog. Einscheibenantriebe, welche bei Verwendung gehärteter und geschliffener Räder ausserordentlich klein und leicht ausfallen. Ferner bieten die kräftigen Zähne von Ritzeln mit kleiner Zähnezahl die Möglichkeit des Baues kräftiger Schlussantriebe (Tafel I, Fig. 1) an Fräsmaschinen und dergleichen, und der theoretisch richtige Eingriff aller Getriebe ergibt einen glatten und sauberen Schnitt. Besonders wertvoll für den Konstrukteur ist endlich die vollständige Freiheit in der Wahl der Teilung und die Verwendbarkeit auch kleinster Zähnezahlen (Tafel I, Fig. 2), welche in vielen Fällen zu wesentlichen Vereinfachungen und damit zu ebensolcher Verbilligung der Konstruktionen führt.

Ein weiteres grosses Verwendungsgebiet für Zahnräder aller Art bildet *der Hebezeug- und Förderwerksbau*, bei welchem besonders die kräftigen Verzahnungen und die Anwendung grosser Uebersetzungen mit kleinster Ritzelzähnezahl gefordert wird.

Ein drittes sehr ausgedehntes Gebiet umfasst die *Textilmaschinen* aller Art. Hier handelt es sich vor allem um billige und doch gut laufende Räder, welche auf keiner Maschine rationeller hergestellt werden können als auf unserer Hobelmaschine.

Im Gegensatz hierzu verlangen die *Druckereimaschinen* wegen der stets zunehmenden Geschwindigkeiten zwar ebenfalls preiswerte, aber vor allem sehr genaue Räder. Mit Maagrädern ausgerüstete Pressen ergeben tatsächlich erheblich sauberen und schärferen Druck als andere.

Ein besonders für die Verwendung von Maagrädern interessantes Gebiet bilden die *Zahnradpumpen* (Tafel I, Fig. 3 u. 4). Nicht nur lassen sich mit solchen speziell bei Verwendung geschliffener Räder ausserordentlich hohe Drücke erzielen, sondern es ist auch der volumetrische Wirkungsgrad bei passender Wahl der Verzahnung sehr gut. Durch Verwendung von Schraubenträgern lässt sich zudem auch ein mechanischer Wirkungsgrad erzielen, welcher denjenigen der besten Zentrifugalpumpen gleichkommt.

Auch die *Steuerräder von Diesel- und Gasmotoren* (Tafel I, Fig. 5 u. 6) werden besonders vorteilhaft auf Maagmaschinen gehobelt, da deren Genauigkeit einen praktisch spielfreien und völlig gleichmässigen Gang ergibt, ohne dass es nötig wäre die Räder einzuschmirgeln, wie dies bei den sonst gebrauchten gefrästen Schraubenträgern der Fall ist.

Von hoher technischer und kommerzieller Bedeutung sind die geschliffenen Maagräder besonders für den *Automobilbau*. Hier traten von jeher wegen der sehr weit getriebenen Gewichtsbeschränkung aller Teile grosse Biegebbeanspruchungen und hohe Flächenpressungen auf, welchen nur gehärtete Räder aus den besten Stählen gewachsen sind. Wegen der gleichzeitig vorhandenen verhältnismässig grossen Umfangsgeschwindigkeiten konnten aber solche Räder nicht ruhig und geräuschlos genug laufen, während der ruhige Gang gerade bei Automobilrädern ein wesentliches Verkaufsmoment bildet. Aus diesem Grunde wurde die Zahnradabteilung zur Verdruss-Abteilung jeder Automobilfabrik, denn die angewendeten Mittel, d. h. das langwierige und wegen der sehr hohen Ausschussziffern sehr teure Aus-sortieren der Räder oder das barbarische und ruinöse Einlaufenlassen der Wechselkasten mit Schmirgel konnte nie zur befriedigenden Resultaten führen. Denn solche sind nur mit bestgeschliffenen Rädern zu erreichen. Zudem stellt sich die Verwendung geschliffener Räder im Automobilbau noch wesentlich billiger als diejenige ungeschliffener Räder, da jene von der Schleifmaschine vollständig einbaufertig geliefert werden und somit jedes Ausprobieren oder Einlaufenlassen entfällt. Es ist in dieser Beziehung kennzeichnend, dass während der Kriegszeit gerade die Lastwagenfabriken ausgiebigen Gebrauch von meinen geschliffenen Rädern machen, da diese den ohne weiteres tadellosen Lauf und die bequeme Montierung derselben bei der starken Beschäftigung ganz besonders hoch einschätzen. Aber auch der Luxuswagenbau wird sich die durch das Schleifen der Zahnrad gebotenen Vorteile sofort zu Nutzen ziehen, sobald er wieder zu normaler Tätigkeit zurück gekehrt sein wird, und ich bin überzeugt, dass es im Automobilbau in kurzer Zeit ebenso selbstverständlich ist, die Zahnprofile zu schleifen, wie irgend welche andere gehärteten Bewegungsorgane, nachdem durch das Maag'sche Schleifverfahren ein mechanisch einwandfreies und wirtschaftlich rationelles Mittel dazu gegeben ist.

Das gleiche gilt vom jüngsten, und zugleich anspruchsvollsten Spross des Maschinenbaues, nämlich dem *Luftfahrzeugbau*. Die hier aufs äusserste getriebene Gewichtsbeschränkung bedingt noch in höherem Masse als im Automobilbau die Verwendung nur allerbesten Zahnrad. Namentlich gilt dies für die ausserordentlich stark beanspruchten Transmissionsgetriebe zwischen Motor- und Propeller bei Luftschiffen und grossen Flugzeugen. Hier kommen die kräftigen Zähne der Maagverzahnung und die Genauigkeit und Haltbarkeit der geschliffenen Zahnprofile in gleichem Masse zur Geltung.

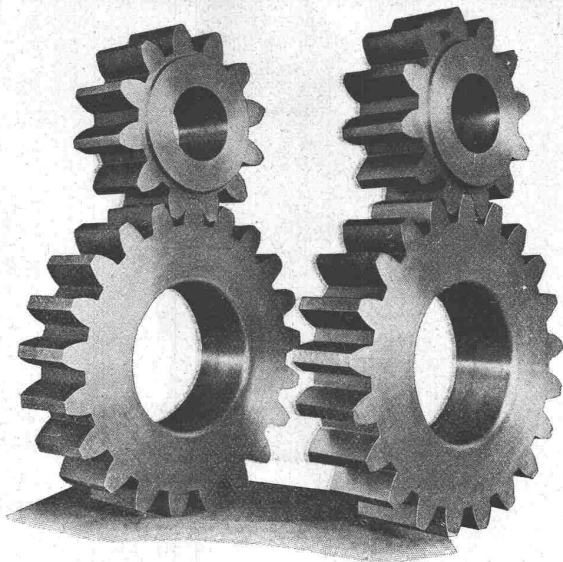
Von einem weiteren Verwendungsgebiet genauester Zahn-räder, den *Turboreduktionsgetrieben* (Tafel II, Fig. 1) bleibt nach den vorausgegangenen Ausführungen nur noch zu sagen, dass auch hier die geschliffenen Maagräder umwälzend wirken werden. Denn die Genauigkeit und Widerstandsfähigkeit derselben gestattet auch bei grossen Leistungen eine wesentliche Erhöhung der Tourenzahlen der Turbinen und eine wenigstens dreifache Flächenpressung gegenüber den bisher üblichen weichen Rädern mit Pfeilverzahnung. Dies bedingt natürlich eine namentlich im Schiffsbau höchst wertvolle Verkleinerung und Verbilligung der ganzen Aggregate und zudem eine bedeutende Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades, sodass diese Getriebe bei der kommenden Hochkonjunktur des Schiffbaues das längst gesuchte Kraftübertragungsmittel bilden werden.

Wenn ich endlich noch ein Wort über die Verwendung von Zahnradern im *Bahnbau* (Tafel II, Fig. 3 bis 6) verliere, so geschieht dies im Hinblick auf die eben in Angriff genommene Elektrifizierung unserer Bundesbahnen, bei welcher ebenfalls dem Zahnrad eine bedeutende Rolle zufallen wird. Auch hier hat sich gezeigt, dass die Kraftübertragung vom Motor auf die Laufräder der Lokomotiven wieder am rationellsten durch Zahngetriebe bewirkt wird. Die zu übertragenden grossen Kräfte bedingen natürlich auch hier die sorgfältigste Ausbildung der wichtigen und kostspieligen Getriebe und neben absoluter Betriebssicherheit und geringem Kraftverlust wird vor allem auch grösste Haltbarkeit anzustreben sein. Es wird also auch hier die kräftige und vorwiegend rollende Maagverzahnung besonders wertvolle Dienste leisten und die Verwendung gehärteter und geschliffener Ritzel, die sich im Kleinbahnbetrieb so sehr bewährt haben, wird auch hier das beste Mittel zur Erhöhung der Lebensdauer der Getriebe bilden und damit die laufenden Kosten für den Ersatz der Getriebe auf ein Minimum herunterdrücken.

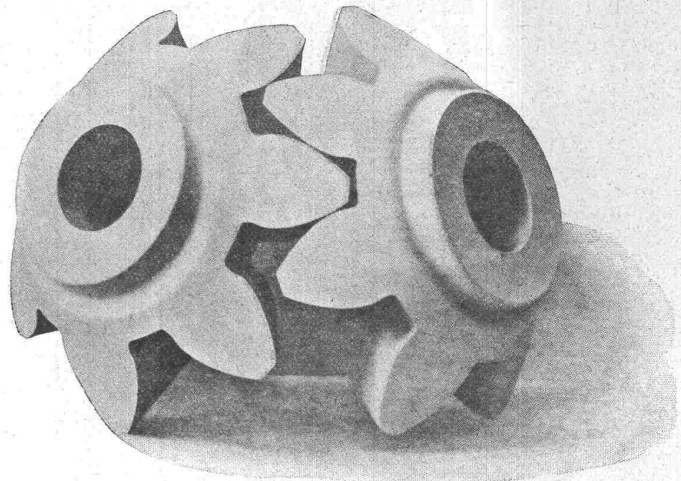
Diese wenigen Beispiele dürften Ihnen gezeigt haben, ein wie wichtiger Diener des heutigen Maschinenbaues das Zahnrad ist und wie wichtig es für den Konstrukteur ist, den Stand seiner Entwicklung zu kennen, denn nur dann ist er in der Lage, von seinen Eigenschaften den richtigen Gebrauch zu machen.

Zum Schluss gebe ich der Hoffnung Ausdruck, dass meine Ausführungen dem einen oder andern unter Ihnen Anregungen geboten haben, welche der Förderung unserer hoch entwickelten und sich in der ganzen Welt des besten Rufes erfreuenden schweizerischen Maschinenindustrie dienlich sind.

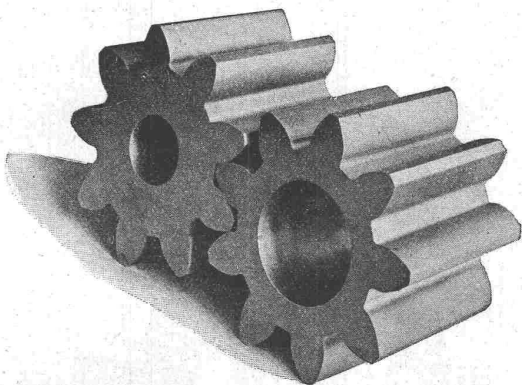
Tafel I



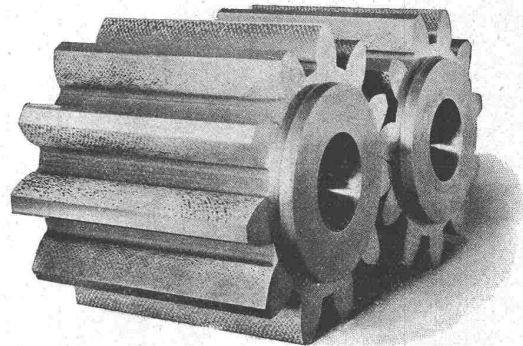
Figur 1. Schwere Triebräder aus Stahl.
Gehobelte Maag-Verzahnung.



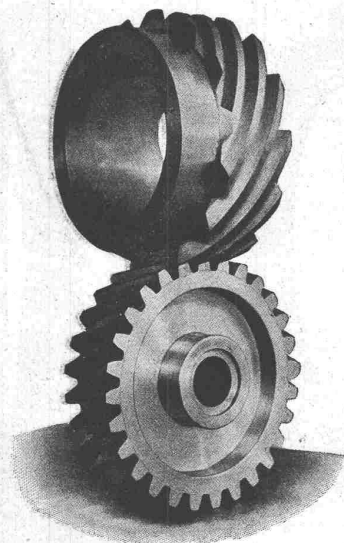
Figur 2. Kegelaradgetriebe 7/7.
Gehobelte Maag-Verzahnung.



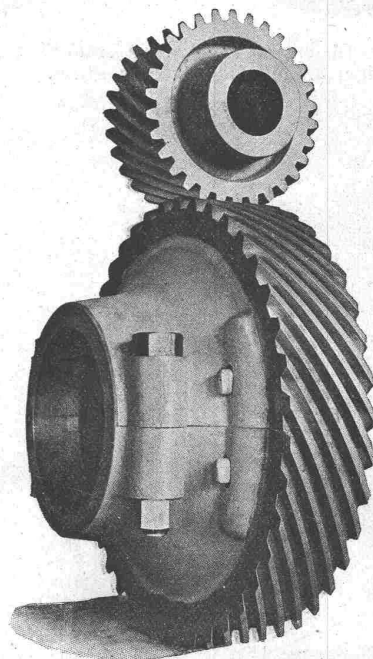
Figur 3. Oelpumpenräder 9/9 aus Grauguss.
Gehobelte Maag-Verzahnung.



Figur 4. Oelpumpenräder 10/10, aus Stahl gehärtet.
Geschliffene Maag-Verzahnung.

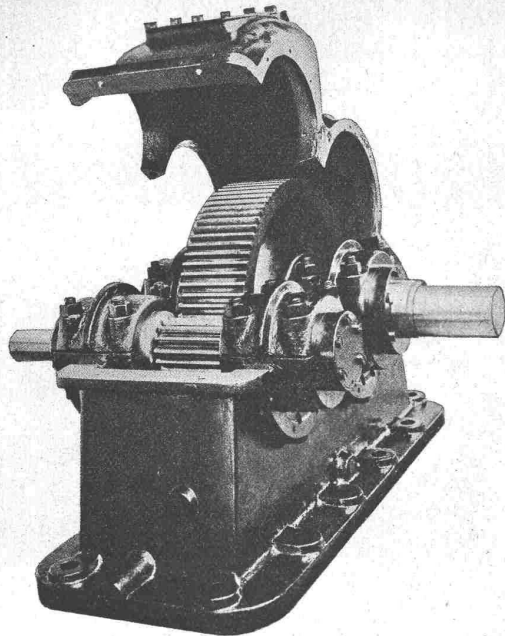


Figur 5. Steuerräder für Rohölmotor.
Gehobelte Maag-Verzahnung.

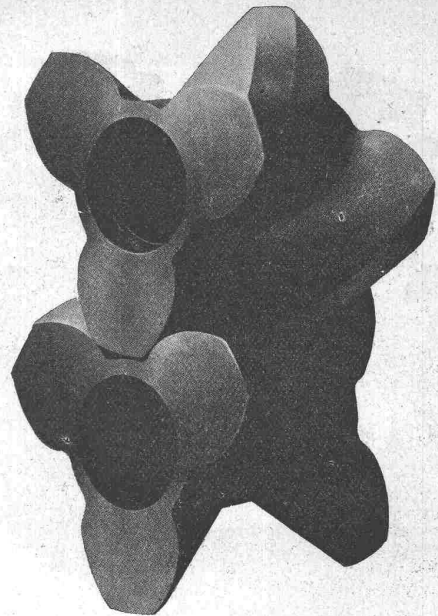


Figur 6. Steuerräder für grossen Dieselmotor.
Gehobelte Maag-Verzahnung.

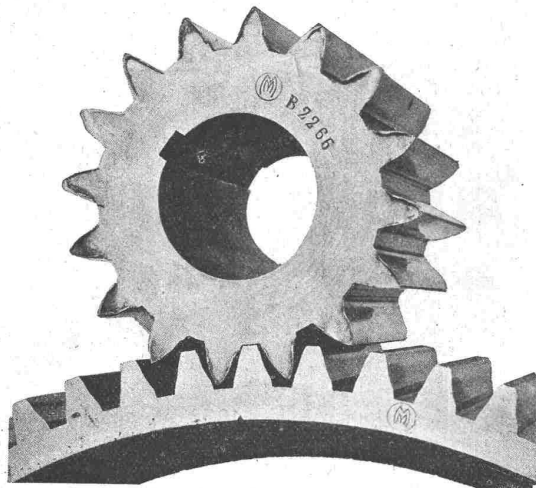
Tafel II



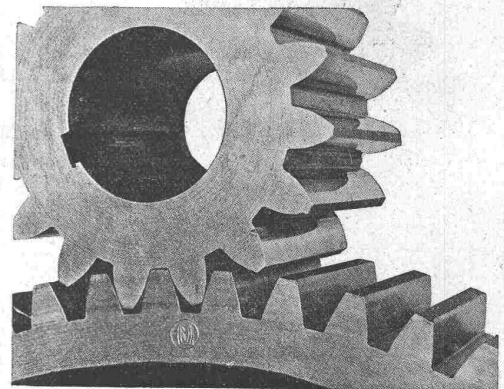
Figur 1. Turboreduktionsgetriebe mit gehärteten und geschliffenen Stirnrädern 6000/1000. 300 PS.



Schraubenrädergetriebe 3/3. Gehobelte Maag-Verzahnung.



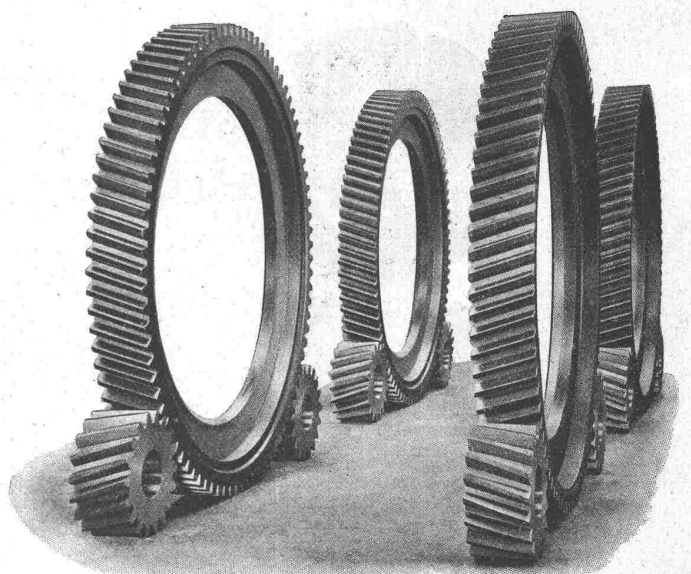
Figur 3. Gleichlang im gleichen Tram-Motorwagen gelaufene Getriebe mit Rädern aus weichem Stahlguss. Mit ungehärtetem Ritzel.



Figur 4. Mit gehärtetem und geschliffenem Maag-Ritzel.

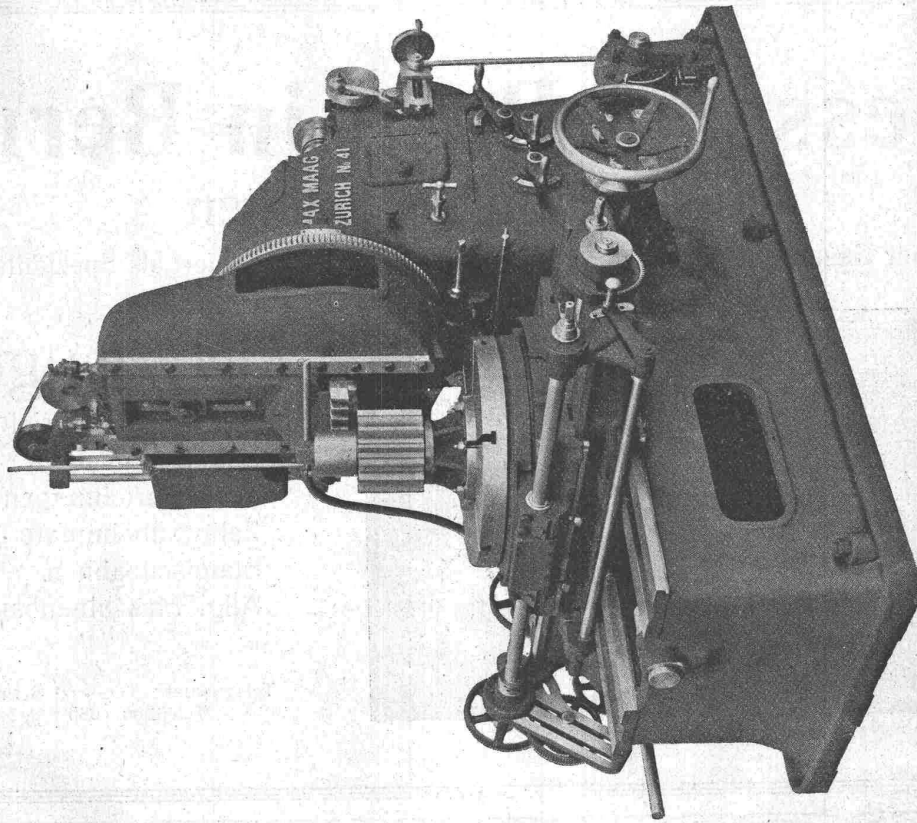


Figur 5. Pfeilradgetriebe der Jungfraubahn. Gehobelte Maag-Verzahnung.

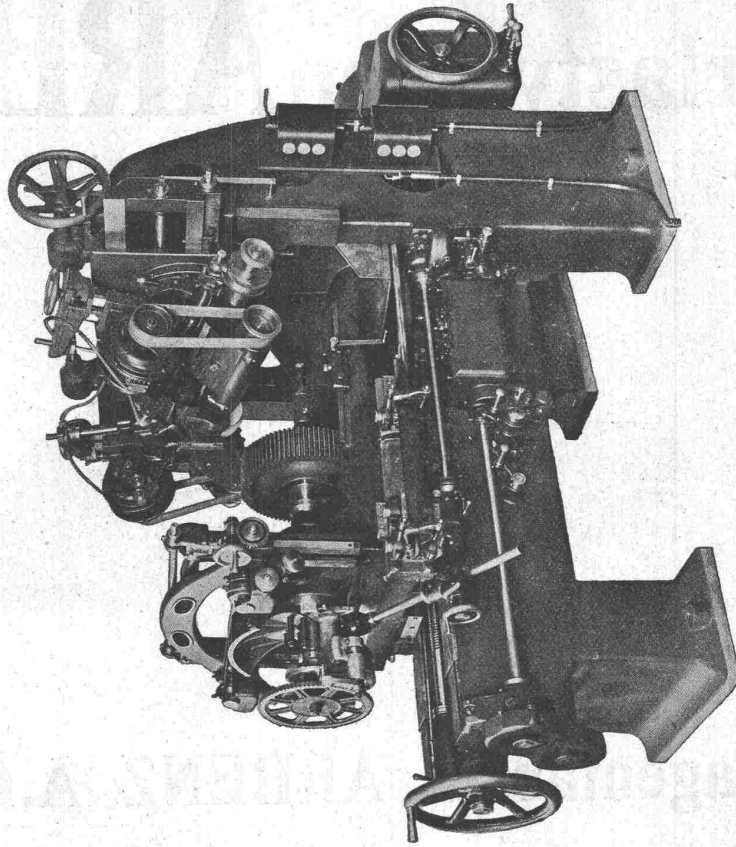


Figur 6. Triebrädersatz für eine elektrische Vollbahnlokomotive. Gehobelte Maag-Verzahnung.

Tafel III



Figur 1. Hobelmaschine, System Maag, für Stirn- und Schraubenräder bis 1 Meter Durchmesser.



Figur 2. Schleifmaschine, System Maag, für Stirnräder bis 400 mm Durchmesser.