



THE AUTOMAT

© Registered Trade Mark

GRUPPE 3

Kurventriebe

Der Keilschub als Grundlage der kurvengeordneten, automatischen Maschinen

Das Zeitwegdiagramm als Grundlage für die Konstruktion von Kurvenscheiben

Der zentrische Kurvenschub

Die Kurvenscheiben mit Schwinghebel

Die Glockenkurven

Die Kurventaster und Kurvenrollen

Der Formschluß, Der Kraftschluß

Der Steigungswinkel, Der Übertragungswinkel

Die Bewegungspläne für kurvengeordnete Maschinen

Die Ausbildung von Kurvenscheiben für Verarbeitungsmaschinen

AUTOMAT PRECISION ENGINEERING LTD
LIMMATQUAI 126 ZÜRICH I SWITZERLAND

Printed in Switzerland



Kurventriebe

Diese Getriebegruppe dient dazu, eine gleichförmige Drehbewegung in eine geradlinige oder schwingende Bewegung mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Stillständen umzuwandeln.

Die Kurventriebe können mit Recht als das mechanische Gehirn kurvgesteuerter, automatischer Maschinen angesprochen werden. Es sind die Kurventriebe, die die Bewegungen der einzelnen Teile der Maschine wie Werkzeugschlitzen, Hebel und Greifer steuern und die den Rhythmus dieser Bewegungen — und anderer Hilfsapparate — nach einem zum voraus festgelegten Bewegungsplan bestimmen.

Die Grundlage der Kurvenscheibe

Die Kurvenscheibe beruht auf nichts anderem als dem Keil. Wir haben hier eine Anwendung des Keiltriebes, wiederum eine kinematische Kette, die einen relativen Zwangslauf ergibt. Um die Funktion des Keiles bei der Entstehung der Kurventriebe richtig zu begreifen, müssen wir uns daran erinnern, wie Holz gespalten wird. Die Schneidkante dringt in das Holz ein. Während die Schneidkante mit jedem Schlag vertikal in das Holz vordringt, treiben die beiderseits Backen der Axt das Holz oben auseinander. Fig. 3.1.

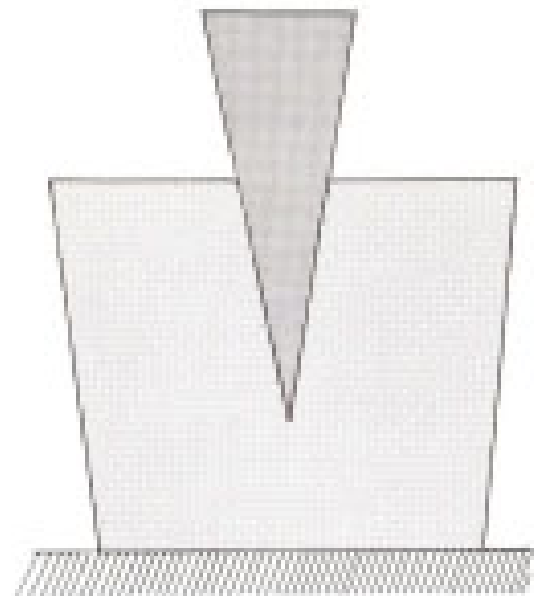


Fig. 3.1

Wie entsteht der Keil?

Zwei sich schneidende Ebenen, E und E' (Fig. 3.2) teilen den Raum in vier Teile, welche Keile heißen. Man nennt die Schnittlinie AB die Scheitellkante, die beiden Ebenen die Schenkeflächen oder Seiten.

Errichtet man in jeder Seite eines Keils im gleichen Punkt der Scheitellkante eine Senkrechte auf die Scheitellkante, so heißt der von den zwei Senkrechten CD und CF gebildete Winkel DCF der *Keilwinkel* (Neigungswinkel der beiden Ebenen).

Der Keilwinkel hat ebenso viele Winkelgrade als der Keil Keilgrade; er ist das Maß der Keile. Er gibt die Größe der Drehung an, die eine Seite des Keils um die Scheitellkante machen muß, um in die Lage der anderen zu gelangen.

Nach der Größe des Keilwinkels unterscheidet man spitze, rechte und stumpfe Keile, nach der Lage der Keilwinkel Nebenkeile und Scheitelkeile.

Es ist dieser Keil und der Keilwinkel, die bei Kurvenscheiben für die Bewegung der Glieder eines Kurventriebes eine große Rolle spielen. Wir können uns nun sehr leicht vorstellen, daß ein spitzer Keil beim Eindringen in das Holz einem kleineren Widerstand begegnet als ein stumpfer Keil.

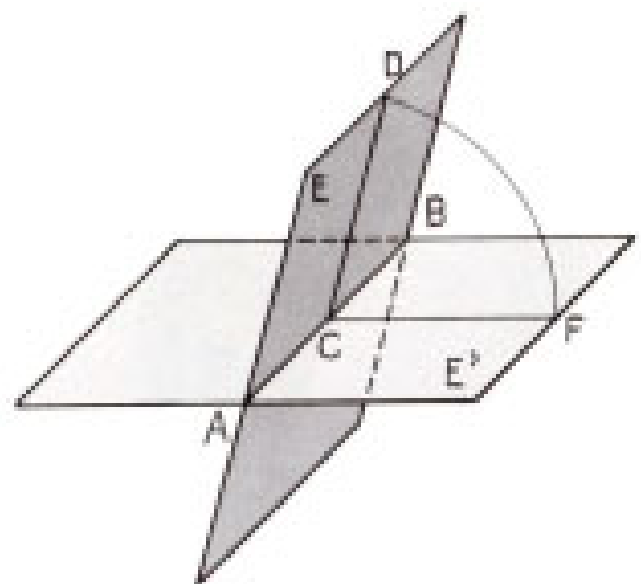


Fig. 3.2

Auf Maschinen angewendet, wird der Keil zur Bewegung der Werkzeugschlitten oder anderer Glieder der Maschine eingesetzt. Da man Maschinen ihre Bewegungen über eine zum voraus bestimmte Wegstrecke und in einer bestimmten Zeitspanne ausführen müssen, bedienen wir uns des *Zeit-Weg-Diagrammes*.

Das Zeit-Weg-Diagramm ist der Fahrplan für die Bewegungen der Maschine. Für dieses Zeit-Weg-Diagramm bedienen wir uns der Koordinaten. Wie entstehen Koordinaten?

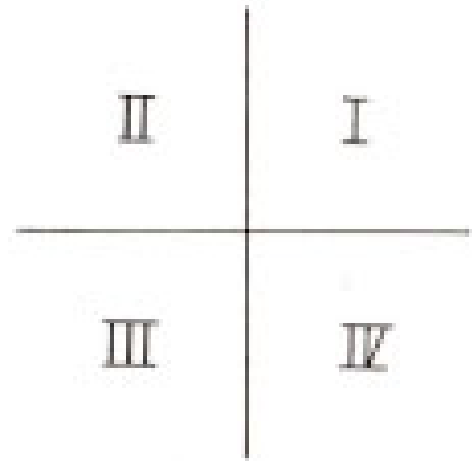


Fig. 3.3

Zwei zueinander senkrechte Gerade teilen die Ebene in vier Quadranten I, II, III, IV, Fig. 3.3. Wir besitzen den ersten Quadranten als Zeichnungsfläche. Die beiden Geraden, die ihn auf zwei Seiten begrenzen, dienen als Achsen, von denen aus Abmessungen gemacht werden. Die Lage eines Punktes A in bezug auf diese Achsen ist dann bestimmt durch seine Entfernung von jeder Achse. Fig. 3.4.

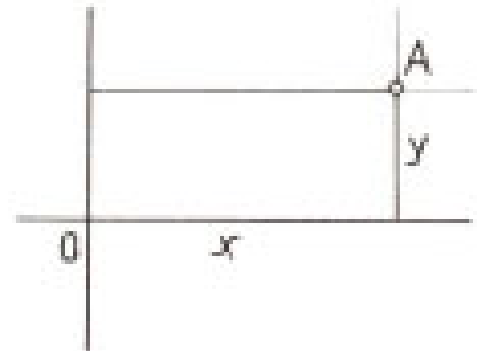


Fig. 3.4

Zieht man nämlich durch den Punkt A Parallele zu den Achsen, so erhält man ein bestimmtes Rechteck, dessen Länge und Breite jene Entfernungen darstellen. Die nach rechts gehende Achse heißt *Abzissenachse*, die aufwärts gerichtete heißt *Ordinatenachse*.

Die Maßzahl der Abmessung auf der Abzissenachse oder parallel zu ihr heißt *Abzisse* des Punktes und wird gewöhnlich mit x bezeichnet. Die Maßzahl der Abmessung auf der Ordinatenachse oder parallel zu ihr heißt *Ordinate* des Punktes und wird gewöhnlich mit y bezeichnet.

Abzisse und Ordinate nennt man die *Koordinaten* des Punktes. Um anzugeben, daß der Punkt A die Abzisse x und die Ordinate y hat, schreibt man: A (x | y).

Es ist dieses Prinzip, das bei der Erstellung eines Zeit-Weg-Diagrammes verwendet wird. Wir verwenden dabei rechtwinklige Koordinaten.

Fig. 3.5. Auf einem Blatt Papier zeichnet man ein Rechteck 120 mm lang und 30 mm hoch, teilt es in zwölf vertikale Felder, sechs horizontale à je 5 mm. Die erste Vertikale links stellt die Ordinatenachse dar, die wir mit 0 bezeichnen. Die Grundlinie ist die Abzissenachse. Auf ein Zeit-Weg-Diagramm angewendet stellt die Ordinatenachse den Gesamtweg (s) dar. Die horizontalen Parallelen sind Teilstücke des Gesamtwegs. Die Abzissenachse vom Punkt O nach rechts stellt die Gesamtzeit (x) dar. Die Vertikalen sind Teile der Gesamtzeit.

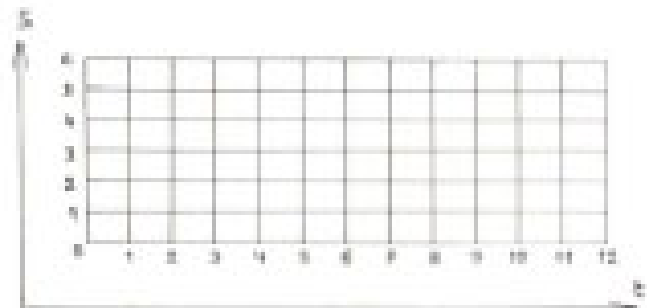


Fig. 3.5

Dieser Rahmen ist die Grundlage für das Zeit-Weg-Diagramm zur Planung einer Bewegung.

Fig. 3.6. Wir beginnen mit der Planung einer einfachen Bewegung, d. h. einer gleichförmigen Hin- und Herbewegung eines Schiebers. Vom Punkt A, dort wo sich Ordinaten- und Abszissenachse treffen (O) ziehen wir eine Gerade bis Punkt B und von dort bis C.

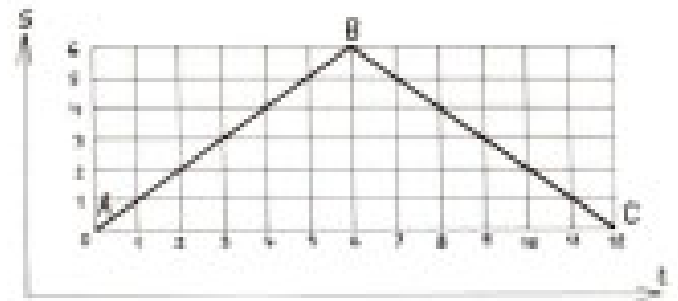


Fig. 3.6

Um diese Bewegung praktisch ausprobieren zu können, übertragen wir das Diagramm auf ein Stück Preßspan, wie auf Fig. 3.7 dargestellt. Die geeigneten Schlitz dienen für die Befestigung des Preßspanstreifens auf einer Winkelschiene. Die Abstände dieser Schlitz von Mitte zu Mitte sollen 51.4 mm betragen.

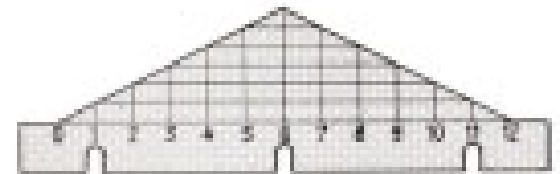


Fig. 3.7

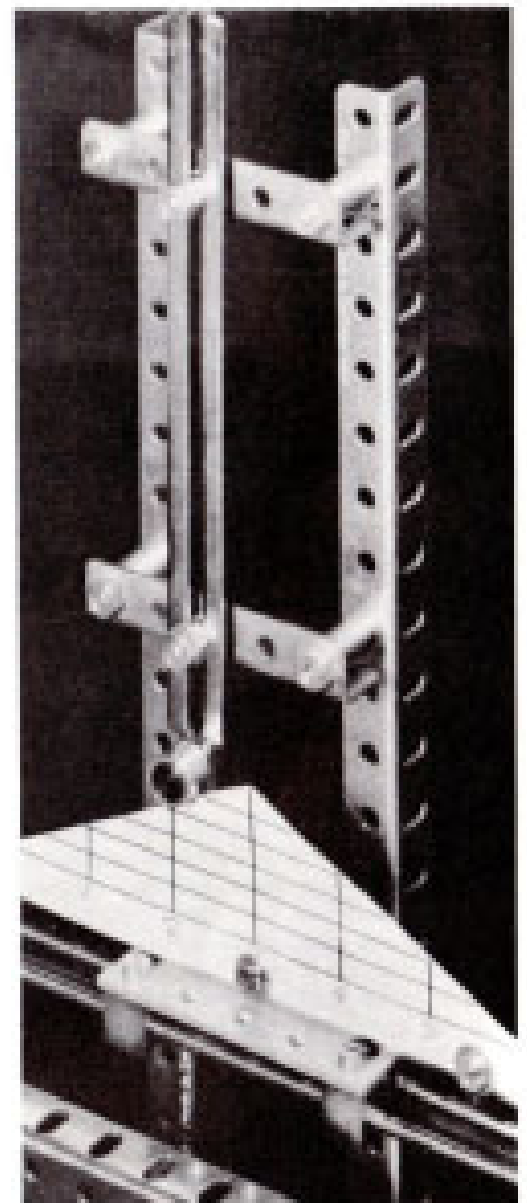


Fig. 3.8

Für die praktische Durchführung des Experimentes haben wir zwei Möglichkeiten: Mit Baukasten Nr. 25 bauen wir das Getriebemodell laut Fig. 3.8 (und Fig. 3.44) Modell 3.9, das bessere Laufeigenschaften des vertikalen Schiebers aufweist, kann mit Baukasten Nr. 33 und 1500 gebaut werden.

Das doppelte Keilprofil der Zeit-Weg-Diagramme wird auf dem horizontalen Schieber befestigt. Zwecks besseren Laufeigenschaften werden am horizontalen Schieber am besten zwei Teile 35.106 befestigt, anstelle der 35.108.

Die Kurvenrolle wird laut Fig. 3.10 montiert.

Zu Beginn des Experimentes stellen wir das Keilprofil so ein, daß die Kurvenrolle beim linken Ende, bei Punkt O aufliegt. Schieben wir das Profil nun von rechts nach links, so verschieben wir den vertikalen Schieber, der einen Werkzeugschlitten darstellen soll, um die auf dem Keilprofil angezeigten Wegstrecken. Der Keil schiebt sich unter die Kurvenrolle und schiebt den Werkzeugschlitten nach oben. Wir nennen diese Bewegung den *Hub* oder *Vorschub*. Sobald die Spitze B des Dreiecks in der Verlängerung der Längsachse des Werkzeugschlittens liegt, ist die Vorschubbewegung beendet. Er hat eine gesamte Wegstrecke von sechs Einheiten $\pm 5 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$ zurückgelegt. Bei der Weiterbewegung des Keilprofils in der gleichen Richtung geht der Werkzeugschlitten wieder zurück und erreicht bei Punkt C wieder die Grundlinie der Abszissenachse.

Wiederholen wir das Experiment, so können wir feststellen, daß bei doppelter Geschwindigkeit des Profils genau die gleiche Vorschubbewegung gekistet wird. Wird das Profil mit einer gleichförmigen Bewegung verschoben, so erzielen wir eine gleichförmige Auf- und Abbewegung des Werkzeugschlittens.

Haben wir den Keil von O bis zu seinem höchsten Punkt B innerhalb von zwei Sekunden vorgeschoben und mißt die gesamte Höhe des Dreiecks 30 mm, so haben wir eine Vorschubgeschwindigkeit von

$$v = \frac{s}{t} = v = \frac{30 \text{ mm}}{2 \text{ Sekunden}} = v = 15 \text{ mm/s}$$

Ein weiteres Gesetz kann an Hand dieses Modelles auch noch in einer praktischen Anwendung genau verfolgt werden: *Die Bewegung einer Last auf einer schiefen Ebene.* Dem Vorschub des Keils stellt sich ein Widerstand entgegen, der sich einerseits aus dem Gewicht des Werkzeugschlittens und der Kurvenrolle, andererseits aus der Reibung auf den beiden Führungshölzern im Falle von Modell 3.8 (und der Rollen im Falle von Modell 3.9) zusammensetzt. Die Gesetze über die Bewegung einer Last auf einer schiefen Ebene sollten in diesem Zusammenhang in einem Physikbuch nachgelesen werden.

Die Berührungsstelle zwischen Kurvenrolle und Keilprofil besteht aus einem Punkt, also haben wir hier ein höheres Elementenpaar, während die Kurvenrolle selbst ein Drehkörperpaar darstellt.

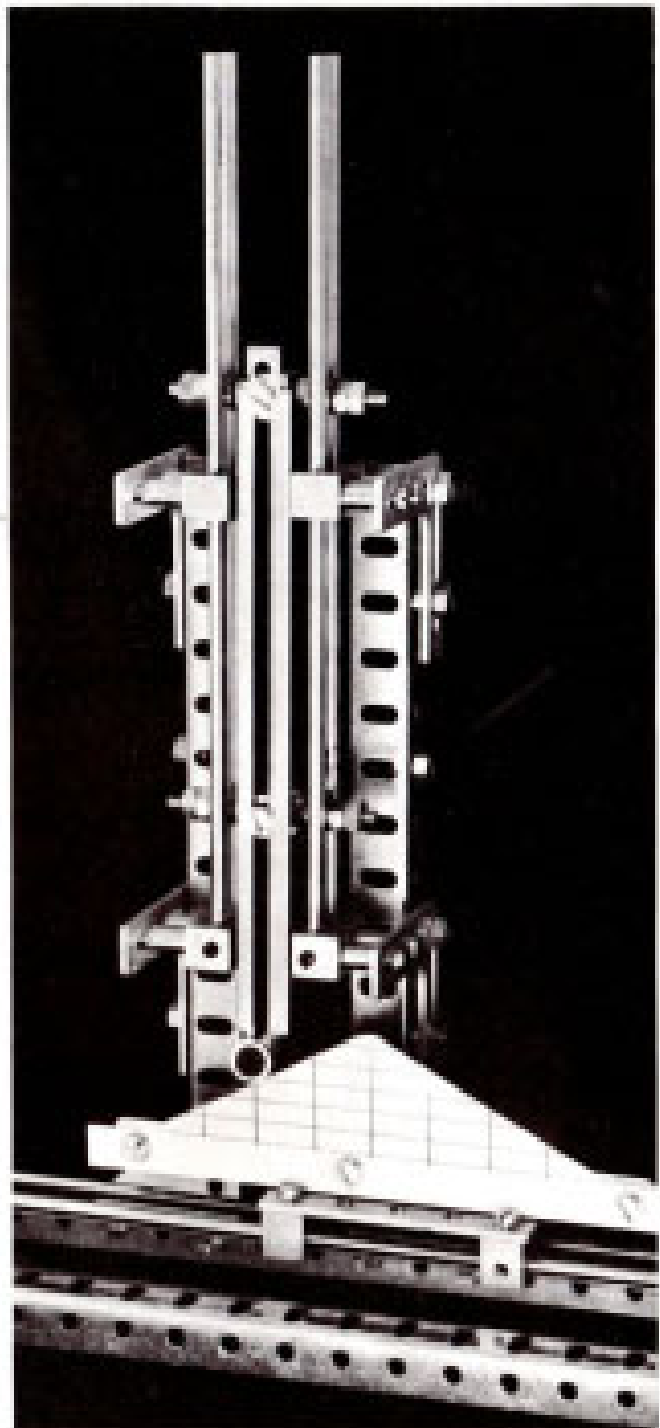


Fig. 3.9

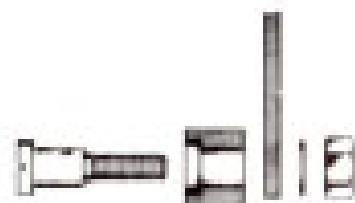


Fig. 3.10

Und hier geben wir bereits ein der Praxis angenähertes Beispiel: Nehmen wir an, daß es sich darum handelt, einen Drehstahl von seiner Ruhestellung in die Arbeitsstellung zu bringen, d. h. das Werkzeug an das Arbeitsstück heranzuführen. Das Werkstück dreht sich gegen das Werkzeug und wird durch eine separate Vorrichtung langsam vorwärts geschoben. Nach dem Drehen wird der Drehstahl wieder zurückgezogen. Die ganze Operation besteht somit aus folgenden Elementen:

- Vorschub des Werkzeuges,
- Drehen (Kontakt mit dem Werkstoff),
- Rückzug des Werkzeuges in die Ruhelage.

Fig. 3.11 zeigt, wie das Material, die zu bearbeitende Stange, vorgeschoben wird.

Wir nehmen an, daß wir für die ganze Operation folgende Zeiteinheiten zur Verfügung haben:

a) Vorschub des Werkzeuges in die Arbeitsstellung	= 3 Zeiteinheiten
b) Drehen	= 7 Zeiteinheiten
c) Rückzug des Werkzeuges in die Ausgangsstellung	= 1 Zeiteinheit
d) Stillstand des Werkzeuges (Ruhelage)	= 1 Zeiteinheit
Total = 12 Zeiteinheiten	

Wir nehmen ferner an, daß für den Vorschub des Werkzeuges von der Ausgangslage in die Arbeitsstellung ein Weg von 15 mm zurückzulegen ist. (In der Praxis wäre dieser Weg wesentlich kürzer, um die Bewegungen bei diesen Versuchen jedoch anschaulicher zu gestalten, wählen wir diesen Weg von 15 mm.)

Das Zeit-Weg-Diagramm für diese Arbeit wird in Fig. 3.12 dargestellt.

Von A—B wird das Werkzeug vorgeschoben. Von B—C ist der Drehstahl in Berührung mit dem Werkstoff. Das Werkzeug bleibt in dieser Stellung, während das Werkstück durch den Spindelstock der Maschine langsam vorgeschoben wird und sich gleichzeitig dreht. Beim Punkt C ist die Drehoperation beendet und das Werkzeug wird bis Punkt D rasch zurückgezogen. Dieser Rückzug des Werkzeuges wird durch das Entspannen einer Feder am Werkzeugschlitten bewirkt. Man zeichne nun dieses Zeit-Weg-Diagramm auf ein Stück Preßspan und verfähre gleich wie bei Abbildung 3.7. Es wird auf dem gleichen Schlitten, der vorhin für die gleichförmige Hin- und Herbewegung diente, befestigt.

Der Schlitten wird wiederum von rechts nach links geschoben (von rechts nach links deshalb, weil wir ja die Koordinaten links zu nummerieren beginnen). Der Schieber mit der Karvearolle hebt sich während drei Zeiteinheiten um einen Weg von 15 mm, d. h. um drei Horizontale (Vorschub des Werkzeuges). Obschon wir nun den Schlitten weiter nach links schieben, bleibt der Schieber während sieben Zeiteinheiten in dieser Stellung (Drehen). In einem einzigen Zeitabschnitt, von 10—11, geht der Schieber wieder in seine Ausgangslage zurück (Rückzug des Werkzeuges) und bleibt dort von 11—12.

So einfach dieses Zeit-Weg-Diagramm auch erscheinen mag, so deutlich führt es doch die Bewegungen eines kleinen Details einer automatischen Maschine vor Augen. Es zeigt die Anwendung des Prinzips des Keils für die Steuerung eines Werkzeuges.

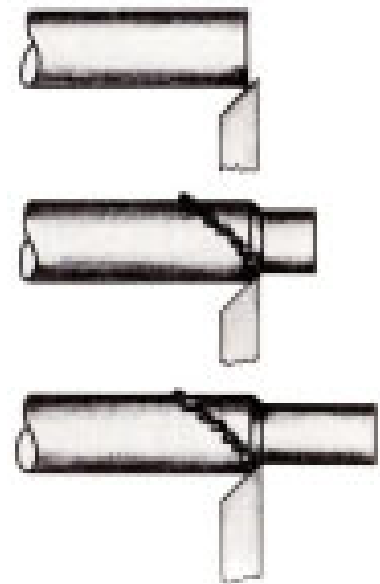


Fig. 3.11

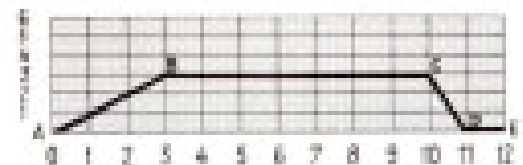


Fig. 3.12

Der nächste wichtige Schritt besteht nun darin, diese Hin- und Her-Bewegungen des Schliessens mit dem Zeit-Weg-Diagramm in eine kontinuierlich rotierende Bewegung umzuwandeln. Zu diesem Zweck werden Kurvenscheiben verwendet. In der Praxis sind dies gußeiserne Scheiben; für Lehrzwecke beim AUTOMAT-Baukasten verwenden wir jedoch Scheiben aus Preßspan. Gewöhnlicher Karton ist zu weich.

Ausgangspunkt für die Kurvenscheibe ist wiederum das Zeit-Weg-Diagramm. Wir verwenden für diesen ersten Versuch das gleiche Zeit-Weg-Diagramm laut Fig. 3.6, d. h. die gleichförmige Hin- und Her-Bewegung.

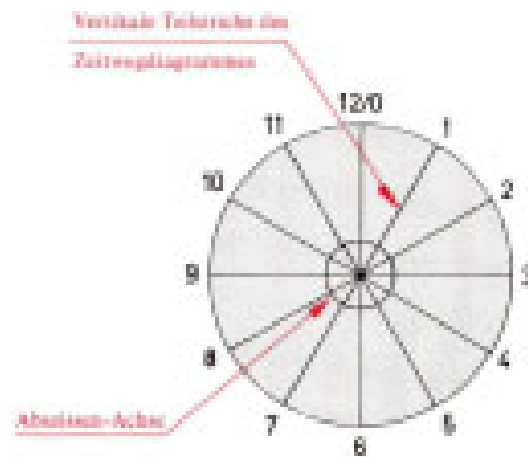


Fig. 3.13

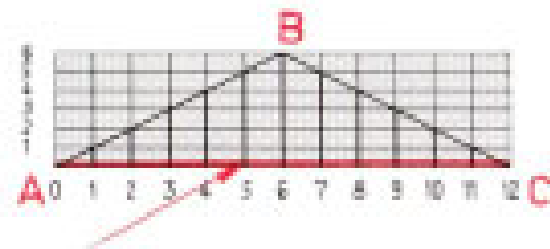


Fig. 3.14

Wir haben in diesem Falle die auf den einzelnen Vertikalen des Zeit-Weg-Diagrammes eingezeichneten Wegstrecken auf Polarkoordinaten einer Kurvenscheibe zu übertragen. Auf einem Blatt Papier zieht man einen Kreis mit einem Durchmesser von 80 mm, teilt ihn in zwölf gleiche Abschnitte à je 30°, Fig. 3.13. Diese Polarkoordinaten entsprechen den Vertikalen auf dem Zeit-Weg-Diagramm. Darnach zieht man einen konzentrischen zweiten Kreis mit einem Durchmesser von 20 mm. Dieser kleinere Kreis stellt die Abszissenachse des Zeit-Weg-Diagrammes dar. Die einzelnen Abschnitte werden am Kreisumfang von 0—12 numeriert. Man nimmt nun ein Stück Papier und überträgt die Wegdistanzen des Zeit-Weg-Diagrammes laut Fig. 3.14. Diese Distanzen, dick ausgezogen, werden auf die Polarkoordinaten des Kreises übertragen und mit einem Punkt markiert. Fig. 3.15.

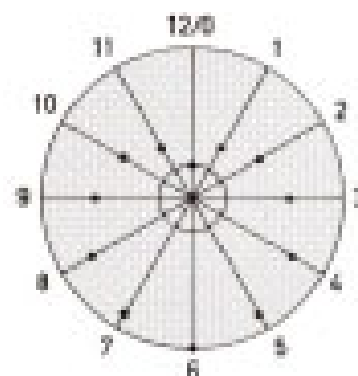


Fig. 3.15

Als nächster Schritt kommt die Verbindung der einzelnen Punkte, wodurch das Profil der Kurvenscheibe ersichtlich wird. Auf die Ausbildung der Spirale wird man besondere Sorgfalt verwenden. Die Figur, die entstanden ist, stellt zwei gegenübergestellte archimedische Spiralen dar. Fig. 3.16 ist somit die Kurvenscheibe für eine gleichförmige Hin- und Her-Bewegung laut Zeit-Weg-Diagramm Fig. 3.6.

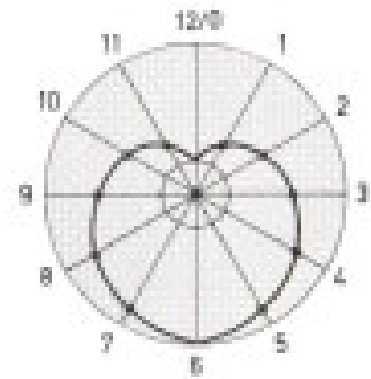
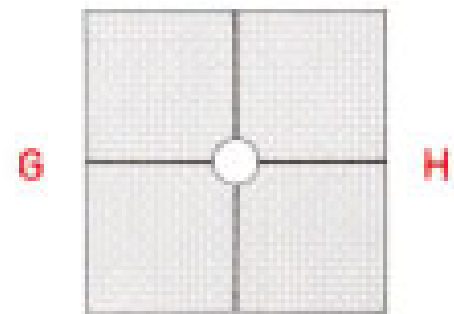


Fig. 3.16

E

Man nimmt nun eine Preßspannscheibe und zeichnet das Kreuz laut Fig. 3.17, indem man die quadratförmige Scheibe in vier gleiche Flächen teilt. Diese Linien dienen als Richtlinien für die Übertragung des Kurvenprofils auf dem Blatt Papier auf die Kartonscheibe. Dieses Kurvenprofil wird laut Fig. 3.18 ausgeschnitten, auf den Preßspan-Karton gelegt, mittels der vertikalen und horizontalen Linien ausgerichtet, und zwar so, daß die Horizontale 9—3 mit GH und die Vertikale 12/0—6 mit EF übereinstimmen.



F

Fig. 3.17

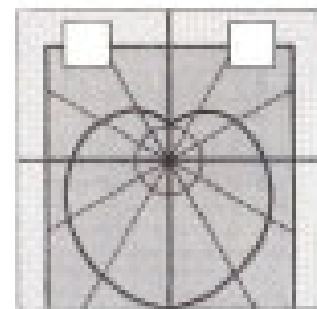


Fig. 3.18

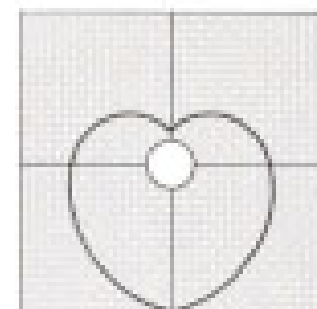


Fig. 3.19

Die Zeichnung des Kurvenprofils wird auf die Preßspan-scheibe durchgepaßt. Fig. 3.19.

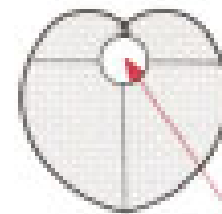


Fig. 3.20

Aufbau

Die Kurve wird sorgfältig aus dem Preßspan ausgeschnitten. Jede Unregelmäßigkeit auf dem Kurvenprofil wird nachher auf die Kurvenrolle und auf den Schieber übertragen. Die ausgeschnittene Kurvenscheibe wird wie ein Rad auf der Welle befestigt, wobei man jedoch noch zwei Zwischenscheiben 31.900 verwendet. Fig. 3.21.

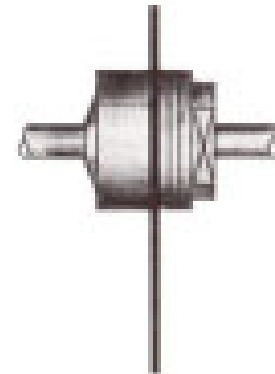


Fig. 3.21

Diese Kurvenscheibe wird auf dem Versuchsmodell laut Fig. 3.22 montiert. Ein anderes Modell mit besseren Laufeigenschaften des Schiebers kann mit den Braketen 33 und 1500 gebaut werden, laut Fig. 3.23. Man wird dabei festgestellt haben, daß die Achse des Schiebers durch die Mitte der Kurvenscheibe geht. In diesem Falle handelt es sich um einen zentrischen Kurvenschub. Für den Betrieb dieser Kurvenscheibe achte man darauf, daß bei der Ausgangslage die Kurvenrolle auf den Punkt 0 zu liegen kommt, d. h. die tiefste Stelle der Kurvenscheibe. Durch die Drehung der Kurbel stellen wir fest, daß die Kurvenrolle den Schieber in die Höhe treibt, in genau gleicher Weise, wie der Keil des halben Dreieckes des ersten Zeit-Weg-Diagrammes dieselbe in die Höhe schiebt. Sobald die Kurvenrolle den höchsten Punkt, die Spitze der Kurvenscheibe erreicht hat, also nach sechs Zeitvertikalen des Zeit-Weg-Diagrammes, haben wir den maximalen Hub oder Vorschub erreicht. Von dieser Stelle an senkt sich der Schieber wieder gleichmäßig wie derjenige in Modell laut Fig. 3.8.

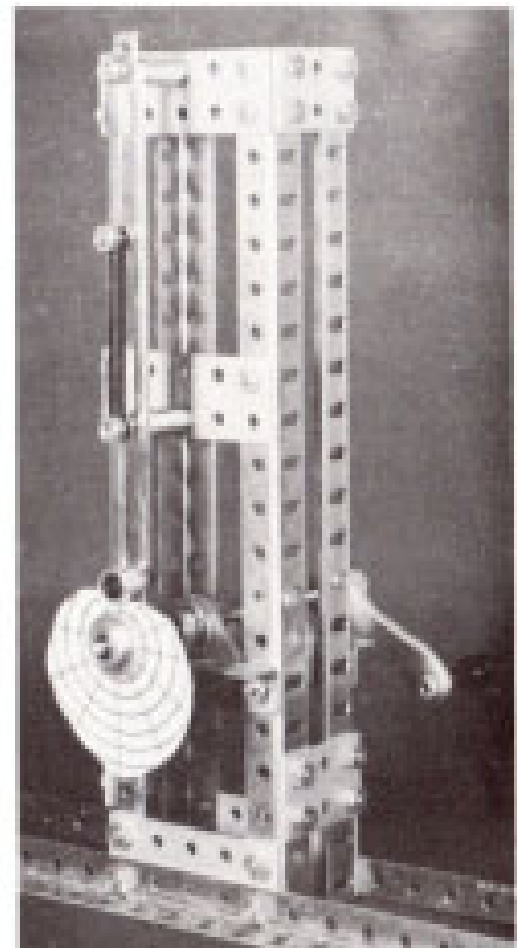


Fig. 3.22

Durch die Verwendung von Kurvenscheiben kann somit die gleiche Bewegung unendlich wiederholt werden. Mit einer Drehung der Handkurbel wird innerhalb eines bestimmten Zeitintervalles ein bestimmter Weg des Schiebers zurückgelegt und dieses Gesetz bildet die Grundlage sämtlicher kurvengesteuerter, automatischer Maschinen.

Das gleiche Verfahren wird nun angewendet für die Übertragung des Zeit-Weg-Diagrammes laut Fig. 3.12. Während drei Zwölftel (d. h. eines Viertels) der ganzen Umdrehung der Kurvenscheibe wird der Schieber emporgehoben (das Werkzeug geht in die Arbeitsstellung vor). Während sieben Zwölftel einer Umdrehung verbleibt das Werkzeug an der gleichen Stelle, während die Kurvenscheibe sich weiter dreht. (Wir sehen beim genauen Betrachten des Modells, daß der Schieber nicht absolut ruhig steht, sondern jeder, auch der kleinsten Ungenauigkeit des Kurvenprofils folgt.) Bei Koordinate 10 des Zeit-Weg-Diagrammes geht das Werkzeug (d. h. der Schieber) in die Ausgangsstellung zurück und ruht während der letzten Einheit von einem Zwölftel Umdrehung oder 30° des Kreisumfanges. Fig. 3.24.

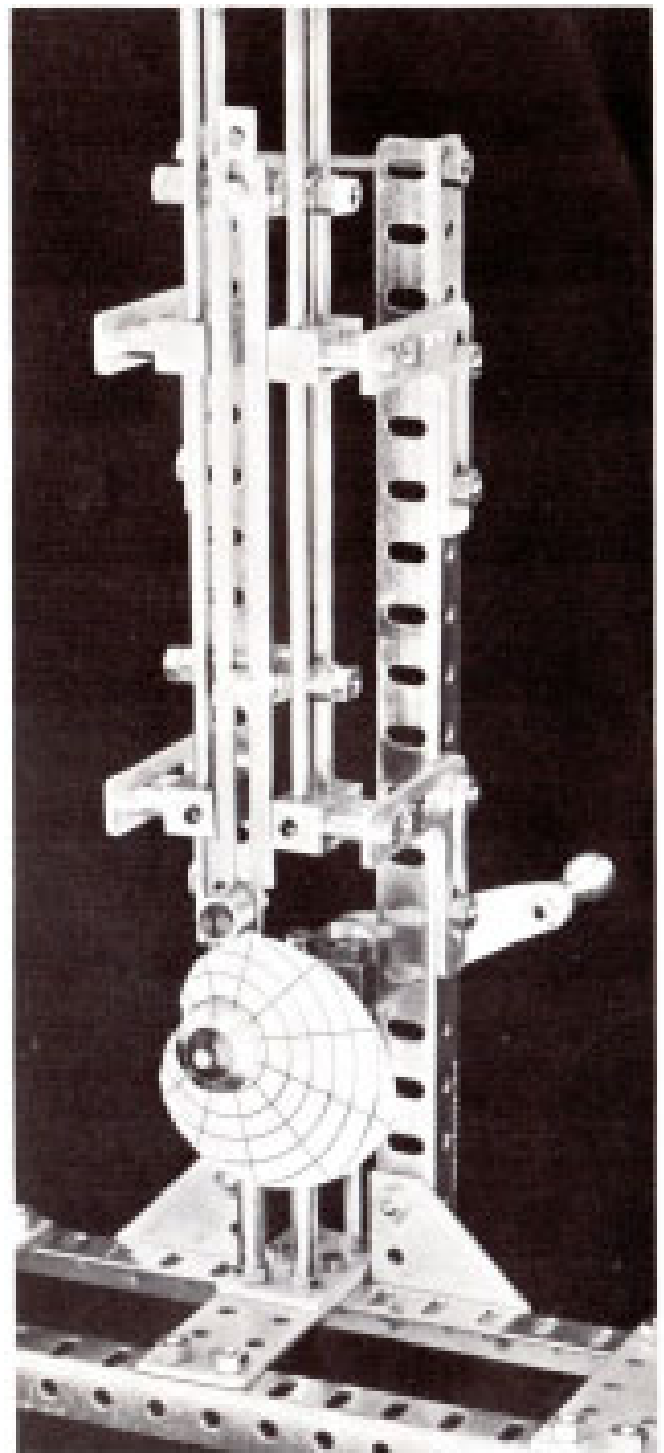


Fig. 3.23

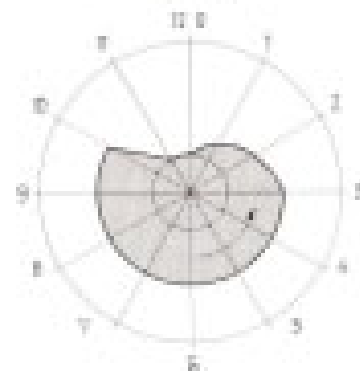


Fig. 3.24

Bis jetzt behandelten wir ausschließlich Kurvenscheiben für zentrischen Kurvenschub, bei welchem die Achse des Schiebers mit der Mitte der Kurvenscheibe übereinstimmt. In den weitaus meisten Fällen aber werden Kurvenscheiben mit Schwinghebeln verwendet. Die Verwendung von Hebeln erlaubt die Übertragung größerer Kräfte, eine geringere Abnutzung der Kurvenscheiben und ermöglicht auch größere Genauigkeit am Arbeitsende des Hebels, was insbesondere bei Drehwerkzeugen von größter Wichtigkeit ist. Ein Hebel ist ein fester Körper, welcher sich kreisförmig um einen festen Punkt, den Drehpunkt, bewegt. Fig. 3.25.

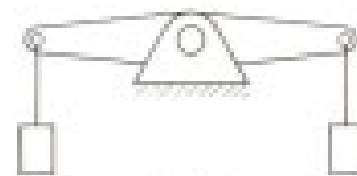


Fig. 3.25

Die Verwendung von Hebeln im Zusammenhang mit Kurvenscheiben ändert die Grundgesetze der Kurvenscheiben in keiner Weise. Auch diese Kurvenscheiben unterliegen der Wirkung des Keiles. Die Konstruktion, der Entwurf dieser Kurvenscheiben erfährt jedoch eine kleine Änderung. Um diesen Unterschied verständlich zu machen, müssen wir uns daran erinnern, daß bei den bisher entworfenen Kurvenscheiben die Wege auf den geraden Koordinaten des Zeit-Weg-Diagrammes direkt auf die Radien der Kurvenscheibe übertragen werden. Da nun bei den Kurvenscheiben mit Schwinghebeln diese Hebel einen Kreisbogen beschreiben, so müssen die Distanzen des Zeit-Weg-Diagrammes, die den Hub oder Vorschub darstellen, nicht auf eine Gerade, sondern ebenfalls auf einen Kreisbogen übertragen werden. Die Überlegung ist einfach.

In Fig. 3.26 sehen wir eine Gerade und einen Kreisbogen. Die Gerade ist die kürzeste Verbindung zwischen den beiden Punkten A und B. Der Kreisbogen, der diese beiden Punkte ebenfalls verbindet, ist länger als die Gerade.



Fig. 3.26

Die Grundlage für das Entwerfen von Zeit-Weg-Diagrammen und Kurvenscheiben sind am besten aus folgenden Bildern ersichtlich:

Fig. 3.27. Man erstelle wiederum zuerst den Rahmen des Zeit-Weg-Diagrammes, 120 mm lang, 30 mm hoch. Angenommen, der Schwinghebel gehe durch die Mitte des Zeit-Weg-Diagrammes, das für die Vorführung der Gasse verwendet wird, zeichnet man auf der halben Höhe des Zeit-Weg-Diagrammes eine horizontale Linie.



Fig. 3.27

Fig. 3.28. Angenommen, man verwende einen Schwinghebel von 75 mm Länge, lege man den Drehpunkt dieses Hebels auf der Mittellinie fest. Von diesem Punkt aus markiert man in Abständen von 10 mm die zwölf Punkte, die die Drehpunkte für die Schwinghebel, oder die Endpunkte für die Kreisbogen darstellen.

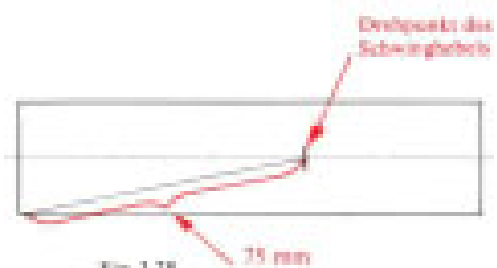


Fig. 3.28

Fig. 3.29. Von diesen zwölf Punkten aus zieht man die Kreisbogen im Rahmen des Zeit-Weg-Diagrammes.

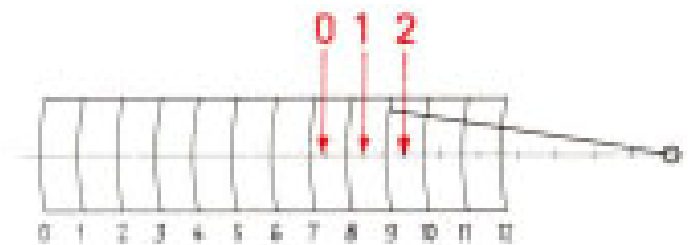


Fig. 3.29

Fig. 3.30. Wie beim Dreieck des Zeit-Weg-Diagrammes für zentrischen Kurvenschub erstellt man nun das Dreieck ABC, und vergleicht dieses Bild mit Fig. 3.6, für zentrischen Kurvenschub. Der Schwinghebel beschreibt bei jedem Zeitintervall einen Kreisbogen.

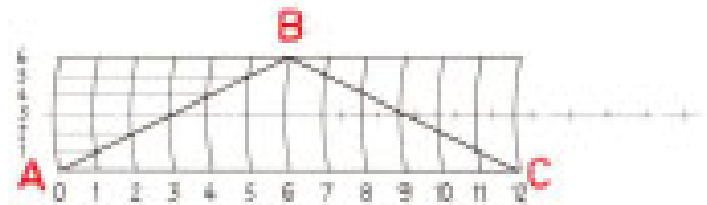


Fig. 3.30

Dieses Zeit-Weg-Diagramm wird nun wie Fig. 3.7 auf eine Karton-(Prellspan-)Scheibe übertragen und laut Fig. 3.31 zum Versuchsmodell zusammengebaut.

Der praktische Versuch zeigt sofort die Bewegungsverhältnisse dieses Schwinghebels. Genau gleich wie beim Zeit-Weg-Diagramm für zentrischen Kurvenschub hebt sich beim Verschieben des Schlittens nach links die Kurvenrolle um einen bestimmten Weg innerhalb einer bestimmten Zeiteinheit. Wir haben auf der Welle, die an einem Ende des Schwinghebels trägt, am anderen Ende einen Hebel von 30 mm befestigt. Was kann dabei festgestellt werden:

Wir finden, daß der gleichlange Hebel wie der Schwinghebel die Bewegungen des Schwinghebels genau wiedergibt, während der kürzere entsprechend kleinere Schwingungen ausführt. Die Gesetze sind sehr einfach:

Fig. 3.32. Wir wissen aus der Geometrie, daß sich die Kreisbogen proportional zu den Hebellängen verhalten. Der Kreisbogen AB ist größer als CD. Wird nun ein solcher Hebel zur Umformung der schwingenden Bewegung in eine geradlinige Bewegung eingesetzt oder verwendet, so verhalten sich die Wege wie die Sehnen AB zu CD.

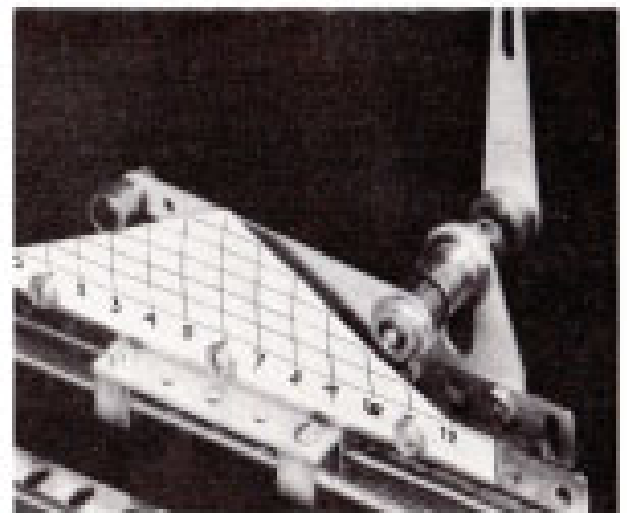


Fig. 3.31

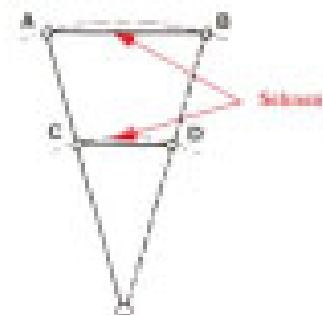


Fig. 3.32

Um dieses Zeit-Weg-Diagramm auf eine Kurvenscheibe zu übertragen, müssen wir wiederum die Länge des Schwinghebels berücksichtigen.

Fig. 3.33. Man zeichnet drei konzentrische Kreise: Einen kleinen Kreis, den Grundkreis, der die Abszissenachse des Zeit-Weg-Diagrammes darstellt, mit einem Durchmesser von 20 mm. Dieser Grundkreis kann beliebig gewählt werden, er beeinflusst aber den Durchmesser der anderen zwei Kreise. Für unsere Zwecke der Modellversuche wählen wir durchwegs einen Grundkreis von 20 mm, den Kreis der Kurvenscheibe, Durchmesser 80 mm, und den Hilfskreis, der der Länge des Schwinghebels von 75 mm entspricht. Der Hilfskreis wird in zwölf Teile à 30° eingeteilt.

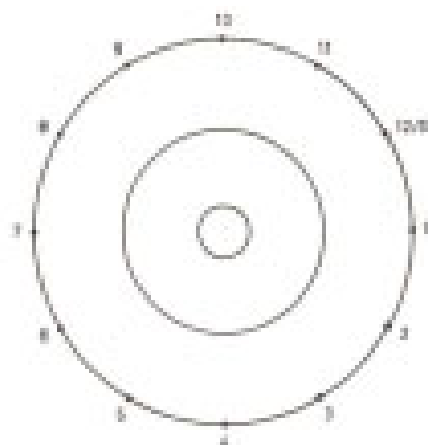


Fig. 3.33

Fig. 3.34 zeigt, wie sich dieser Hebel auf der Kurvenscheibe bewegen wird und dient dazu, den Zweck dieses Hilfskreises zu erklären. Mit einer Zirkelöffnung von 75 mm, die der Länge des Schwinghebels entspricht, wird der Kreisbogen gebildet.

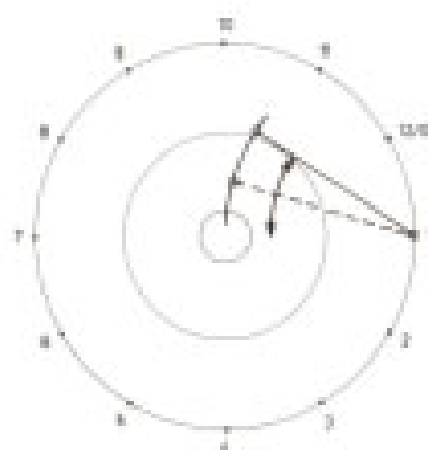


Fig. 3.34

Fig. 3.35 zeigt, wie die Kreisbogen, die der Schwinghebel beschreiben wird, auf die Kurvenscheibe übertragen werden.

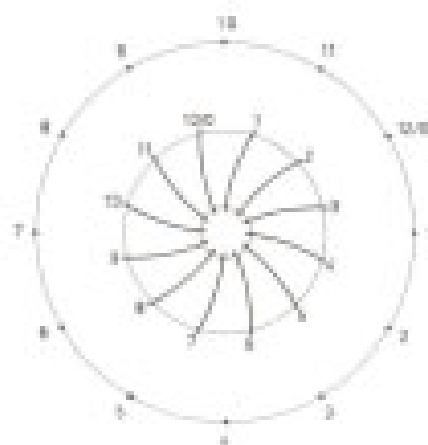


Fig. 3.35

Fig. 3.36 zeigt das Hilfsmittel, einen Kreissektor, der zur Übertragung der Distanzen des Zeit-Weg-Diagrammes auf die Kurvenscheibe dienen wird. Er hat eine Länge von 75 mm, die der Länge des Schwinghebels entspricht; der Kreisbogen soll etwa 35 mm messen.

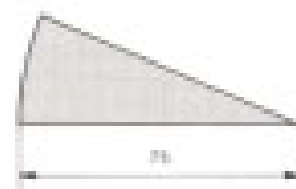


Fig. 3.36

Fig. 3.37. Die Längen des Kreisbogens zwischen der Abszissenachse und den Seiten des Dreiecks auf dem Zeit-Weg-Diagramm werden nun auf die Kurvenscheibe übertragen. Man legt dabei die Spitze des Hilfegerätes auf den Punkt des Hilfskreises, die linke Kante auf den Schnittpunkt des Grundkreises und des Kreisbogens der Kurvenscheibe. Fig. 3.38.



Fig. 3.37

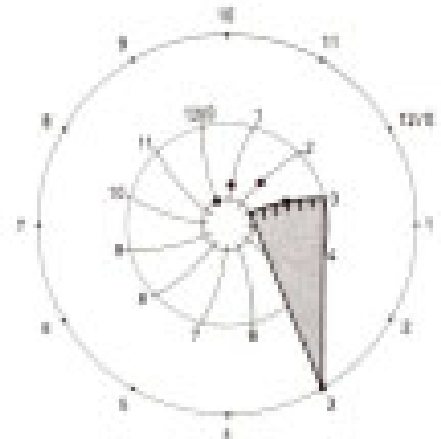


Fig. 3.38

Fig. 3.39. Die einzelnen Punkte werden miteinander verbunden und wir erhalten dabei das Profil der Kurvenscheibe für die Verwendung mit Schwinghebel von 75 mm Länge. Diese Kurvenscheibe in dieser Form kann nur mit einem Schwinghebel von 75 mm Länge verwendet werden. Wir stellen sofort fest, daß die äußere Form dieser Kurvenscheibe von derjenigen für zentrischen Kurvenschub etwas verschieden ist. Warum? Man betrachte die Stellung der Kreisbogen im Vergleich zu den Radien der Kurvenscheiben für zentrischen Kurvenschub und findet die Erklärung.

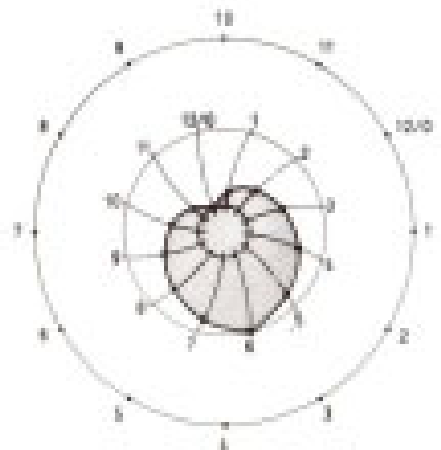


Fig. 3.39

Die Kurvenscheibe wird, wie bereits schon bei der ersten Kurvenscheibe für zentrischen Kurvenschub erklärt, auf die Preßspannscheibe übertragen, ausgeschnitten, mit einer Nabe versehen und auf der Kurvenwelle befestigt. Fig. 3.40.

Wie wir aus Fig. 3.32 erfahren konnten, verhalten sich die Sehnen zu den Kreisbögen wie die Kreisbögen zu den Hebellängen. In der Praxis wirkt sich das so aus, daß ein Fehler in der Kurvenscheibe beim gleichen Hebelverhältnis genau übertragen wird, während er beim ungleich-armigen Hebel proportional zur Hebellänge kleiner — oder größer wird.

Fig. 3.40 zeigt das Versuchsmodell mit der aufmontierten Kurvenscheibe laut Fig. 3.39.

Als erste Aufgabe versuche man, das Zeit-Weg-Diagramm laut Fig. 3.12 für die Steuerung eines Werkzeuges in eine Kurvenscheibe für Schwinghebel umzuwandeln, wobei man vorläufig annimmt, daß das Hebelverhältnis 1:1 betrage und ebenfalls ein Schwinghebel von 75 mm Länge verwendet werde. Als Grundkreis für die Abszissenachse verwende man einen solchen von 30 mm Durchmesser.

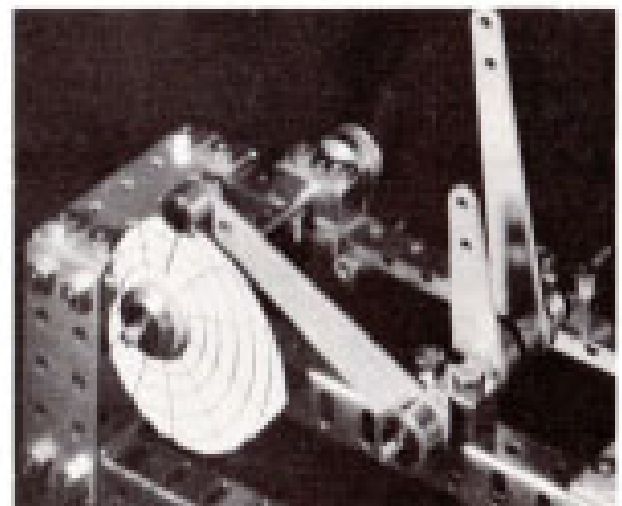


Fig. 3.40

Fig. 3.41 zeigt den Entwurf einer Kurvenscheibe für einen Schraubenautomaten (Tornos AG, Moutier, Schweiz). Bei diesem Beispiel wurde der Gesamtumfang in 360° eingeteilt. 360° entsprechen einer ganzen Umdrehung der Kurvenscheibe = Gesamtzeit für eine Operation. Innerhalb dieser Gesamtzeit t muß die Kurvenscheibe verschiedene Bewegungen des gleichen Maschinenteiles steuern. So finden wir z. B. bei der Stelle 209 den Beginn einer gleichförmigen Vorschubbewegung von insgesamt 16,5 mm, die bis zum Punkt 258 dauert, also über 49° des ganzen Umfanges. Von Punkt 258 bis 272, also während 14° , erfolgt ein Stillstand, gekennzeichnet durch den konzentrischen Kreisbogen. Über 7° , von 272–279, erfolgt nochmals ein kurzer Vorschub von insgesamt 7 mm.

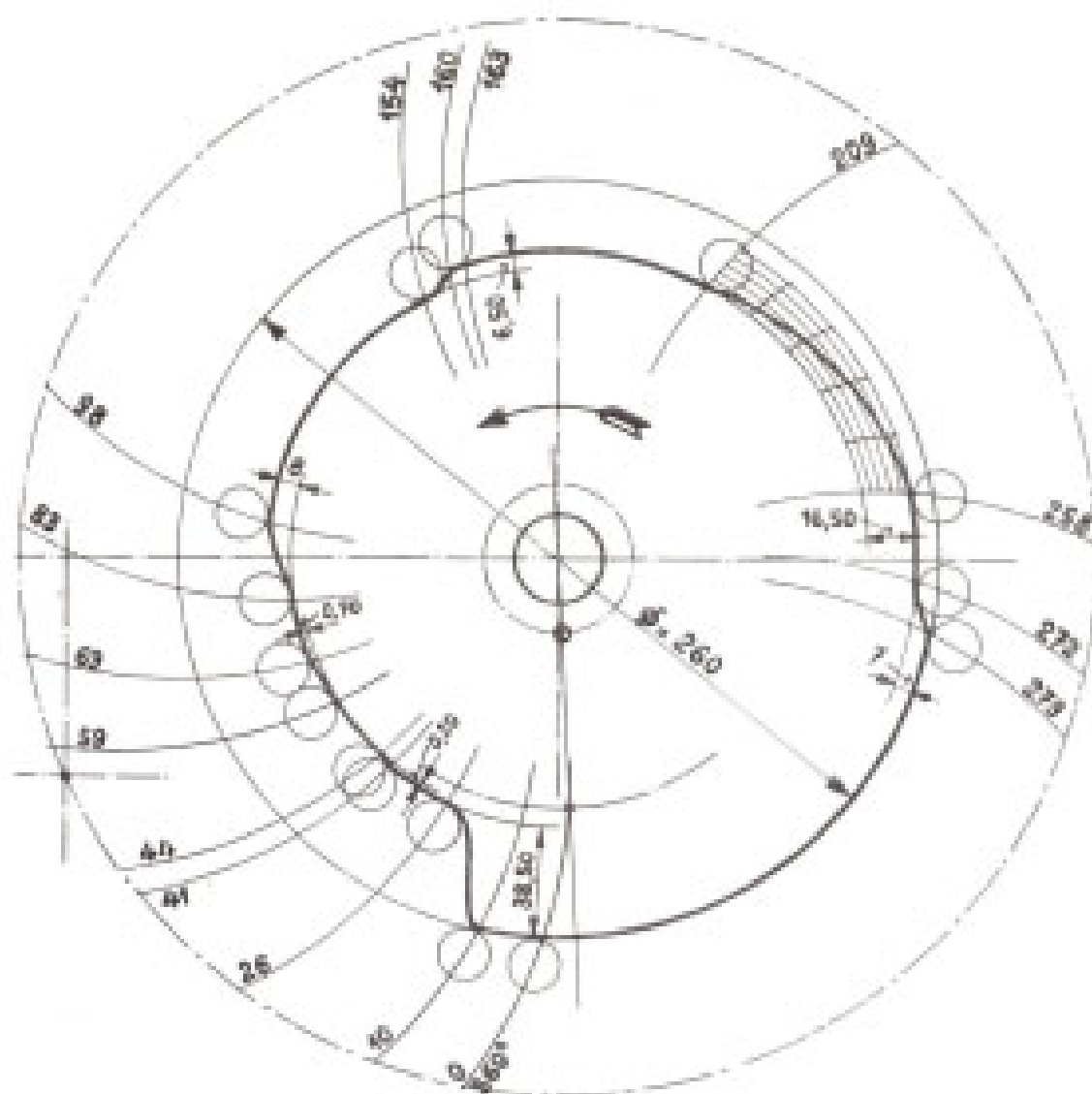


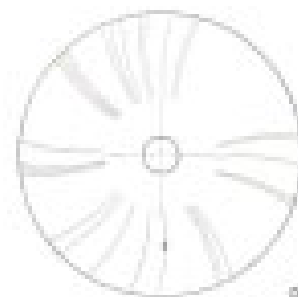
Fig. 3.41

Fig. 3.42, Bilder a—e, zeigen die verschiedenen Etappen bei der Herstellung der Kurvenscheiben von Drehautomaten: a), nachdem auf dem Arbeitsplan die zeitlichen Abläufe der einzelnen Bewegungen festgelegt wurden, die die Gesamtzeit in die Dauer der einzelnen Bewegungen unterteilen (dargestellt durch die verschieden langen Kreisbogen am Umfang der Kurvenscheiben) werden die kreisbogenförmigen Trennlinien in die Kurvenscheibe eingeritzt. Der Radius dieser Kreisbogen entspricht dem Schwinghebel des Drehautomaten, der für diese Kurvenscheibe verwendet wird, genau wie auf unserem Versuchsmodell Fig. 3.40 dargestellt. Der mit O bezeichnete Kreisbogen kennzeichnet den Anfang der Operationen und entspricht jenem Punkt des Zeit-Weg-Diagrammes, wo sich Ordinaten- und Abszissenachse schneiden.

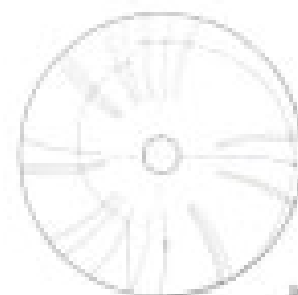
Die auf den Kreisbogen eingezeichneten Punkte entsprechen einzelnen Vorschubbewegungen (siehe Fig. 3.38), die wie auf Fig. 3.39 zum Kurvenprofil verbunden werden.

c) Dieses Profil entlang werden Löcher gebohrt und d) der äußere Teil mit einem Hammer abgeschlagen.

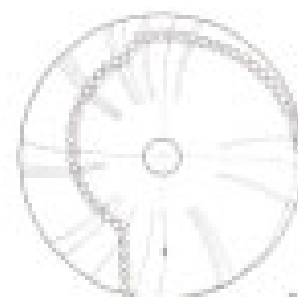
e) zeigt das auf Spezialmaschinen fertig bearbeitete Kurvenprofil.



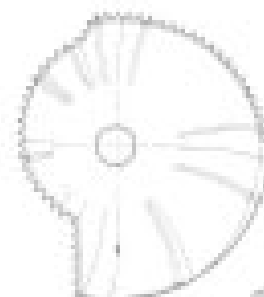
a



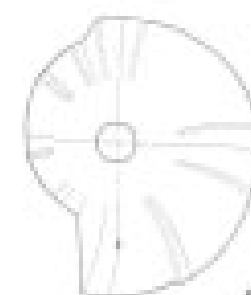
b



c



d



e

Fig. 1-43. Dieses Diagramm einer automatischen Maschine, der Tarex Einspindel-Revolverautomat der Firma Tarex AG, Geaf, zeigt sehr deutlich die Anwendung von Kurvengetrieben zur automatischen Steuerung von Bewegungen. Die Kurvengetriebe sind rot angezeichnet. Der Motor mit konstanter Drehzahl treibt über Untersetzungsgetriebe die Kurvenscheiben an. Eine Kurvenscheibe

steuert die Bewegungen des Revolverkopfes, der die Operationen Bohren, Ausritzen, Ansenken und Gewinde-schneiden ausführt. Andere Kurven kontrollieren die Bewegungen der Kupplungen zur Steuerung der Schritt-geschwindigkeit und des Drehmoments der Spindel, wieder andere Kurven steuern den Materialschub. Sämtliche Bewegungen werden im Bewegungsplan zusammengefaßt.

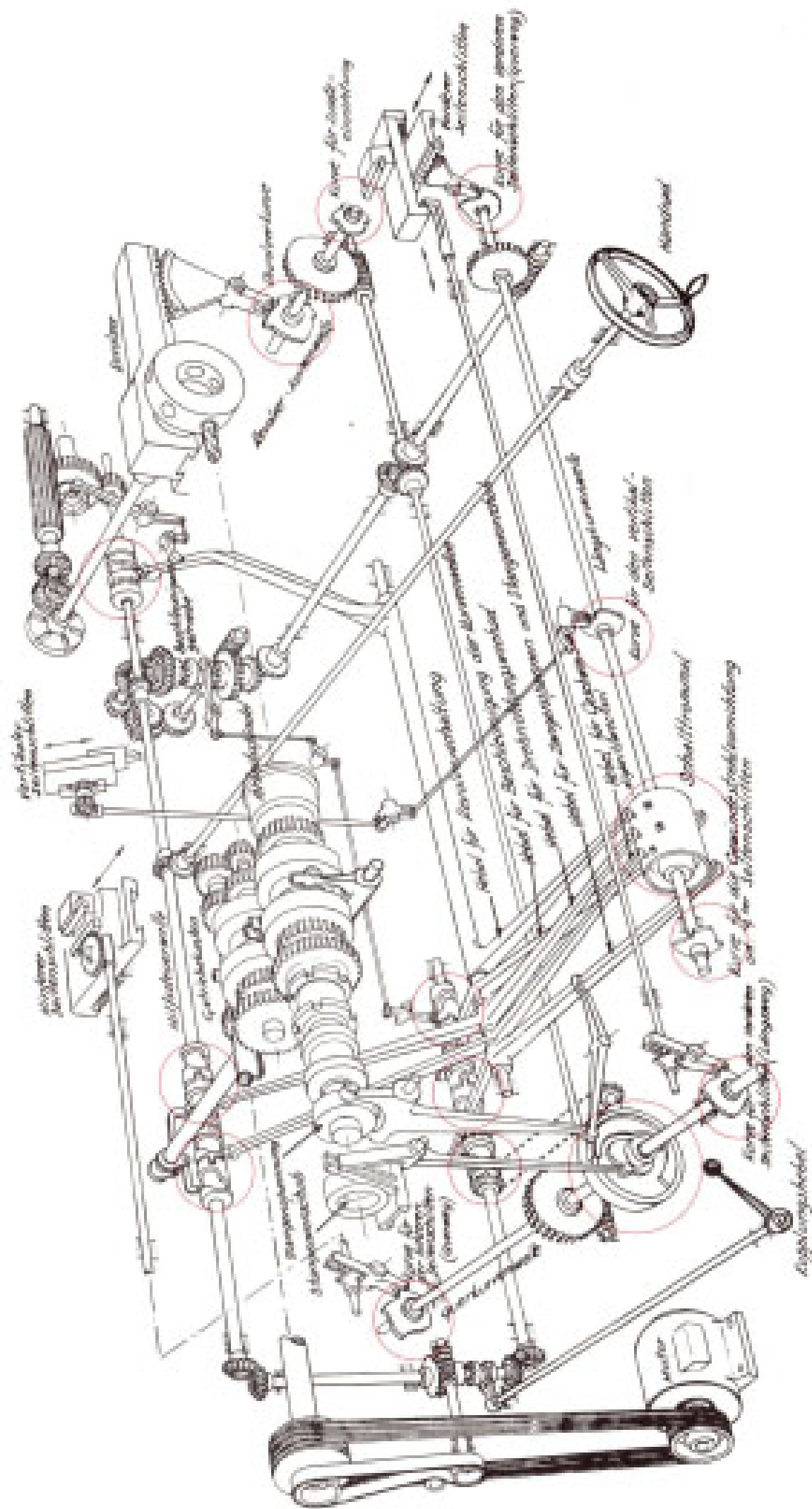


Fig. 3.44 zeigt das ganze Getriebe Modell laut Fig. 3.8.
 Fig. 3.45 zeigt das ganze Getriebe Modell laut Fig. 3.31.

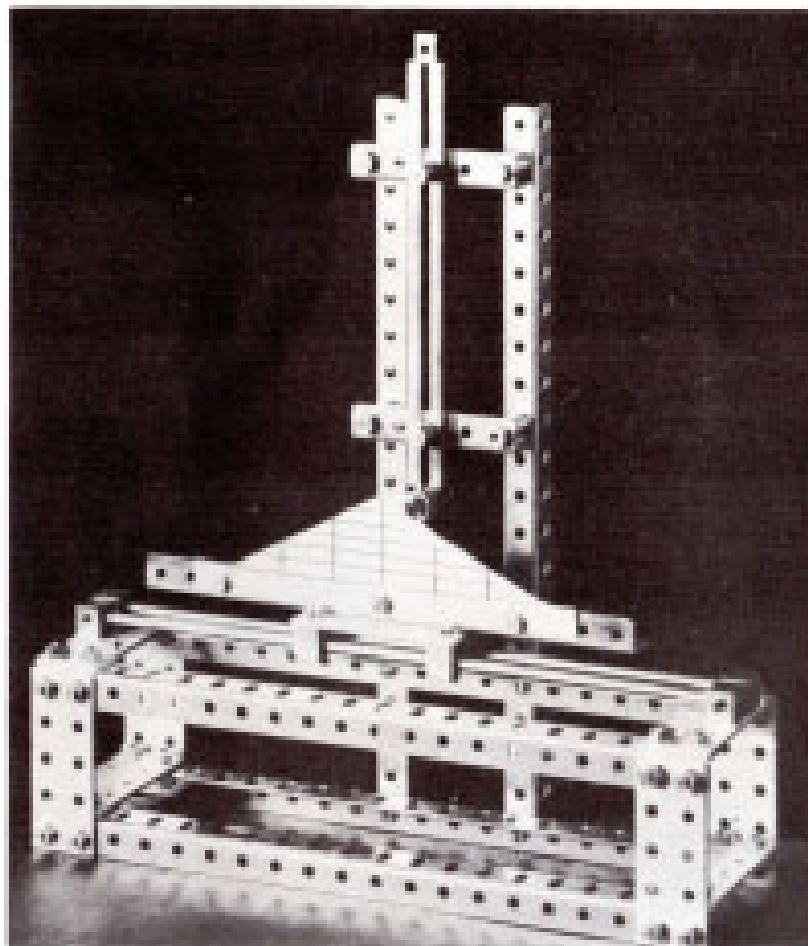


Fig. 3.44

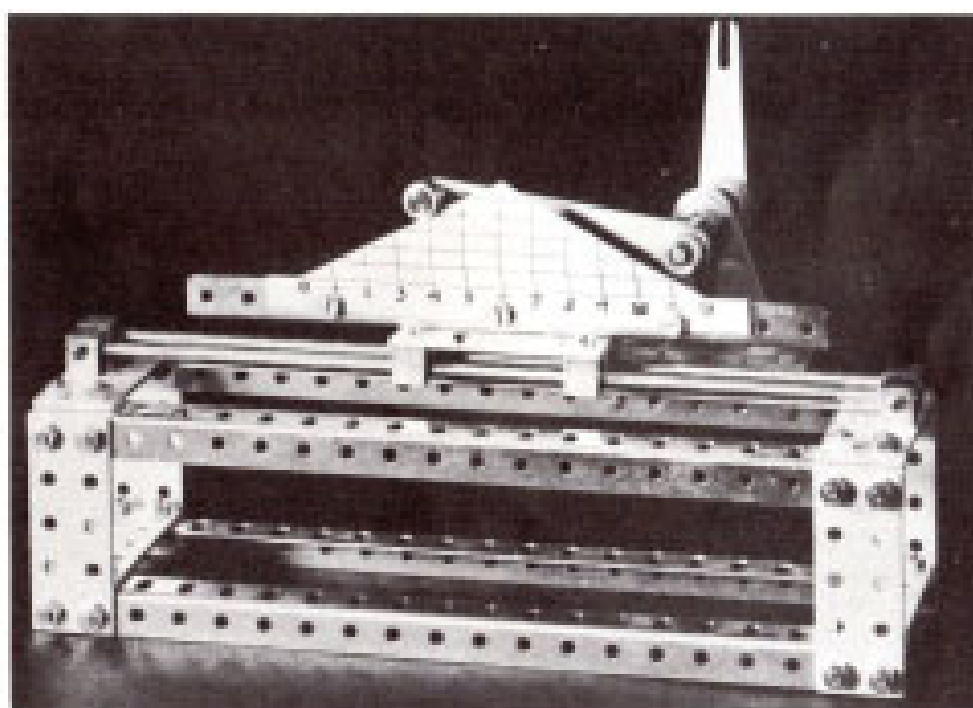


Fig. 3.45

Bis jetzt behandelten wir Kurvenscheiben, die der Gruppe der ebenen Kurvengetriebe angehören. Bei automatischen Maschinen werden jedoch sehr oft auch Glockenkurven verwendet, die der Gruppe der räumlichen Kurvengetriebe angehören. Ohne hier allein sehr auf Einzelheiten einzugehen, die der Techniker in seinem Berufe von selbst erfassen wird, ist darauf hinzuweisen, daß die Wahl zwischen Glocken- oder Scheibenkurven von den Arbeits- und Bewegungsverhältnissen der Maschine abhängt.

In der Praxis bestehen Glockenkurven aus einem gußeisernen Hohlkörper, der einer Tasse oder Glocke gleicht. Fig. 3.46. Da die Bearbeitung und das Fräsen einer solchen Glockenkurve wesentlich mehr Zeit beansprucht und schwieriger ist, werden nach Möglichkeit Getriebe konstruiert, die die gleichen Bewegungsgesetze mittels Scheibenkurven ergeben. In einzelnen Fällen und je nach der Art der Maschine können bestimmte Bewegungen nur mittels Glockenkurven gesteuert werden.

Beim AUTOMAT-Baukasten haben wir aus keine Möglichkeit, Glockenkurven wie in der Praxis herzustellen und beheben uns dadurch, daß wir das Kurvenprofil aus steifem Karton oder Blech ausschneiden und um einen besonders konstruierten Kurvenkörper wickeln.

Die Gesetze der Glockenkurven sind leicht verständlich, weil das Kurvenprofil genau dem Zeit-Weg-Diagramm entspricht. Die Koordinaten des Zeit-Weg-Diagrammes entsprechen genau der Schubrichtung des Abtriebes.

Der Kurvenkörper, Bestandteil Nr. 50.101, ein Hohlzylinder als Träger des Kurvenprofils, hat einen Außendurchmesser von 50 mm. Es handelt sich darum, das Kurvenprofil um diesen Kurvenkörper zu wickeln.

Das Profil wird zuerst auf dem Papier entworfen und nachher auf die Karton- oder Blechschleife übertragen. In diesem Falle müssen wir jedoch dieses Zeit-Weg-Diagramm dem Umfang des Kurventrägers anpassen. Der Gesamtdurchmesser des Kurventrägers beträgt 50 mm. Sein Umfang ist somit $50 \cdot \pi$. Das Blech des Kurvenprofils hat eine Dicke von 0,2 mm. Der Gesamt-Außendurchmesser der Glockenkurve mit aufmontiertem Kurvenprofil ist somit $50,4 \cdot \pi = 158,2$ mm. Für den Entwurf des Zeit-Weg-Diagrammes nehmen wir eine Abszissenachse von 158,2 mm, die in zwölf gleiche Teile einzuteilen ist. Wie läßt sich diese Distanz von 158,2 mm in zwölf gleiche Teilstrecken einteilen?

Zur Abszissenachse von 158,2 mm zieht man eine Hilfsstrecke, laut Fig. 3.47, steckt auf dieser Hilfsstrecke zwölf Teilstücke à je 10 mm ab, verbindet C mit B und zieht nun die Parallelen zu dieser ersten Linie. Die Teilung auf der Strecke AB wird nun auf den Bruchteil eines Millimeters genau. Auf diesen Punkten werden nun die Vertikalen erstellt, sowie das Zeit-Weg-Diagramm. Das für die Glockenkurve bestimmte Kurvenprofil ist aus Fig. 3.48 und 3.49 ersichtlich.



Fig. 3.46

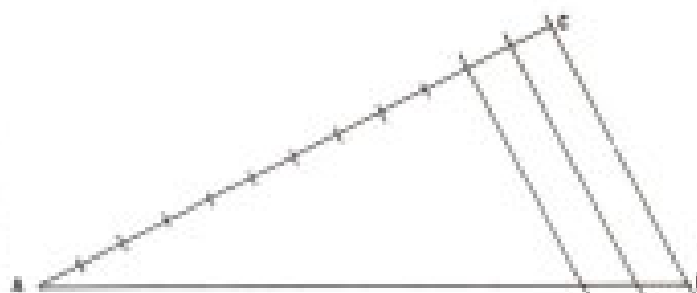


Fig. 3.47

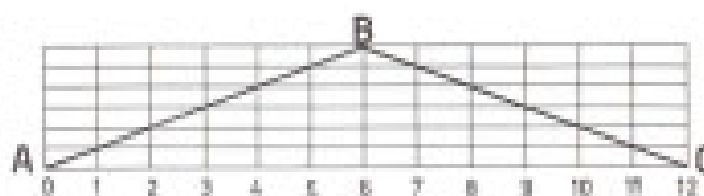


Fig. 3.48



Fig. 3.49

Die AUTOMAT-Baukasten enthalten Rohlinge zu Kurvenprofilen der Glockenkurven aus Preßspan und Blech. Für die ersten Versuche lohnt es sich, diese Kurvenprofile aus Preßspan anzufertigen. Die Löcher und Schlitz für die Befestigung werden nach den Blechscheiben kopiert. Blechprofile werden mit einer alten Schere ausgeschnitten, mit Feile und Schmirgelpapier verputzt.

Die Befestigung des Kurvenprofils auf dem Kurvenkörper geschieht am besten so, daß zuerst die Mitte befestigt wird, wozu eine besondere Schraube laut Fig. 3.50 verwendet wird, die in die innere Nut des Kurvenkörpers paßt.



Fig. 3.50

Fig. 3.51 zeigt die Befestigung der fertigen Glockenkurve mit aufmontiertem Profil.

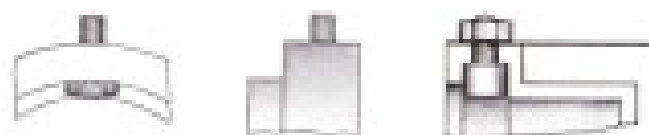


Fig. 3.51

Glockenkurven mit starrem Übertragungselement

Fig. 3.52 zeigt das elementarste Getriebe-Modell der Glockenkurve. Wir sehen dabei, wie während einer halben Umdrehung der Kurvenwelle der Schieber durch das Kurvenprofil vorgeschoben wird und während der zweiten Hälfte der Umdrehung dieser Schieber wieder mit gleichmäßiger Geschwindigkeit zurückgeht. Wir stellen auch fest, daß hier eine rotierende in eine geradlinige Bewegung umgewandelt wird. Die Kurvenrolle am Ende eines starren Armes überträgt die Bewegung auf den geradlinig verlaufenden Schieber, der sich auf zwei Kulissen bewegt. Die Berührung der Kurvenrolle mit dem Kurvenprofil wird durch zwei Federn erzwungen. Die prinzipielle Montage des Schiebers auf der Kulisse ist aus Fig. 3.53 ersichtlich. Bessere Laufeigenschaften werden erzielt, wenn nur zwei Blöcke 35.106 verwendet werden.

Fig. 3.54 zeigt eine andere Anordnung des Abtriebes.

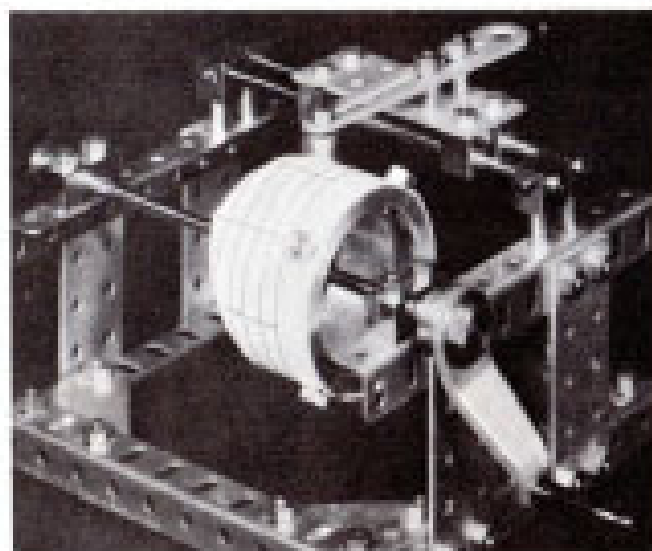


Fig. 3.52

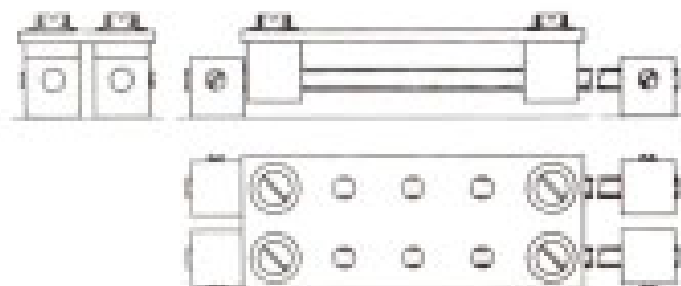


Fig. 3.53

Fig. 3.54

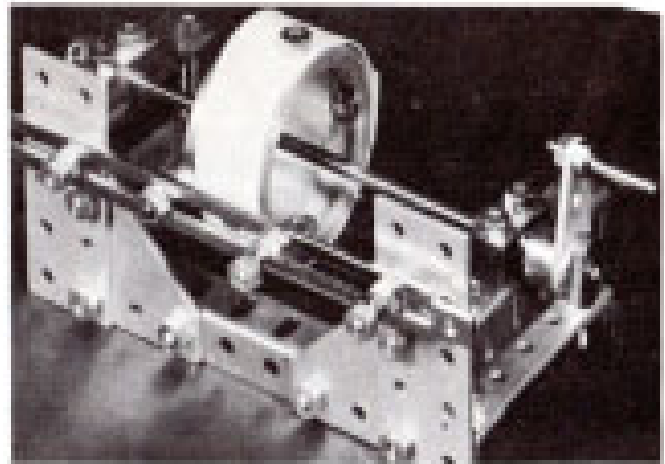
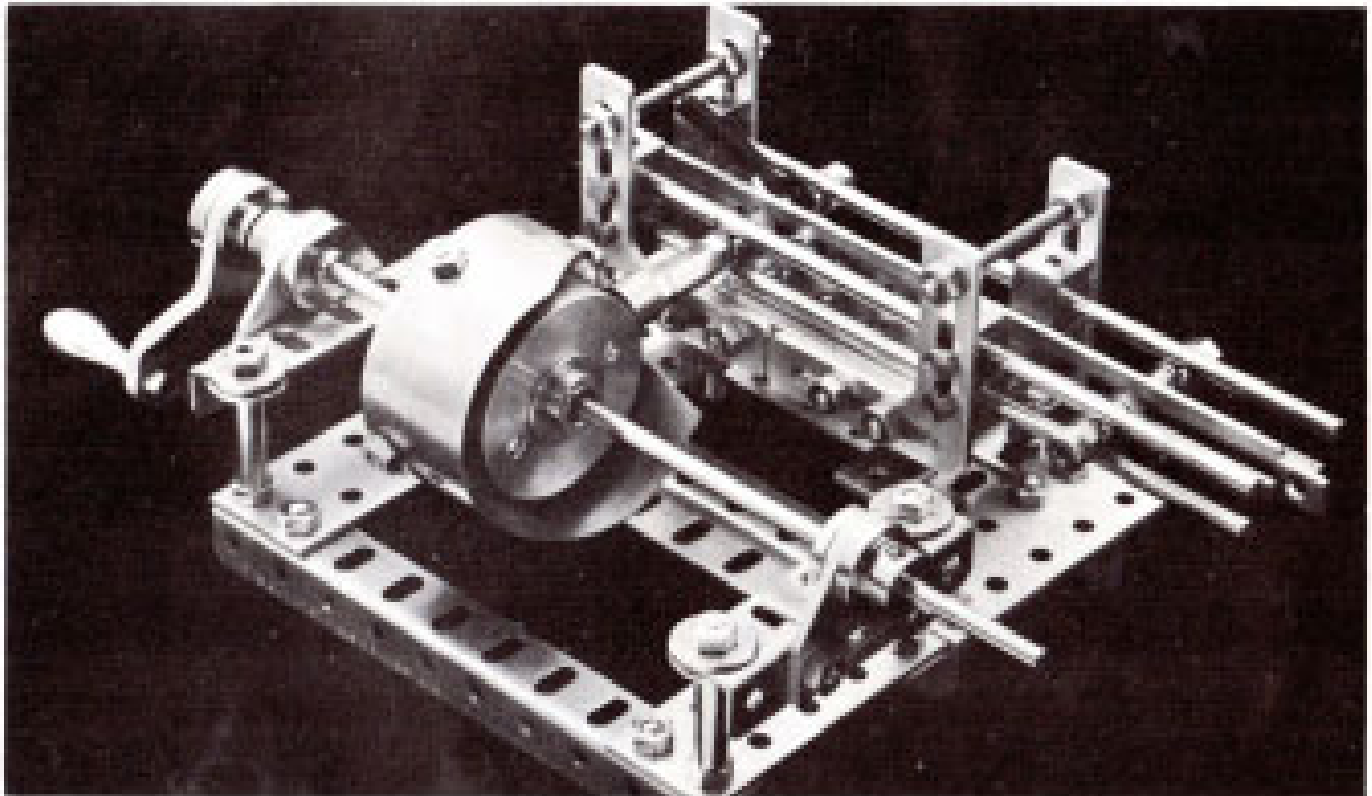


Fig. 3.55



Glockenkurven mit Schwinghebeln

Bei den Glockenkurven in Verbindung mit Schwinghebeln geht man genau gleich vor wie beim Entwurf der Zeit-Weg-Diagramme für Kurvenprofile mit Schwinghebeln. Die Bewegungen des Schwinghebels an der Glockenkurve sind genau gleich wie in Fig. 3.54 dargestellt. Die Bewegungsgesetze sind die genau gleichen. Fig. 3.56 zeigt das Getriebe-Modell mit Schwinghebel.

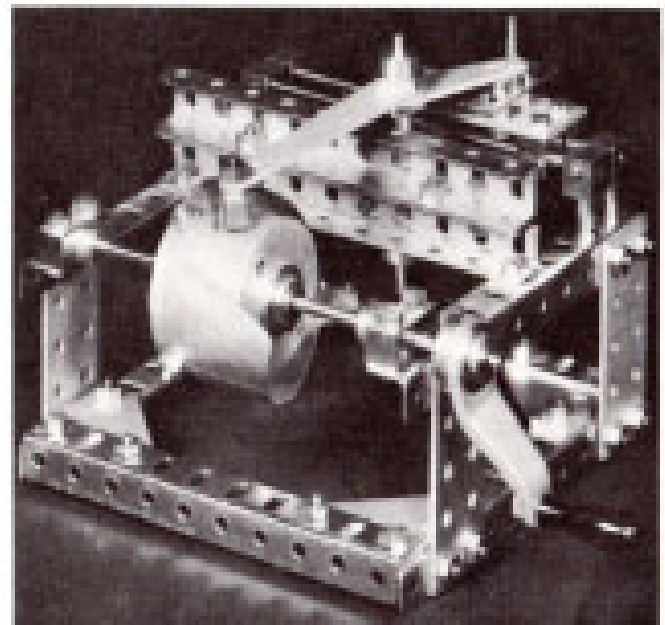


Fig. 3.56

Fig. 3.57 zeigt, wie der Kurvenkörper auf der Welle befestigt wird.

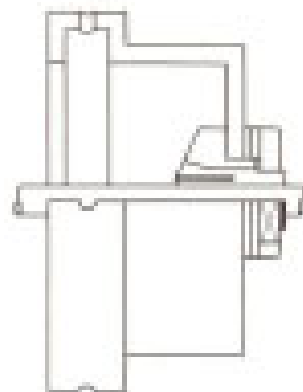


Fig. 3.57

Fig. 3.58 zeigt das Profil einer Glockenkurve für eine Bohroperation (Tornos AG, Montier). Der Umfang der Glockenkurve wird in 360° eingeteilt und die einzelnen Arbeitsläufe auf diesem Umfang verteilt.

Von 75° — 93° wird der Abtrieb in die Arbeitsstellung vorgeschoben, und die Bohroperation beginnt bei 93° , dauert bis 191° , während dieser Zeit erfolgt die Operation des Bohrens, und zwar auf eine Tiefe von 3,9 mm; während 2° verharrt die Kurvenrolle, d. h. das Werkzeug, in Ruhestellung und kehrt von 193° bis 203° in die Ausgangslage zurück.



Fig. 3.58

Bild 3.59 zeigt das Profil der Glockenkurve für den Vorschub des Spindelstockes eines Tornos Automaten.

Die Abszissenachse, die die Gesamtzeit für alle Bewegungen während einer Umdrehung der Kurvenwelle darstellt, wird durch die horizontale Grundlinie verkörpert. Der Gesamtweg wird durch die Gesamthöhe des Rechteckes dargestellt. Zwischen 83° und 106° wird der Spindelstock um 23,50 mm vorgeschoben. Zwischen 180° und 219° wird der Spindelstock wiederum um eine beträchtliche Distanz von 40 mm vorgeschoben.

Die Horizontalen des ganzen Kurvenprofils stellen Stillstände des Spindelstockes dar, während welchen die Arbeiten der Werkzeuge erfolgen.

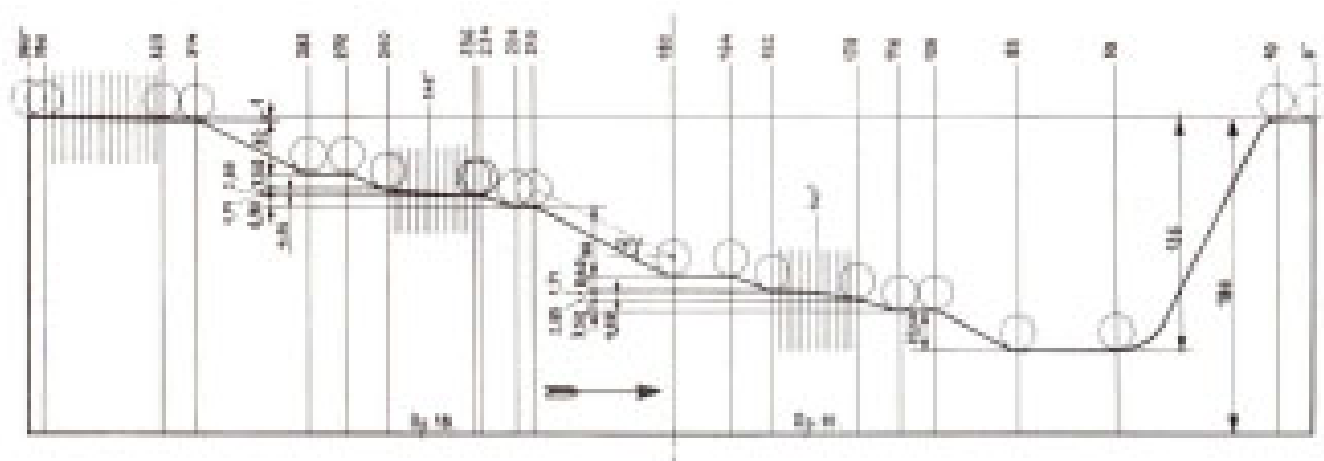


Fig. 3.59

Fig. 3.60 zeigt zwei Ausschnitte einer besonderen Kurvenausbildung für einen 2-Spindel-Bohrapparat. Auch diese Form von Kurvenprofilen kann leicht mittels einem AUTOMAT-Kurvenkörper 50.104 nachgebildet werden (in Baukasten 33 und 1500 enthalten). Auf dieser Abbildung 3.57 sieht man auf dem Teil rechts sehr deutlich zwischen 99° und 72° eine Vorschubbewegung um 2,3 mm. Beim eigentlichen Profil für die Bohroperation finden wir zwischen 163° und 205° einen Vorschub des Bohrers um 11 mm.

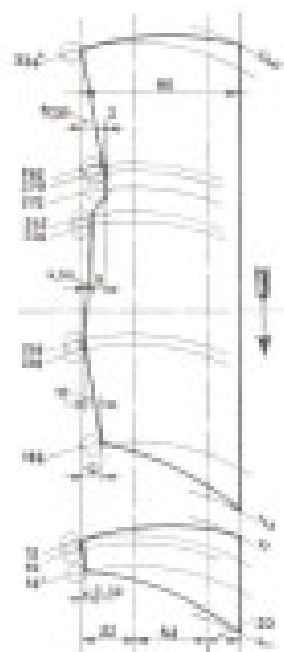


Fig. 3.60

Fig. 3.60a zeigt ein besonders interessantes Kurvenprofil eines Tornos-Automaten. Da bei langen Löchern die Späne nach bestimmten Vorschüben aus der Bohrung entfernt werden müssen, muß der Bohrer mit den daran haftenden Spänen aus dem Loch herausgezogen werden. Die «Täler» im Kurvenprofil stellen diese Arbeit dar. Die linke Seite des «Tales» stellt den schnellen Rückzug des Werkzeuges dar, die weniger steile Talseite die erneute Vorschubbewegung bis an die Ausgangsstellung, während die geneigten «Bergkuppen» den eigentlichen Vorschub des Werkzeuges darstellen.



Fig. 3.60a

Nockengetriebe

Werden die Kurvenscheiben aus Kreisbogen verschiedener Durchmesser und geraden Strecken gebildet, so werden sie als Nockenscheiben bezeichnet. Andere Formen von Nockenscheiben zeichnen sich auch dadurch aus, daß anstelle der geraden Verbindungsstrecken ebenfalls Kreisbogen verwendet werden.

Abbildung 3.61 zeigt eine Darstellung eines einfachen Nockengetriebes mit zentrischem Abtriebsglied. Die Nockenscheibe besteht aus zwei Kreisbogen mit Radius r_1 und r_2 in einem Abstand von D , die durch zwei gerade Strecken an den Tangenten T_1 , T_2 , t_1 und t_2 miteinander verbunden sind. Dieses Nockengetriebe ergibt im Abtrieb zwei Stillstände, und zwar beim Abfließen der Kurvenrolle über die Kreisbogen T_1 — T_2 und von t_1 — t_2 . Vorschub und Rücklauf erfolgen beim Abfließen der Kurvenrolle über die geraden Strecken.

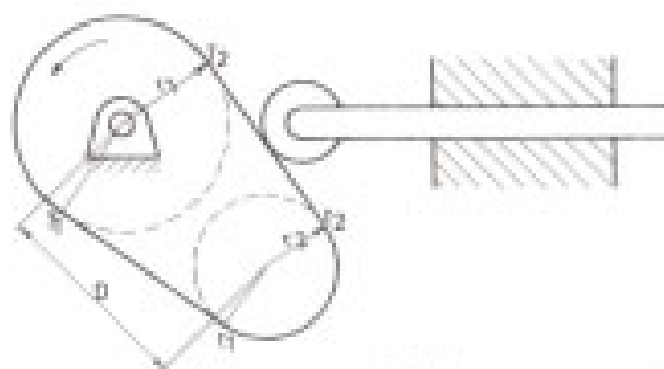


Fig. 3.61

Der aufmerksame Beobachter wird aus dieser Abbildung sofort ersuchen können, daß dieses Getriebe bei schnelllaufenden Maschinen nicht einwandfrei funktionieren wird und daß eine Abtriebbewegung über einen Schwinghebel günstiger wäre. Warum? Die Erklärung dafür ist sehr einfach, wenn Sie ein Getriebe Modell mit diesen Eigenschaften konstruieren. Eine Aufgabe besteht aus darin, das Zeit-Weg-Diagramm für das abgebildete Nockengetriebe zu erstellen. Für $r_1 = 25$ mm, für $r_2 = 18$ mm, für $D = 50$ mm. Man verwende ein Zeit-Weg-Diagramm mit zwölf Zeiteinheiten.

Nockengetriebe als eine Untergruppe der Kurvengetriebe, d. h. von Kurvenscheiben, spielen im Maschinenbau zur Steuerung der Bewegungen eine wichtige Rolle.

Als Rudolf Diesel im Jahre 1892 in seiner Schrift «Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors» der Welt seine Erfindung des seither nach ihm benannten Motors offenbarte, hatte er bereits die hier beschriebenen Gesetze zur Ventilsteuerung angewendet. Nocken zur Steuerung der Ventile werden in sämtlichen Verbrennungsmotoren, d. h. in den Benzinmotoren der Autos und Dieselmotoren verwendet.

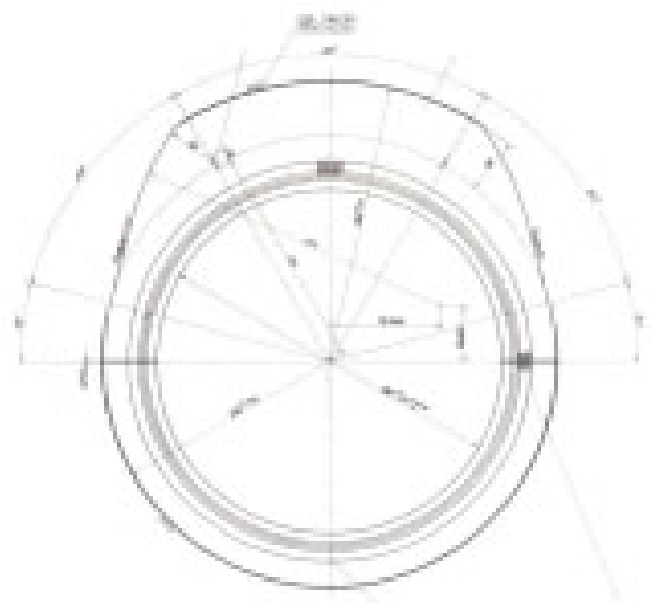


Fig. 3.62

Fig. 3.62 zeigt die Konstruktion der Nocken für die Brennstoffpumpe eines Zweitakt-Sulzer-Diesel-Motors (Gebrüder Sulzer AG, Winterthur, Schweiz).



Fig. 3.63

Fig. 3.63 zeigt die Nockenwelle der Brennstoffpumpe eines Sulzer-Dieselmotors.

Bei den bisherigen Versuchen arbeiteten wir mit einer Kurvenrolle, die dazu dient, den Reibungswiderstand am Berührungspunkt mit der Kurvenscheibe auf ein Minimum zu reduzieren. In der Praxis werden — je nach Arbeitsverhältnissen der Maschine — diese Kurvenrollen auch noch auf Kugellagern gelagert. Unter den verschiedensten Anwendungen kommt es nun oft vor, daß eine Änderung der Bewegung innert der kürzesten Zeitspanne übertragen werden soll, und wo Kurventaster Verwendung finden. Betrachten wir einmal die Anwendung dieser Überlegungen in der Praxis, und zwar auf Grund eines Vergleiches, der den Arbeitsverhältnissen der Praxis entspricht. Wir nehmen dabei an, daß ein Schwinghebel oder Schieber innert kürzester Zeit auf eine Beschleunigung reagieren soll, und daß das dafür zugrunde liegende Zeit-Weg-Diagramm wie Fig. 3.64 aussehe.

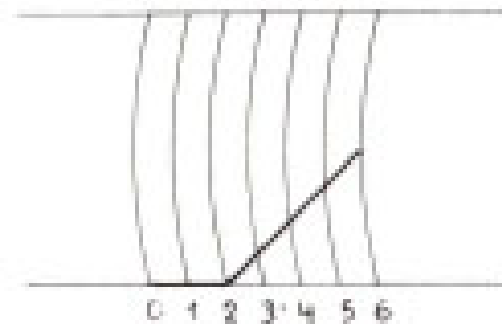


Fig. 3.64

Auf eine Kurvenscheibe übertragen, sieht dieses Detail, wie Fig. 3.65 aus.

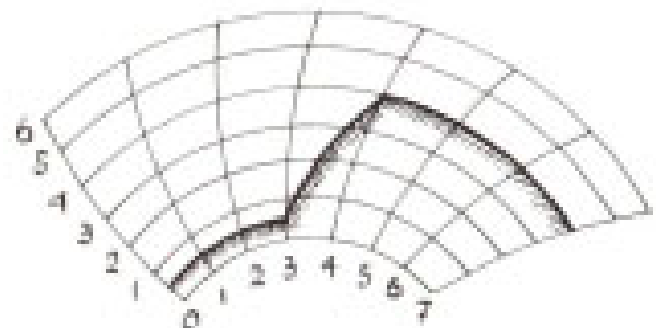


Fig. 3.65

Bei der Verwendung von Kurvenrollen würde sich das Abrollen der Kurvenrolle auf dem Profil der Kurvenscheibe so abspielen, wie aus Fig. 3.66 ersichtlich ist. Wir stellen hier fest, daß die Kurvenrolle den Punkt A, der die Beschleunigung einleitet, gar nicht berührt, sondern beim Weiterrollen an die ansteigende Kurve anstößt. Die Bewegung wurde jedoch so geplant, daß die Änderung der Geschwindigkeit beim Punkt A, nicht früher und nicht später, erfolgen soll. Die Kurvenrolle eignet sich in diesem Falle nicht, das durch das Zeit-Weg-Diagramm festgelegte Bewegungsgesetz zu respektieren. Die Bewegung der Kurvenrolle ist um die Strecke a zu kurz.

Um in solchen Fällen die Bewegungen genau nach Plan ausführen zu können, werden Kurventaster verwendet.

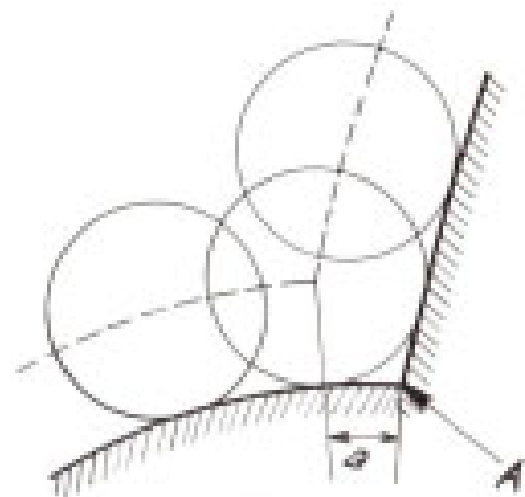


Fig. 3.66

Kurventaster sind runde Bolzen, die an ihrem Arbeitsende wie eine Messerkante ausgebildet sind. In der Praxis ist jedoch auch diese Kante sehr leicht abgerundet. Fig. 3.67.



Fig. 3.67

Die Verwendung von Kurventastern erlaubt es, die im Zeit-Weg-Diagramm niedergelegten Bewegungsgesetze genau einzuhalten, indem die Kante des Kurventasters bis in kleine Winkel gleiten kann.

Die Folgerungen, die sich aus diesen Überlegungen ergeben, sind folgende:

Wird die Eingriffsstelle zwischen Kurvenscheibe und Abtriebsglied zu einem Kreis erweitert, so muß zur Aufrechterhaltung des Bewegungsgesetzes der Mittelpunkt der Kurvenrolle die vorgeschriebene Kurvenbahn beschreiben. Das an der Kurve ausgefräste Profil muß deshalb als Kurve gleichen Abstandes von der Mittelpunktsbahn der Kurvenrolle ausgeführt werden. Fig. 3.68 zeigt die Mittelpunktsbahn der Kurvenrolle.

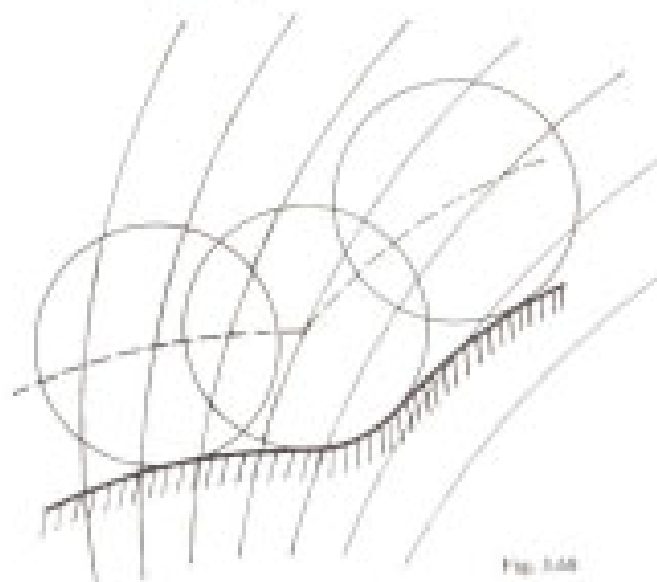


Fig. 3.68

Fig. 3.69 zeigt die Anwendung von Kurventastern in der Praxis bei den Tornos-Drehautomaten der Firma Tornos AG, Moutier, Schweiz. Bei der Konstruktion der Kurvenscheiben muß deshalb auch die Art des Eingriffsgliedes bekannt sein.

Beim AUTOMAT-Baukasten haben wir ebenfalls Kurventaster mit Messerkante, die sich jedoch bei Kurvenscheiben aus Preßspan infolge der zu hohen Reibung nur schlecht anwenden lassen. Sie eignen sich jedoch vorzüglich für Versuchs- und Entwicklungsarbeiten in Verbindung mit Kurvenscheiben aus Metall. Diese Kurventaster werden im Halter 50.117 befestigt und mit dem Hebel montiert.

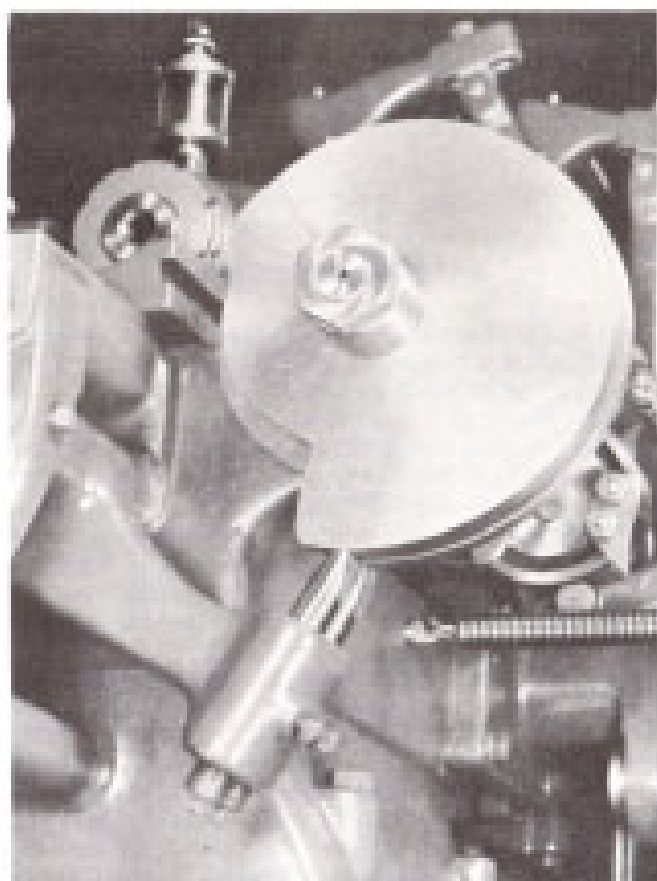


Fig. 3.69

Die geradlinige Eingriffsfläche

Die bisher behandelten Kurvengetriebe standen im Zusammenhang mit Kurvenrollen und Kurventastern als Eingriffslieder. Ist nun der Eingriffspunkt zwischen Schieber und Kurvenscheibe zu einer Geraden erweitert, so ist die jeweilige Stellung des Schiebers durch die tangentielle Anlage der Geraden an die Kurve gegeben. Fig. 3.70.

Ein Punkt der Geraden, der als Verbindung zwischen Drehpunkt der Kurvenscheibe und Achse des Abtriebes zu denken ist, beschreibt eine Bahn relativ zur Kurvenscheibe. Es ist dies die Bahn, die für das zu übertragende Bewegungsgesetz maßgebend ist.

Diese Art des Abtriebes ist nur dann anwendbar, wenn die Steigungswinkel flach sind und keine Überschneidungen vorkommen. Auch vermag diese Form des Eingriffsgliedes hohlen Teilen des Kurvenprofils nicht zu folgen.

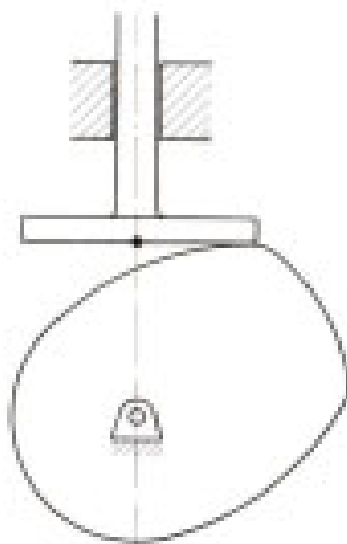


Fig. 3.70

Als Eingriffslied dieser Art enthält der AUTOMAT-Baukasten auch ein Stück laut Fig. 3.71 (Bestandteil Nr. 50.103).

Beim Studium technischer Literatur begegnen wir immer wieder den beiden Ausdrücken Kraftschluß und Formschluß. Was bedeuten sie?

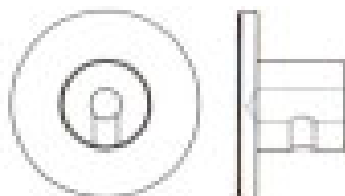


Fig. 3.71

Kraftschluß und Formschluß

Nach Reuleaux's grundlegender Theorie der kinematischen Ketten erzwingt die Bewegung eines Gliedes in einer Kette eine entsprechende Bewegung der andern Glieder.

Bei den Kurvengetrieben kann festgestellt werden, daß dies nur insofern richtig ist, als die Kurvenrolle mit der Kurvenscheibe in Berührung steht und die Bewegung auf den Schieber oder den Schwinghebel übertragen kann. Bei den bisherigen Modellen wurde die Berührung der beiden Glieder — Kurvenscheibe und Kurvenrolle — durch die Feder oder durch die Schwerkraft des Schiebers oder Schwinghebels erzwungen. Man spricht in solchen Fällen von einem Kraftschluß.

Erweist sich bei der Erhöhung der Drehzahl einer Maschine die Federkraft zu schwach, dann hebt sich die Rolle von der Kurvenscheibe ab. Die Kurvenscheibe dreht sich während einem kurzen Zeitintervall ohne entsprechende Abtriebsbewegung weiter. Der Kraftschluß ist aufgehoben. Diesem Nachteil wird dadurch abgeholfen, daß die Kurvenrolle in einer Nut der Kurvenscheibe geführt wird, laut Abbildung 3.72 und 3.73. Die Kurven-



Fig. 3.72

rolle bewegt sich dann in einer genau vorgeschriebenen Bahn. Die beiden Wände dieser Nut entsprechen den Äquidistanzen zur Mittelpunktsbahn der Kurvenrolle. Die Rolle folgt dabei jeweils nur einer Wandung, und das Spiel zwischen Rolle und Wandung der Nut ist den Betriebsverhältnissen der Maschine und der nachgesuchten Genauigkeit anzupassen. Auch bei hohen Geschwindigkeiten muß die Kurvenrolle der Form des Kurvenprofils folgen. Man spricht in diesem Falle von Formschluß.

Steigungswinkel, Übertragungswinkel

Die bisherigen Zeit-Weg-Diagramme wurden ohne Rücksichtnahme auf deren praktische Ausführung erstellt. Die Praxis lehrt aber, daß gewisse, aus langen Erfahrungen gesammelte Werte, nicht unbeachtet bleiben dürfen, wenn ein einwandfrei funktionierendes Kurvengetriebe konstruiert werden soll.

Der Steigungswinkel

Zur Ermittlung des Steigungswinkels bei Kurvenscheiben für zentrischen Kurvenschub geht man wie folgt vor: Ziehen Sie Linie 1, als Tangente zum Kurvenprofil beim Berührungspunkt des Eingriffsgliedes mit der Kurvenscheibe. Linie 2 ist die Verlängerung der Abtriebsrichtung und Verbindung mit dem Drehpunkt der Scheibe. Linie 3 wird als Senkrechte zur Linie 2 errichtet beim Berührungspunkt des Eingriffsgliedes. Der Winkel α zwischen Linien 2 und 3 ist der Steigungswinkel bei Kurvenscheiben für zentrischen Kurvenschub — Fig. 3.74.

Die Praxis hat gelehrt, daß dieser Steigungswinkel bei schnelllaufenden Maschinen 30° nicht übersteigen sollte. Bei langsam laufenden Maschinen hingegen kann dieser Steigungswinkel bis 45° gehen.

Der Übertragungswinkel

Der Übertragungswinkel β bezieht sich auf den Abtrieb. Er wird gebildet von der Bewegungsrichtung des Eingriffspunktes einerseits und der Relativbewegung dieses Punktes gegenüber dem Kurvenglied. Der Praktiker wird darauf achten, daß der Radius r des Grundkreises so groß als möglich gewählt wird, welchem Bestreben jedoch durch die Platzverhältnisse der Maschine Grenzen gesetzt sind. Auch hier hat die Erfahrung gezeigt, daß bei schnelllaufenden Kurventrieben der Übertragungswinkel von 60° nicht unterschritten werden soll, während bei langsam laufenden Getrieben die untere Grenze bei etwa 45° liegt.

In Fig. 3.74 stellen wir fest, daß sich Steigungs- und Übertragungswinkel beim zentrischen Kurvenschub auf 90° ergänzen. Diese Erfahrungswerte können praktisch so erprobt werden, daß wir verschiedene Kurvenscheiben mit verschiedenen Steigungs- und Übertragungswinkeln aus-

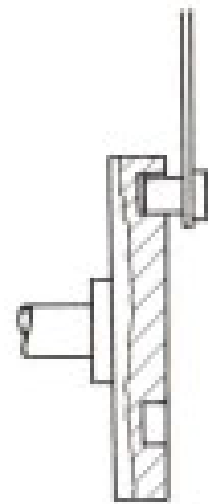


Fig. 3.73

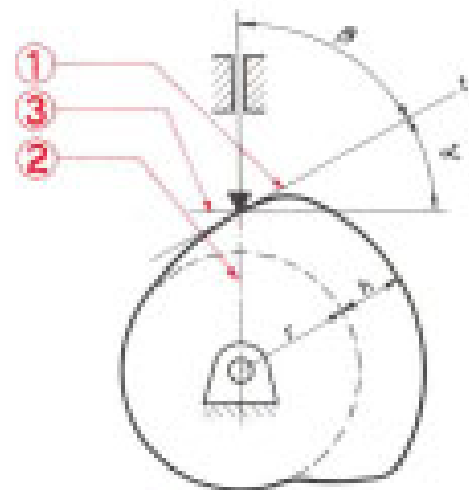


Fig. 3.74

probieren, indem wir am senkrechten Schieber noch eine Zugfeder befestigen und den Widerstand beim Drehen der Kurvenscheibe feststellen. Dabei soll besonders darauf geachtet werden, daß die Reibung in den Führungsschienen auf ein Minimum reduziert wird. Das einfache Modell laut Fig. 3.8 wird sich für diese Versuche weniger eignen als Modell laut Fig. 3.9.

Beim Entwerfen von Zeit-Weg-Diagrammen müssen wir somit auf den daraus entstehenden Übertragungswinkel Rücksicht nehmen. Wir können also nicht irgend einen beliebigen Bewegungsablauf in einem Zeit-Weg-Diagramm festlegen, sondern müssen die aus der Praxis herausgebildeten Erfahrungswerte berücksichtigen. Dies läßt sich am besten an Hand der folgenden Beispiele veranschaulichen:

Angenommen, wir benötigen für einen bestimmten Zeitintervall einen Hub von 15 mm. Wie sieht der Übertragungswinkel an der betreffenden Stelle in der Kurvenscheibe aus? Fig. 3.75 zeigt den betreffenden Ausschnitt des Zeit-Weg-Diagrammes. Wir nehmen an, daß wir für die Kurvenscheibe nur einen beschränkten Platz zur Verfügung haben, nämlich 80 mm. Wir wollen nun versuchen, eine Kurvenscheibe zu konstruieren — d. h. den besonderen Abschnitt mit Hub von 15 mm — welche die festgelegten Bewegungsgesetze respektiert und gleichzeitig den günstigsten Übertragungswinkel ergibt.

In Fig. 3.76 haben wir zwei verschiedene Grundkreise gewählt. Der Hub ist bei beiden Beispielen genau gleich, d. h. 15 mm. Durch die Vergrößerung des Grundkreises — die Abszissenachse des Zeit-Weg-Diagrammes — ergeben sich auch zwei verschiedene Übertragungswinkel.

Wir sehen aus dieser Gegenüberstellung, daß der Übertragungswinkel durch eine Erweiterung des Grundkreisdurchmessers günstiger gestaltet werden kann.



Fig. 3.75

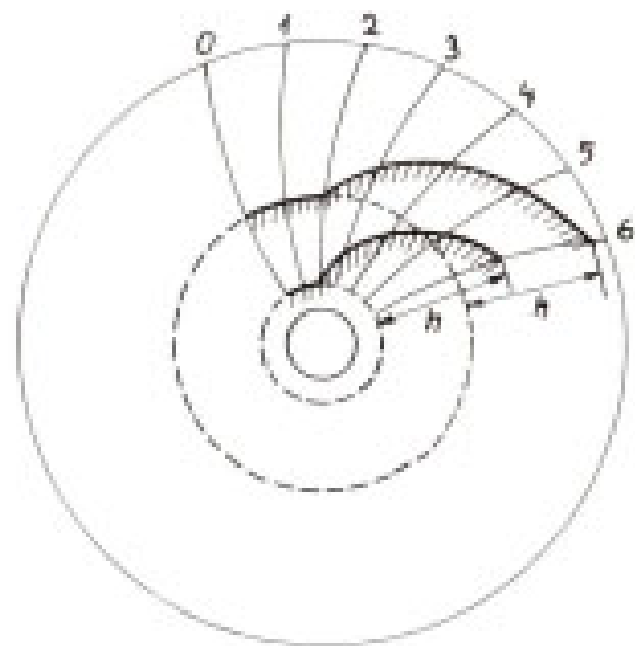


Fig. 3.76

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

Wir haben bereits erklärt, daß innerhalb gewisser Zeitabschnitte eine bestimmte Wegstrecke zurückgelegt wird. Fig. 3.77 zeigt einen Ausschnitt aus einem Zeit-Weg-Diagramm mit vier verschiedenen Geschwindigkeiten:

Von A—B braucht die Kurvenrolle insgesamt vier Zeiteinheiten, um eine Wegstrecke von vier Einheiten zurückzulegen. Wenn v = Geschwindigkeit, s = Weg, t = Zeit, so haben wir:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{20 \text{ mm}}{4 \text{ s}} = 5 \text{ mm/s}$$

$$\text{Von B—C} = \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ s}} = 10 \text{ mm/s}$$

$$\text{Von C—D} = \frac{0 \text{ mm}}{2 \text{ s}} = \text{Stillstand des Schiebers während 2 Sekunden}$$

$$\text{Von D—E} = \frac{30 \text{ mm}}{1 \text{ s}} = 30 \text{ mm/s}$$

(Siehe auch «Ausbildung von Kurvenscheiben für Verarbeitungsmaschinen» am Schluß.)

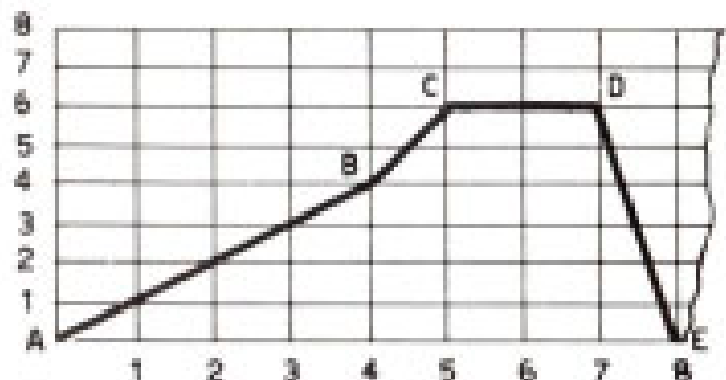


Fig. 3.77

Die Steuerung von drei Operationen mittels Glockenkurve und Scheibekurven

Die Aufgabe besteht darin, selbständig einen ganzen Kurvensatz, d. h. die für eine Operation benötigten Kurvenscheiben herzustellen. Wir nehmen dabei folgende Arbeit als Grundlage:

Es handelt sich darum, von einer runden, massiven Stange mit Durchmesser D_1 Stücke mit einer Länge L und einem Durchmesser D_2 serienweise herzustellen. Da der Auftrag dringend und Stangenmaterial im gewünschten Durchmesser nicht am Lager ist, muß vorhandenes Material auf den richtigen Durchmesser abgedreht werden.

Bei der Planung dieser Operation gehen wir dabei so vor, als ob sie sich bereits vor unsern Augen abrollen würde. Der Arbeitsvorbereiter und Werkzeugmacher muß deshalb die Arbeitsvorgänge ebenso gut kennen wie der Arbeiter, der die Maschine betreut. Wir nehmen an, daß der Durchmesser D_1 20 mm sei und D_2 16 mm. Fig. 3.78. Man muß auf den Gesamtdurchmesser 4 mm Material abdrehen. Da dies in einem Arbeitsgang nicht möglich ist, müssen in zwei Arbeitsgängen je 2 mm Material abgedreht werden.

Wir nehmen ferner an, daß es sich um eine Maschine mit einem beweglichen Spindelstock handelt, dessen Funktion es ist, das Material vorzuschieben. Wir nehmen an, daß für die Steuerung der Vorschubbewegung eine Glockenkurve verwendet werde. Fig. 3.79 zeigt die Glockenkurve eines Tornos-Dechautomaten der Firma Tornos AG, Moutier. Für die Drehoperation und das Abstecken, d. h. Abtrennen auf die gewünschte Länge, steht je eine Scheibekurve zur Verfügung.

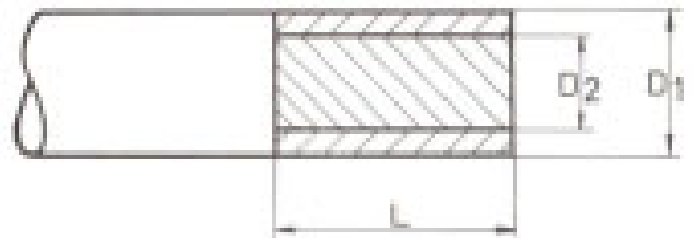
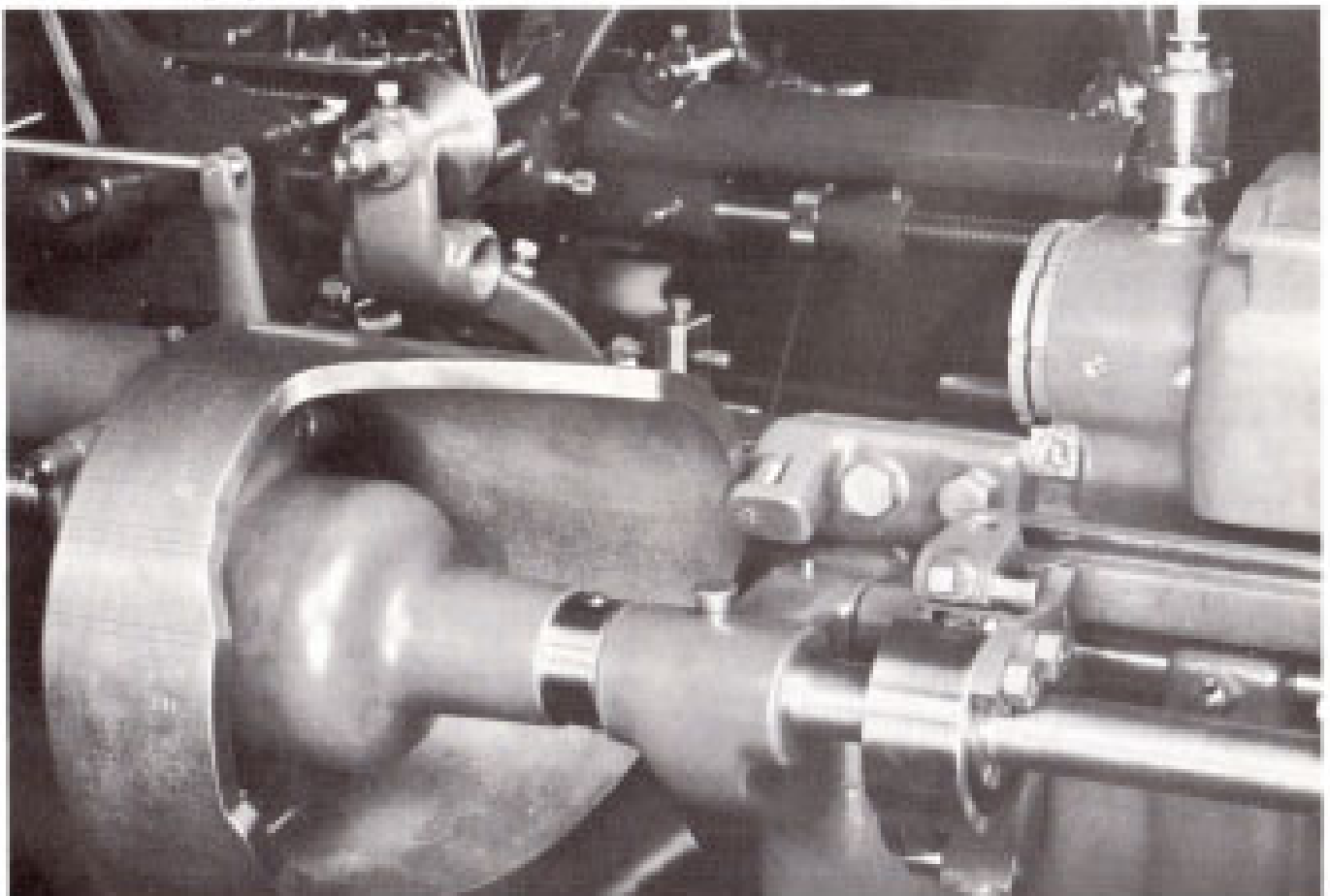


Fig. 3.78

Fig. 3.79



Wir erstellen aus dem Fahrplan für diese Operation, d. h. den Bewegungsplan, der den zeitlichen Ablauf und die Vorschübe bestimmt und als Grundlage für die Kurven dient. Dabei ist zu beachten, daß sich alle Operationen in einer gewissen Reihenfolge abspielen müssen und daß auf eine Umdrehung der Kurvenwelle ein Stück fertig aus der Maschine kommt.

Man erstellt zu diesem Zweck die drei Zeit-Weg-Diagramme untereinander. Die Zeitabschnitte sind für alle drei Operationen die gleichen. Es empfiehlt sich, diese Bewegungspläne auf Millimeterpapier einzutragen. Fig. 3.80, I, II und III.

Bei diesem Getriebe-Modell verwenden wir Schwinghebel mit einem Hebelverhältnis von 1:3 für die beiden Scheibenkurven. Für beide Scheibenkurven mißt der lange Hebelarm 75 mm und trägt die Kurvenrolle, während das kurze Ende 25 mm mißt und mit einem feststehenden, runden Gleitstück versehen wird. Der kurze Hebelarm überträgt die Bewegung auf einen horizontalen Schieber, der den Werkzeughalter darstellen soll. Wir müssen deshalb die im Zeit-Weg-Diagramm angegebenen Distanzen mit 3 multiplizieren, wenn die Scheibenkurven die gesuchten Vorschübe erzeugen sollen. Dies trifft jedoch nicht zu für die Glockenkurven, wo die im Zeit-Weg-Diagramm angegebenen Wege den von der Glockenkurve tatsächlich zurückgelegten Weg darstellen.

I. zeigt die Bewegungen des Spindelstockes. Die schräg ansteigende Linie A B zeigt den Vorschub des Werkstückes. Der Spindelstock, der durch die Glockenkurve gesteuert wird, wird stufenlos vorgeschoben, während das Drehwerkzeug seine Arbeit verrichtet. Nachdem der Spindelstock den Punkt B erreicht hat, bei Bild e, Fig. 3.81, ist die erste Drehoperation beendet. Von B bis C führt der Spindelstock mit der bereits überdrehten Stange über den ganzen, bereits zurückgelegten Weg zurück. Von C bis D wird der Spindelstock mit der bereits abgedrehten Stange wiederum vorgeschoben, und zwar bis Punkt D. Dies ist aus der Bildfolge f—i ersichtlich.

Beim Punkt D des Zeit-Weg-Diagrammes ist die gewünschte Länge wiederum erreicht, und der abgedrehte Zapfen hat den gewünschten Durchmesser von 16 mm, sowie die Länge L.

Von D bis E verbleibt der Spindelstock an der gleichen Stelle und geht von E bis F in seine Ausgangslage zurück. Die horizontale Strecke D E auf dem Zeit-Weg-Diagramm stellt denjenigen Zeitabschnitt dar, während welchem der Spindelstock stillsteht und das Abstechwerkzeug seine Arbeit verrichtet.

II. Dieser Abschnitt des Fahrplans zeigt die Bewegungen des Drehwerkzeuges.

Von H bis I geht es in die Arbeitsstellung vor und ist beim Punkt I in Berührung mit der Stange. Es bleibt an dieser Stelle, während das Material vorgeschoben wird. In diesem ersten Arbeitsgang wird durch das Werkzeug ein Span von 1 mm Dicke abgedreht, so daß sich der Durchmesser der Stange auf 18 mm reduziert. Bildfolge a—e. Während der Spindelstock auf seine Ausgangslage zurückfährt, rückt das Drehwerkzeug für die zweite Drehoperation vor, kommt wiederum in Berührung mit dem Werkstück und beginnt das Material auf den Durchmesser D_2 zu drehen, d. h. von L—M, Bilder f—i. Bei M ist die Drehoperation beendet. Der gedrehte Zapfen hat jetzt einen Durchmesser von 16 mm (Bild j). Das Werkzeug fährt von M bis N in seine Ausgangslage zurück und ruht von N—O.

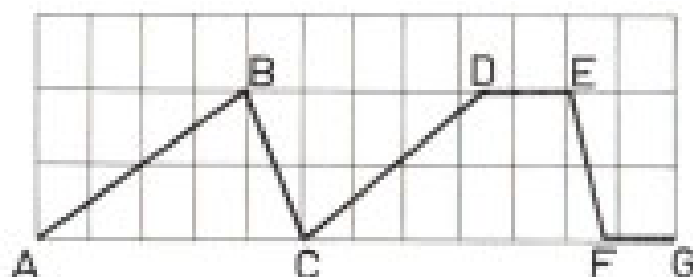


Fig. 3.80 I

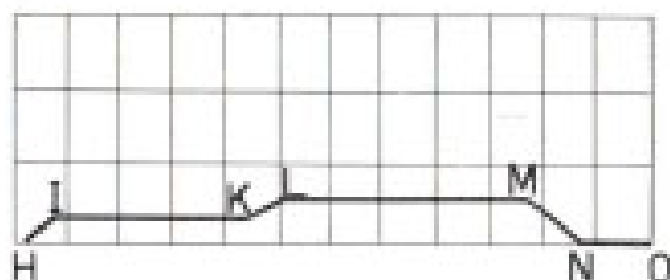


Fig. 3.80 II

III. Steht die Operation des Abstechens der kurzen Stücke dar. Das besonders geformte Abstechwerkzeug bleibt in seiner Ausgangslage von P—Q. Von Q—R rückt es bis an den Außendurchmesser des abgedrehten Zapfens vor (Bild k), ist bei l (Stelle R auf dem Zeit-Weg-Diagramm) in Berührung mit dem Metall und beginnt den Einstich. Während dieser Zeit steht der Spindelstock still, verharrt an der gleichen Stelle, während sich das Werkstück dreht. Da dieser Zapfen einen Durchmesser von 16 mm hat, muß das Abstechwerkzeug etwas wenig mehr als 8 mm vorgeschoben werden (Bildfolge k—n; Strecke RS des Zeit-Weg-Diagrammes). Bei Punkt S fällt das fertige Stück von der Stange ab (Bild o) und das Abstechwerkzeug geht in seine Ausgangsstellung zurück (Bild p). Die drei Operationen sind beendet.

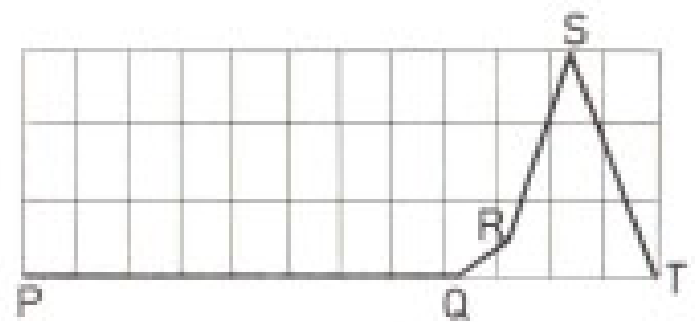


Fig. 1.80 (1)

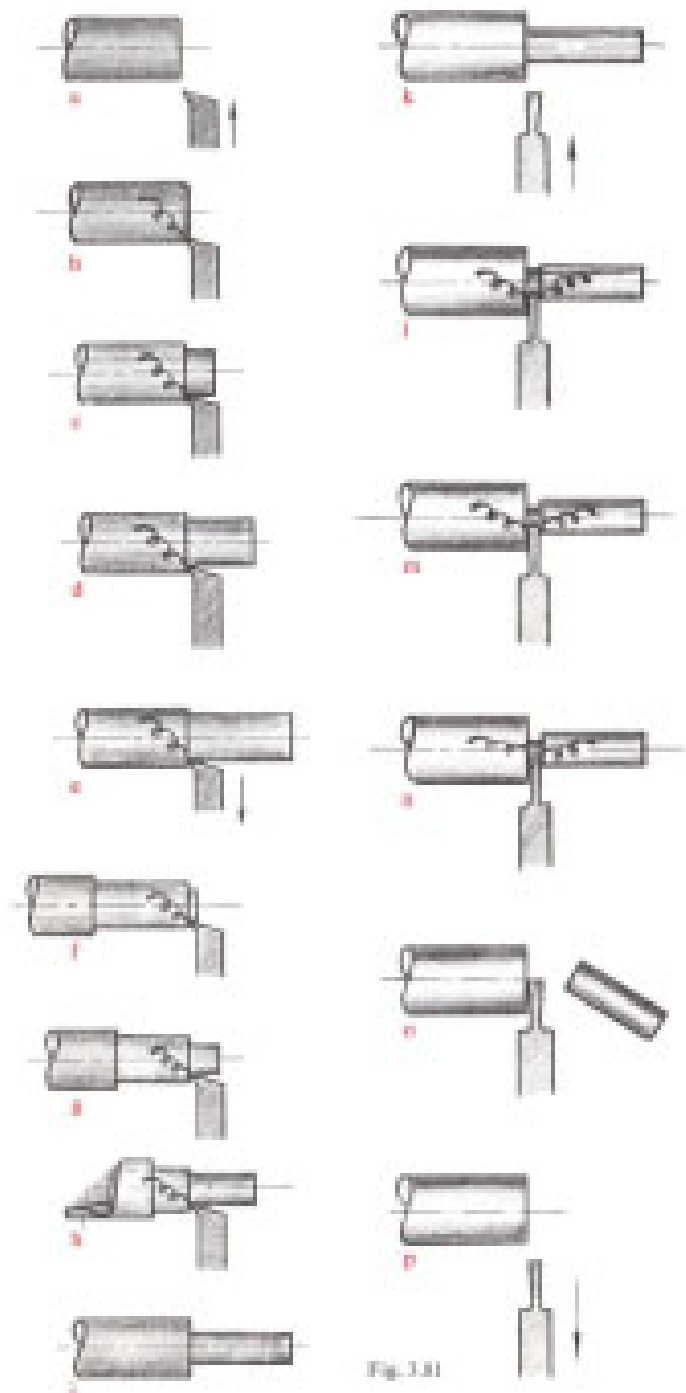


Fig. 1.81

Das Getriebe­modell ist in Fig. 3.82 dargestellt. Beachten Sie bitte, daß die abgebildeten Kurvenscheiben für eine andere Operation bestimmt waren.

Fig. 3.82

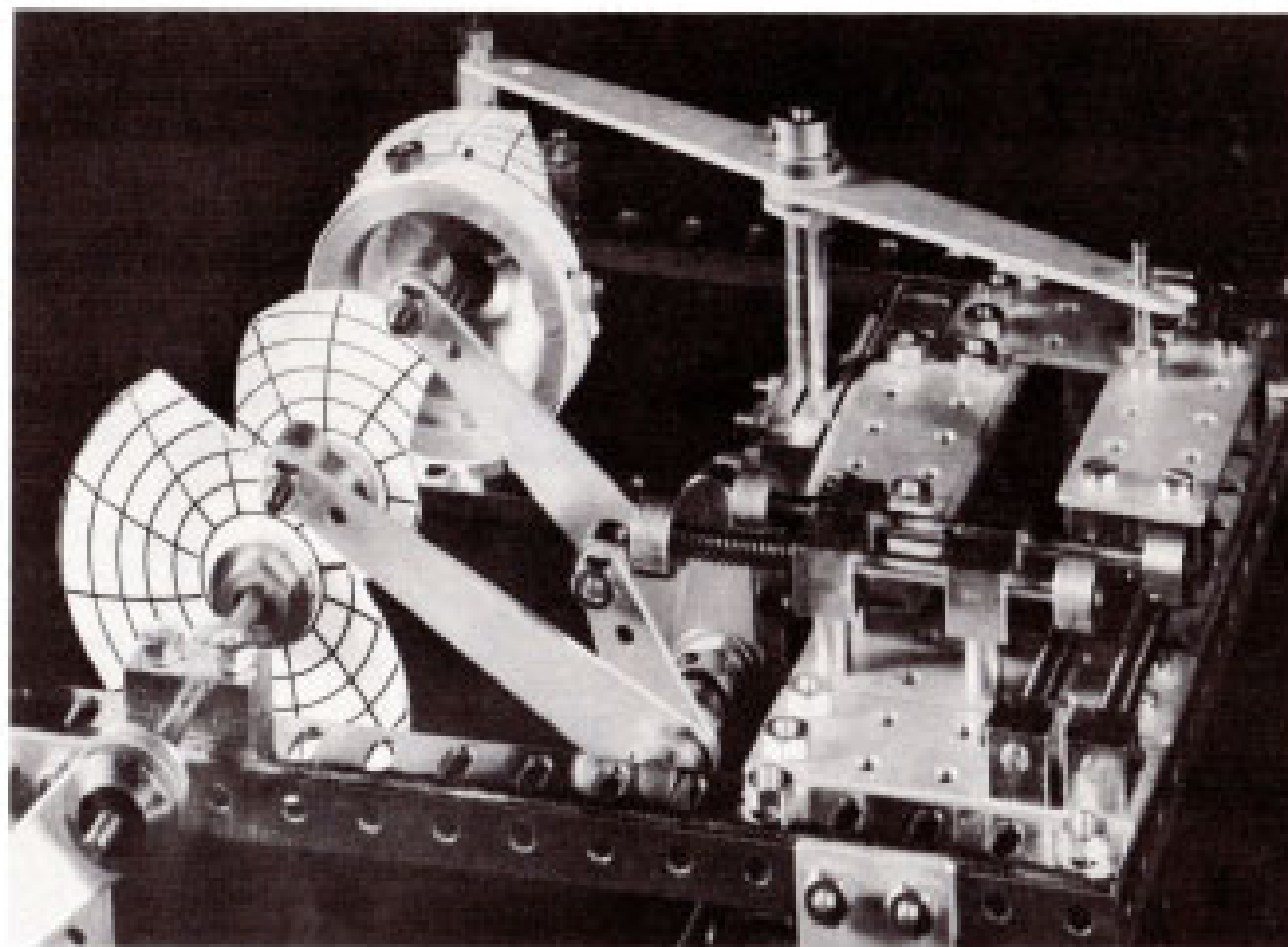


Fig. 3.83 zeigt, wie die Achsen für die Schwinghebel befestigt sind.

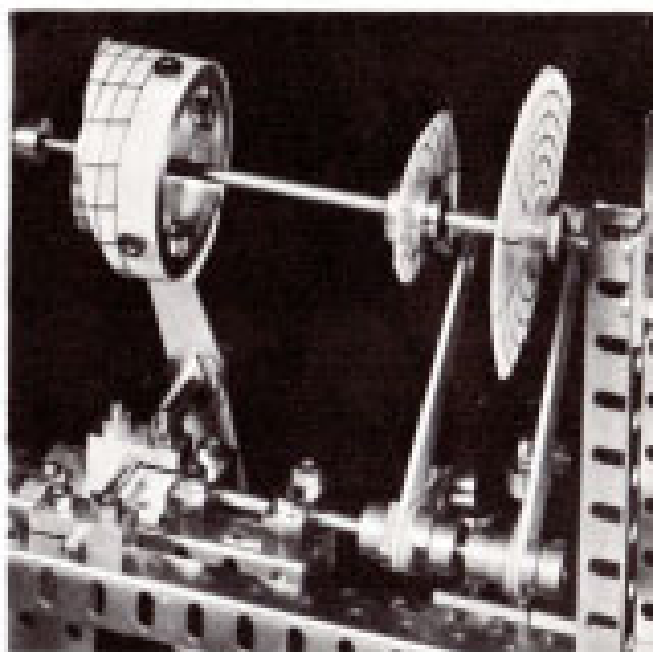


Fig. 3.83

Fig. 3.84 zeigt den Schieber, der den Spindelstock darstellen soll. Auf den horizontalen Führungstangen werden Federn eingelegt und ein Kraftschluß zwischen Glockenkurve und Schwinghebel erstellt. Wir empfehlen, das Profil der Glockenkurve aus Blech herzustellen.

Wie aus Abbildung 3.82 hervorgeht, wurden bei diesem Modell die Werkzeuge nebeneinander angeordnet. Bei Drehautomaten werden aber die Werkzeuge radial zum Werkstück angeordnet. Bei diesem Modell begnügen wir uns damit, die Werkzeugschlitten wie angezeigt anzuordnen und konzentrieren uns vorerst einmal darauf, drei verschiedene Operationen zu koordinieren.

Dem Montieren der Kurven auf der Kurvenscheibe ist besondere Aufmerksamkeit und Sorgfalt zu schenken. Achten Sie darauf, daß bei sämtlichen Kurven die Nullstellung, d. h. der Anfang des Bewegungsablaufes, gut markiert ist. Diese Nullstellung (die linke Seite des Zeit-Weg-Diagrammes) der drei Kurven muß unbedingt auf der gleichen Linie liegen, wenn der Bewegungsplan eingehalten werden soll.

Dieses einfache Beispiel zeigt, wie durch Automatisierung monotone Arbeit ausgeschaltet und der Arbeiter für intelligentere Probleme — die Berechnung der Kurvenscheiben, das Einrichten der Maschine, die Qualitätskontrolle frei wird. Wenn auch viele Maschinen weiter automatisiert werden und auch die Maßkontrolle der Werkstücke durch die Maschine selbst besorgt wird, so finden wir immer wieder Maschinengattungen, wo die Neueinstellung der Werkzeuge nur durch persönlichen Eingriff des Arbeiters erfolgen kann.

Derjenige, der sich als Elektro-Techniker betätigen und elektrische und elektronische Steuergeräte konstruieren, muß auch die prinzipiellen mechanischen Funktionen dieser Maschinen verstehen. Das hier Gebotene ist somit nicht nur für den Elektro-Techniker und Ingenieur von Nutzen. Ob die Kurvenscheiben mechanisch einen Werkzeugschlitten oder eine Programmsteuerung überwachen, so setzt dies eine Kenntnis der Konstruktion von Kurvenscheiben voraus.

Kurvengesteuerte Hebelmechanismen

Wir haben bereits aus dem Abschnitt der Hebel gelernt, wie durch kleine Kräfte große Lasten bewältigt werden können. Diese Gesetze werden weitgehend bei kurven-gesteuerten, automatischen Maschinen angewendet.

Um die prinzipielle Anwendung dieser Gesetze bei wenigstens einem Maschinentyp, den Drehautomaten, verständlich zu machen, bauen wir uns das Versuchsgitter laut Abbildung 3.85.

Es besteht aus einer Kurvenscheibe, dem Schwinghebel, an welchem in einem Schlitz ein Zapfen verschiebbar angeordnet ist. Dieser Zapfen überträgt die Bewegung über eine Stange auf den oberen, gleicharmigen Doppelhebel. Der Ausschlag dieser Hebelübersetzung wird auf einer Skala angezeigt.

Wir finden nun folgendes: Je näher der Zapfen am Drehpunkt des Schwinghebels befestigt wird, um so kleiner wird der Ausschlag. Je mehr wir den Zapfen gegen die Kurvenscheibe verschieben, um so größer wird der Ausschlag.

Wir können dies genau an Hand der Skala nachprüfen.

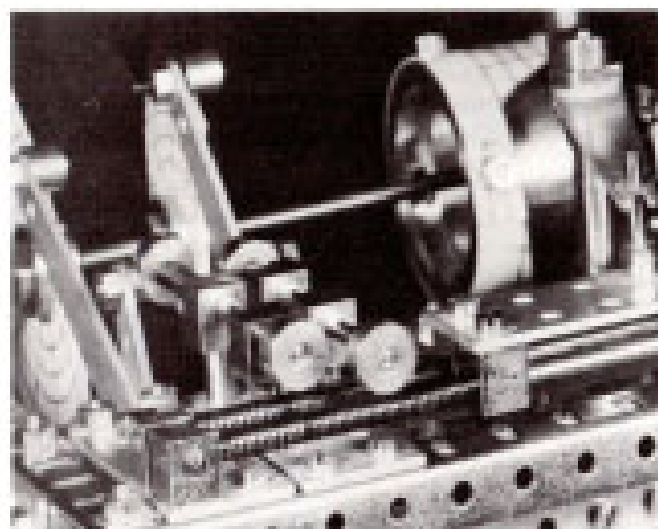


Fig. 3.84

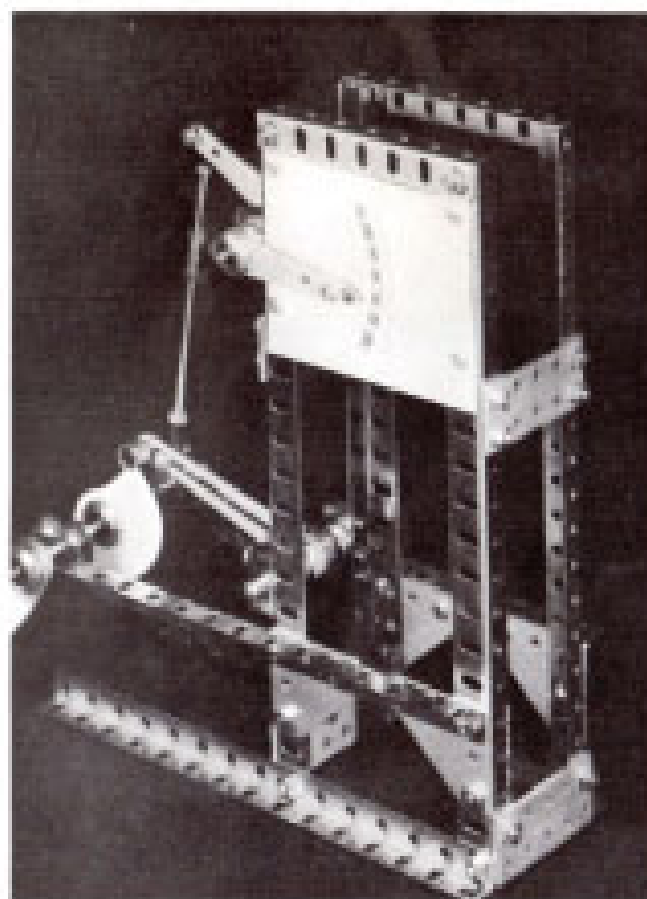


Fig. 3.85

Fig. 3.86 ist eine graphische Darstellung der obigen Behauptung. Die Regel lautet, daß der Hub des Übertragungshebels vom Abstand seines Drehpunktes am Schwinghebel abhängig ist. Wenn der Hebel AC 75 mm mißt und BC (die Distanz vom Drehpunkt des Schwinghebels bis zum Drehpunkt des Übertragungshebels) 25 mm ist, so erhalten wir ein Hebelverhältnis von 1:3. Dies bedeutet also, daß für je 3 mm Hub an der Kurvenscheibe, der gleicharmige Hebel oben einen Ausschlag von 1 mm anzeigt.

Diese Anordnung des verschiebbaren Zapfens kann vier Zwecken dienen.

1. Um die Abnutzung der Kurvenscheibe herabzumindern.
2. Um besonders große Widerstände am Arbeitsende des Hebelarmes zu überwinden.
3. Um Ungeauigkeiten in der Herstellung des Kurvenprofils zu reduzieren.
4. Um bei bestimmten Verwendungen einen veränderlichen Hub zu erzielen. Wir können uns z. B. vorstellen, daß eine Kurvenscheibe dazu dienen soll, Stangen verschiedener Durchmesser zu bearbeiten, wobei der Hub, bzw. Vorschub, veränderlich sein soll.

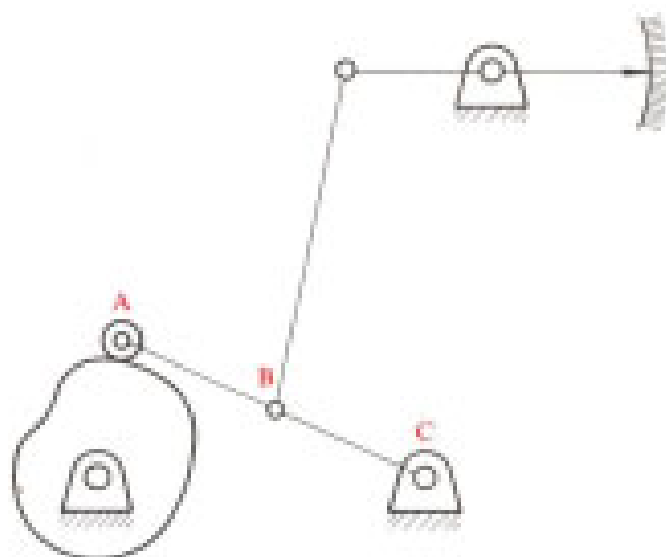


Fig. 3.86

Die Steuerung der Werkzeuge III, IV und V eines Schraubensautomaten

Bevor wir ein ange näheres Modell eines vollständigen Schraubensautomaten bauen können — ein höchst interessantes und kompliziertes Gebilde, wie aus der nebenstehenden Abbildung Nr. 3.87 kaum ersichtlich ist — müssen wir vorerst einmal die Arbeitsweise der wichtigsten Elemente kennen lernen. In diesem Abschnitt behandeln wir ausschließlich zwei Einzelheiten:

- a) Die Anordnung der Werkzeuge.
- b) Die Kurvenscheiben und das Hebelverhältnis.



Fig. 3.87

Abbildung 3.88 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieses Modells. Wir stellen dabei fest, daß die drei Werkzeuge radial zum Werkstück angeordnet sind. Die drei Werkzeuge liegen alle auf einer Ebene. Da sie radial angeordnet sind, wirken sie alle auf die Werkstückachse. Das zu bearbeitende Material wird durch den beweglichen Spindelstock in der Längsachse der Maschine vorgeschoben. Wenn wir die Abbildung 3.88 betrachten, so müssen wir uns das so vorstellen, daß die runde Stange gegen uns vorrückt und sich die drei radial angeordneten Werkzeuge abwechselungsweise auf die Mitten dieser Stange — durch den Kreis dargestellt — hin- und zurückbewegen. Bild 3.87 zeigt die Anordnung der verschiedenen Werkzeuge an einem Tornos-Automaten der Firma Tornos AG, Montier/Schweiz.

Eines der Geheimnisse der hohen Genauigkeit solcher Automaten besteht nun darin, daß das Werkstück so nahe als möglich am Spannfutter bearbeitet wird. Das ist auch der Grund, warum die Werkzeuge auf einem sehr gedrängten Raum angeordnet sind.

Die Verbindungsstangen übertragen die Bewegungen von den Kurvenscheiben auf die Werkzeugschlitten. Schematisch ist dies in Fig. 3.86 dargestellt. Auf Bild 3.87 sehen wir am oberen Rand des Bildes die Übertragungsorgane der Bewegungen von den Verbindungsstangen auf die Werkzeugschlitten. Die achsel zum Werkzeugschlitten sichtbaren, runden Verlängerungen sind Mikrometer, die zur Feineinstellung der Bewegungen dienen.

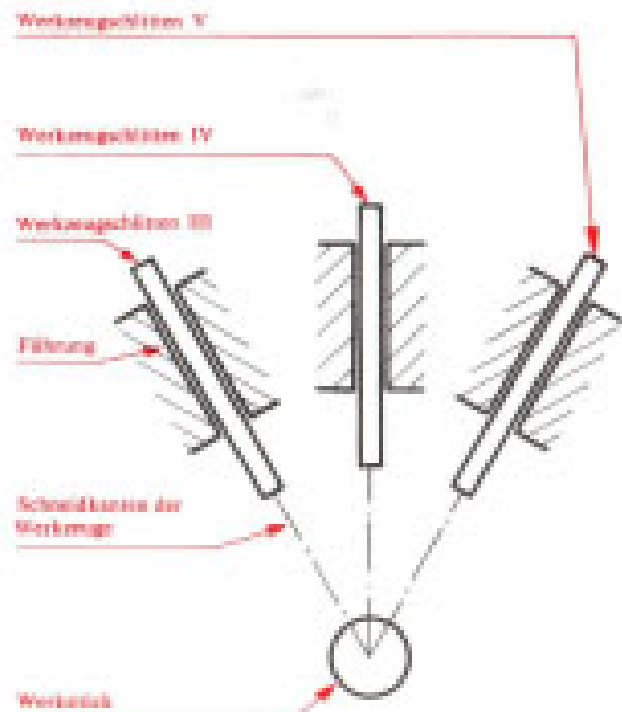


Fig. 3.88

Das Hebelverhältnis

Wir haben bereits darauf hingewiesen, daß je nach Hebelverhältnis Unregelmäßigkeiten und Ungenauigkeiten in der Herstellung der Kurvenscheiben reduziert werden können. Haben wir z. B. ein Hebelverhältnis von 1:4, und einen Fehler in der Kurvenscheibe von 0,1 mm, so wirkt sich dieser Fehler am Arbeitsende des Werkzeugschlittens nur mit 0,025 mm aus. Für den vorliegenden Modellversuch nehmen wir ein Hebelverhältnis von 1:3 an, d. h. ein Fehler in der Kurvenscheibe bei diesen Modellversuchen von vielleicht 1 mm stellt einen Fehler von 0,33 mm dar. Dieses Hebelverhältnis muß beim Herstellen des Kurvenprofils immer berücksichtigt werden. Brauchen wir am Arbeitsende, also dort, wo das Werkzeug das Metall bearbeitet, einen Vorschub von 1 mm, so muß die Kurvenscheibe einen Vorschub von 3 mm aufweisen. Beim Modell laut Fig. 3.89 haben wir Schwinghebel von 75 mm Länge verwendet. Wir haben beim Bau dieses Modells somit folgendes zu berücksichtigen:

- Die Schwinghebel haben eine Länge von 75 mm.
- Das Übersetzungsverhältnis ist 1:3.
- Die Kurvenscheiben müssen somit den dreifachen Hub berücksichtigen.

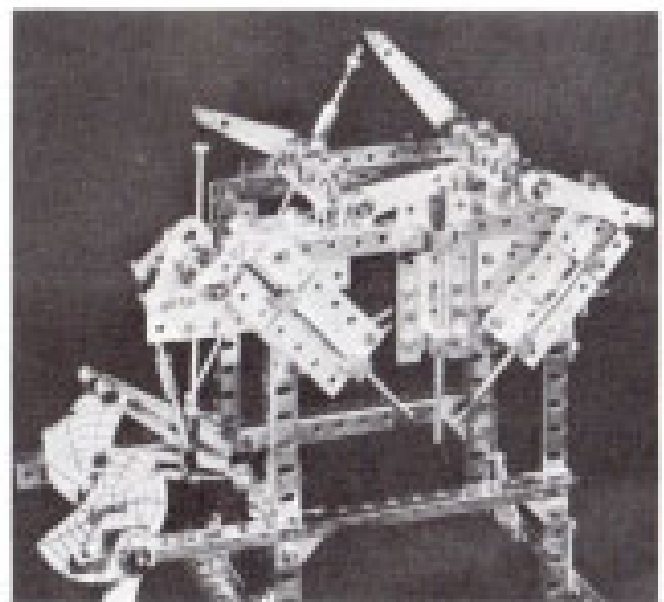


Fig. 3.89

Fig. 3.90 a zeigt die Vorderansicht des oberen Gestellteiles.

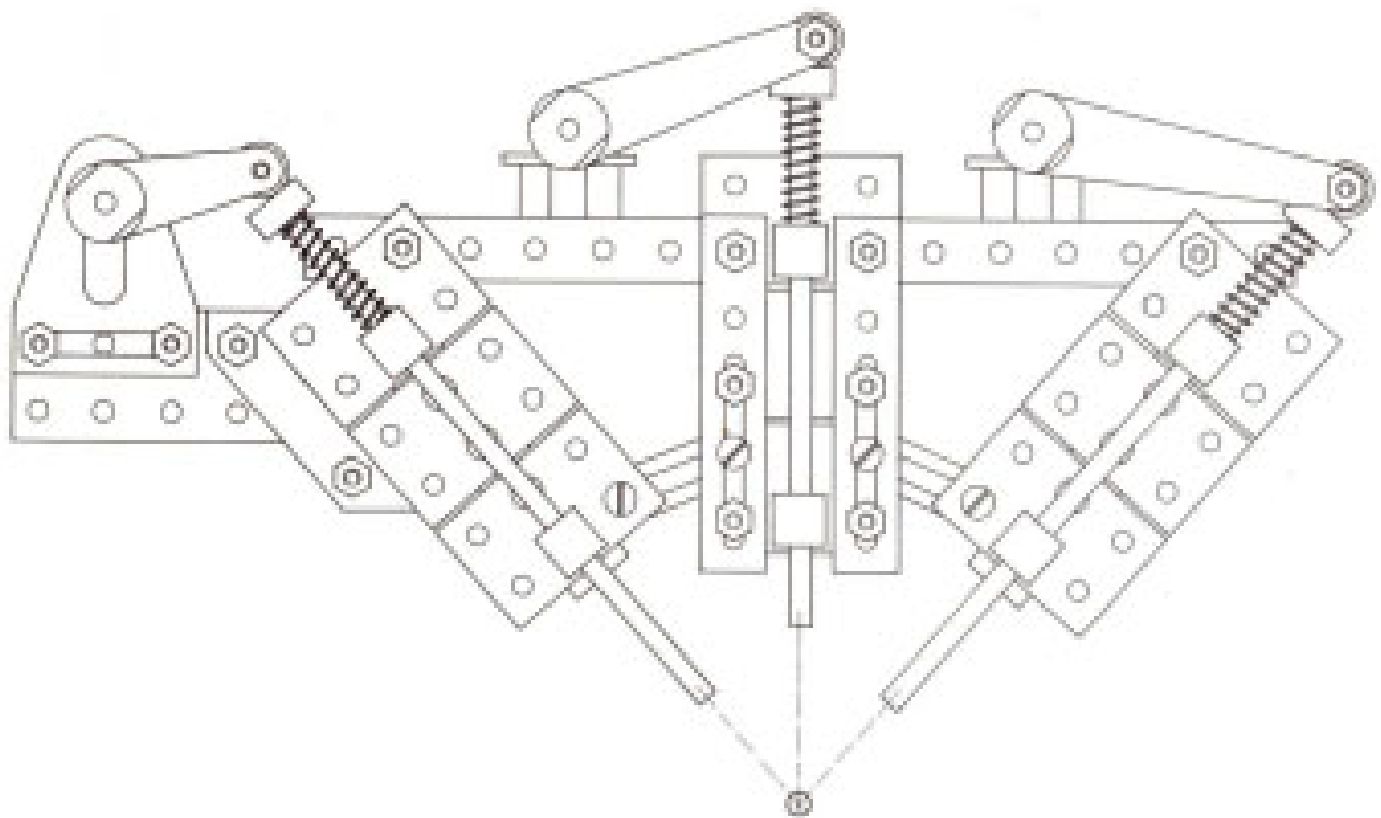
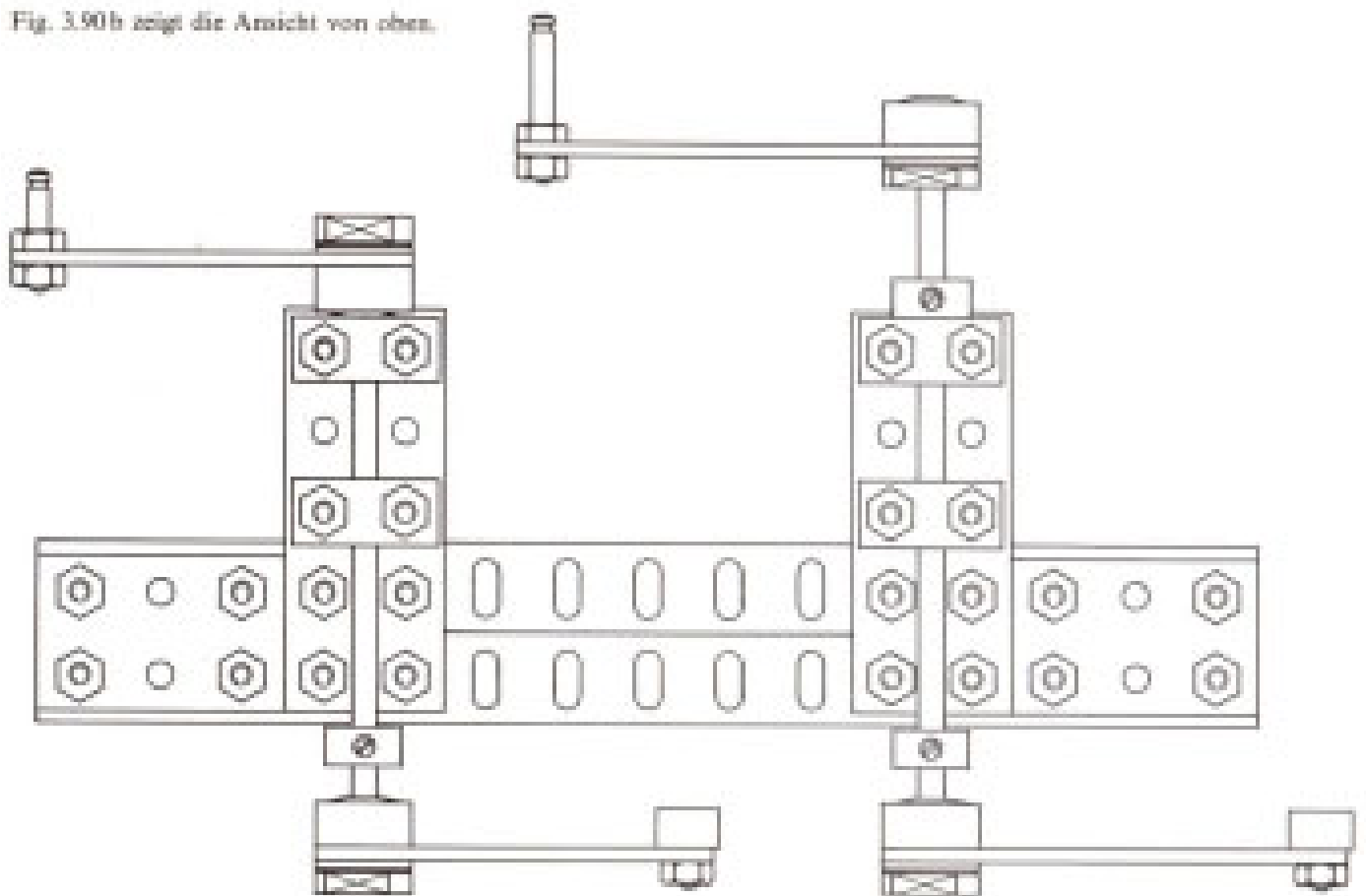


Fig. 3.90 b zeigt die Ansicht von oben.



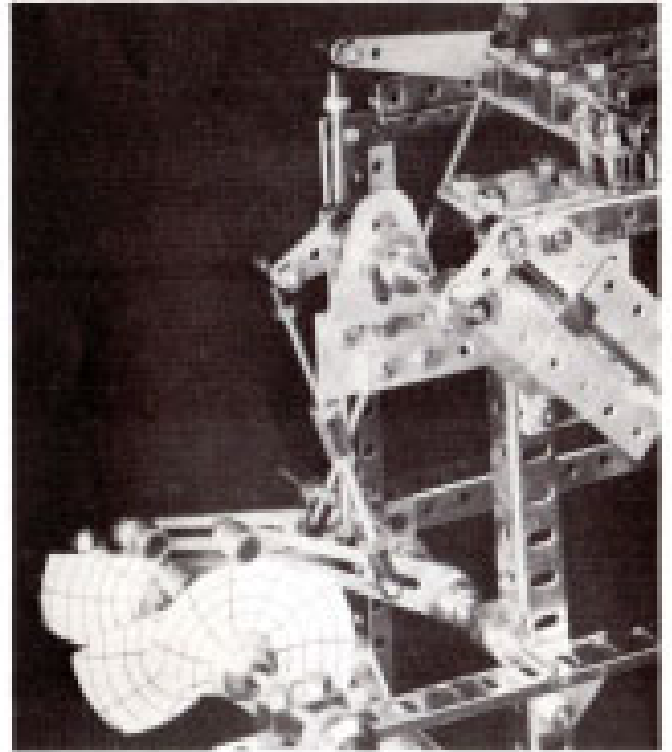


Fig. 3.91 zeigt die Seite der Kurvenwelle.

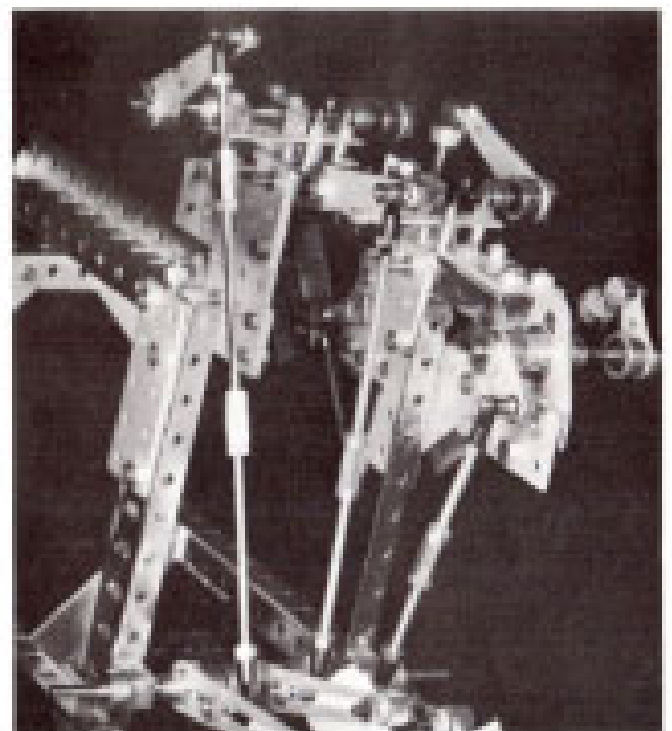


Fig. 3.92 zeigt die Ansicht von hinten mit den Übertragungstangen.

Als interessante Aufgabe dieses Abschnittes der AUTOMAT-Boxkasten sei folgendes Problem gestellt:
Konstruieren Sie sämtliche Kurvenscheiben, montieren Sie dieselben auf einer gemeinsamen Kurvenwelle, komplett mit allen Übertragungsstangen, zur automatischen Herstellung eines Teiles laut Fig. 3.93, der drei Operationen erfordert. Wir beschränken uns hier lediglich auf die Werkzeuge III, IV und V und lassen vorläufig die Bewegungen des Spindelstockes außer Betracht.

Die Operation besteht aus drei Einzeloperationen, die von je einem Werkzeug ausgeführt werden.

1. Über die Länge L ist das Material von D_1 auf D_2 herunterzudrehen.
2. Am linken Ende des Teiles wird der Außendurchmesser nicht überdreht, dagegen ist ein halbkreisförmiger Einstich zu drehen.
3. Abstechen von der Stange.

Wir erstellen den Bewegungsplan für diese drei Operationen wie folgt, Fig. 3.94:

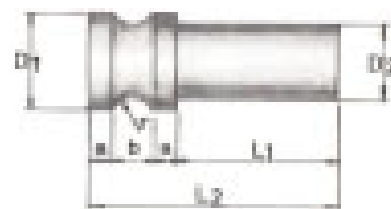
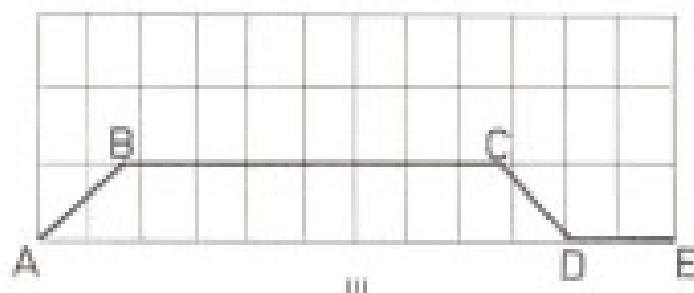


Fig. 3.93

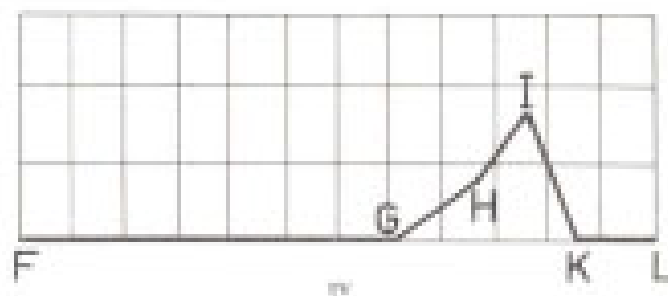
III. stellt das Drehwerkzeug dar.

Es geht in Arbeitsstellung vor von A—B und beginnt die Drehoperation ähnlich dem bereits unter Fig. 3.81 bekannten Beispiel.



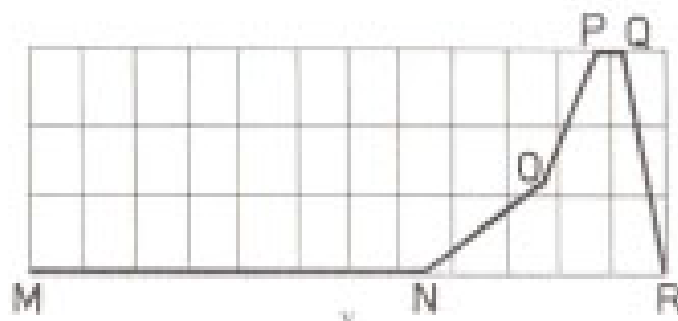
IV. Stellt den Formstahl dar, der den halbkreisförmigen Einstich dreht.

Er rückt zuerst an den Außendurchmesser D_1 vor und bewegt sich mit gleichförmigem Vorschub bis auf die vorgeschriebene Tiefe.



V. Stellt das Abstechwerkzeug dar.

Es geht von N—O in die Arbeitsstellung vor, beginnt beim Durchmesser D_1 und schiebt sich mit gleichförmiger Vorschubgeschwindigkeit bis etwas wenig mehr über die Werkstückachse vor. Die Operationen der Werkzeuge IV und V sind in der Bildfolge Fig. 3.95, a—i, dargestellt.



Im Bewegungsplan sind die Vorschübe für ein Hebelverhältnis von 1:3 bereits berücksichtigt.

Fig. 3.94

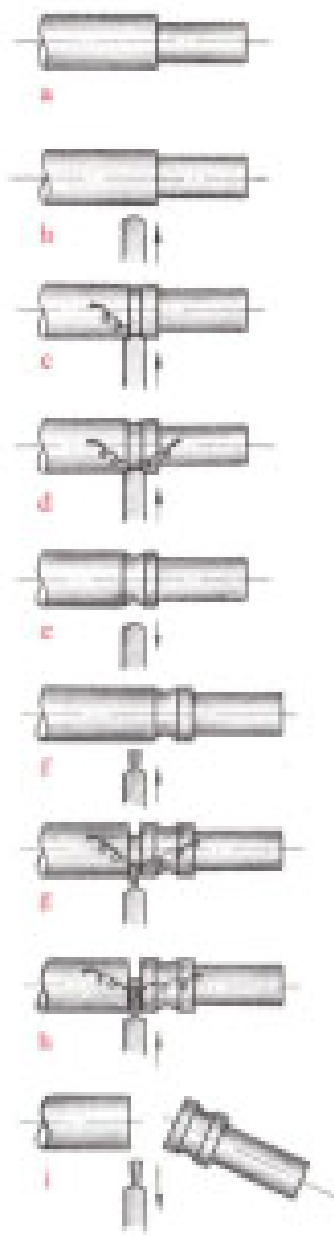


Fig. 3.95

Fig. 3.96 zeigt das angenäherte Modell eines Drehautomaten mit beweglichem Spindelstock. Es weist fünf Werkzeuge auf, die radial zur Werkstückachse angeordnet sind und die durch fünf Scheibenkurven gesteuert werden. Der Spindelstock wird durch die am linken Ende der Kurvenwelle gut sichtbare Glockenkurve gesteuert.

Außerdem weist dieses Modell einen Dreispindelapparat auf für das Ansenken, Bohren, Ausfräsen oder Gewindeschneiden. Die schwingende Bewegung dieses Apparates zur Ausrichtung mit der Werkstückachse wird durch die Kurve am äußersten Ende rechts der Kurvenwelle gesteuert. Diese Kurve weist drei konzentrische Kreishöhen und zwei Vorschubbewegungen auf. Auf der Abbildung ist die mittlere Spindel auf die Werkstückachse ausgerichtet. Der Vorschub der drei Werkzeuge an diesem Apparat erfolgt durch den gut sichtbaren, gebogenen Schütthebel. Hinter dem geschützten Teil dieses Hebels befindet sich die Schallkurve, deren drei Nocken die horizontale Vorschubbewegung der drei Werkzeugspindeln steuern.

Die Antriebskurbel rechts unten wandelt eine einfache Drehbewegung in 15 verschiedene Bewegungen um, d. h.:

- 5 Radialwerkzeuge I—V
- 3 Stellungswchsel des Apparates
- 3 Vorschubbewegungen der Werkzeuge am Apparat
- 1 Vorschubbewegung des Spindelstockes
- 1 Antriebsbewegung des Spindelstockes
- 1 Antriebsbewegung des Apparates
- 1 Antriebsbewegung der Kurvenwelle

Sämtliche Wellen laufen auf Kugellagern. Dieses Modell besteht aus 1570 Bestandteilen und kann mit Baukasten 33 oder 1500 gebaut werden, nebst einer Packung besonderer Bestandteile.

Dimensionen des Modelles: Länge 300mm, Breite 300mm, Höhe 340 mm.

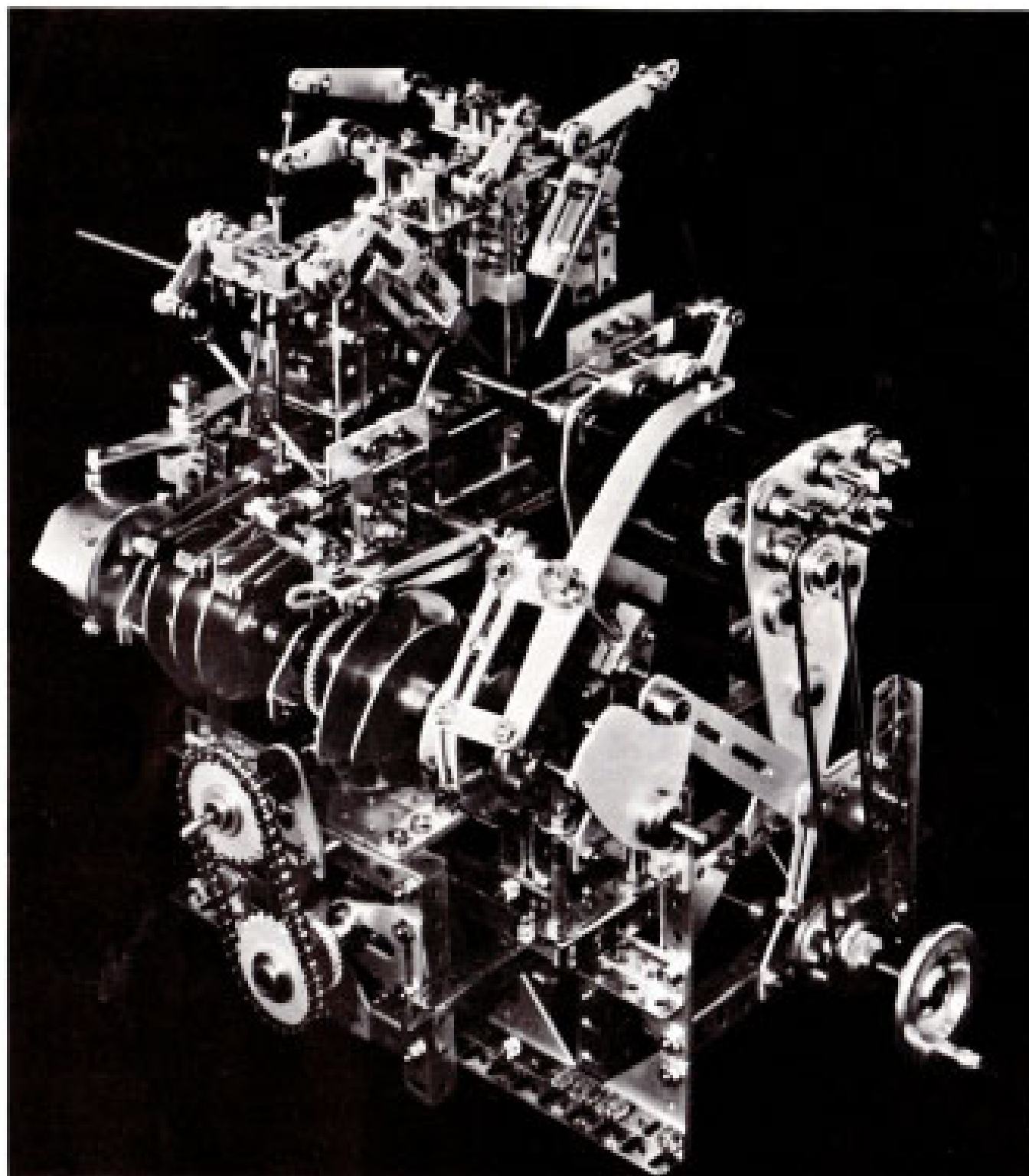


Fig. 3.96

Anwendungen von Kurven- und Kurbelgetrieben in der Praxis

Im Anschluß an die prinzipiellen Erklärungen über Kurven- und Kurbelgetriebe, deren Arbeitsweise wir nun kennen, versuchen wir den Bau eines Mechanismus einer Druckereimaschine, laut Fig. 3.97.

Die Aufgabe dieses Mechanismus besteht darin, in einem bestimmten Rhythmus ein Stück Papier von einer Stelle an eine andere Stelle zu befördern. Das Papier wird durch Saugluft an das Saugmundstück herangezogen und, sobald es haftet, emporgehoben und eine kleine Wegstrecke davon entfernt wieder abgelegt, dadurch, daß die Saugluft unterbrochen wird.

Jedes Blatt Papier, das fortgehoben wird, verringert die Höhe des Stapels. Das Papier wird durch einen Sperrtrieb allmählich hochgeschoben, wodurch die oberste Lage immer in der für das Funktionieren des Saugmundstückes richtigen Höhe ist. Dieser zusätzliche Mechanismus ist auf dem Bilde nicht gezeigt.

Die Funktion der Hebel in Fig. 3.97 besteht darin, die Koppelkurven zur Bewegung des Saugmundstückes zu erzeugen (siehe Abschnitt «Koppelkurven»).

Wir haben also grundsätzlich folgende Bewegungen zu beachten:

1. Der zeitliche Ablauf und der Hub wird durch die Kurvenscheiben bestimmt.
2. Die Hebel und Verbindungsstangen übertragen diese Bewegungen in einem vorgeschriebenen Hebelverhältnis.

Mit den bereits erworbenen Kenntnissen der Kurvengetriebe und Hebel und den AUTOMAT-Bestandteilen werden Sie diesen Mechanismus bauen können.

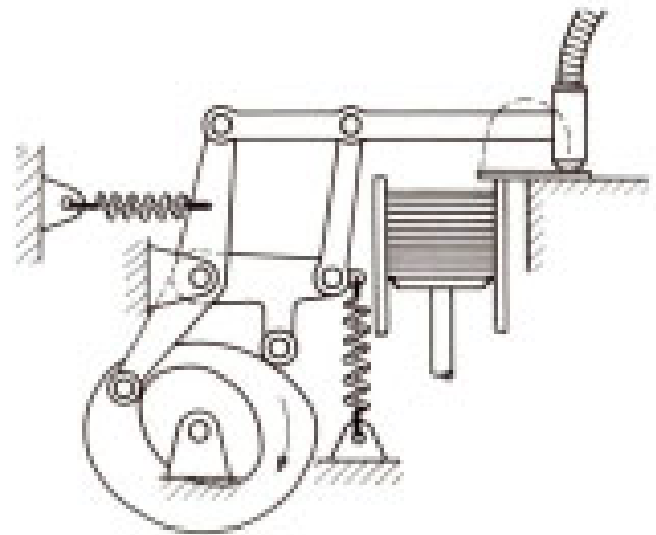


Fig. 3.97

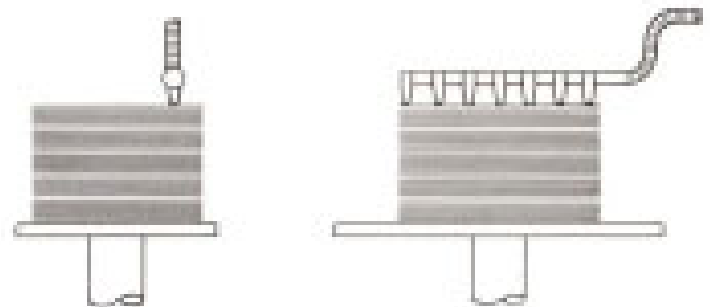


Fig. 3.98

Hubänderung bei Kurvengetrieben

Im Abschnitt zu Fig. 3.85 und 3.86 haben wir erfahren, daß Hebel bei Kurvengetrieben auch deshalb angewendet werden, um Ungenauigkeiten in der Herstellung der Kurvenscheiben zu reduzieren und um gegebenenfalls den Vorschub je nach Bedarf veränderlich zu gestalten.

Bilder 3.99 und 3.100 zeigen zwei weitere Varianten zur Verstellung des Hubes bei Kurvengetrieben.

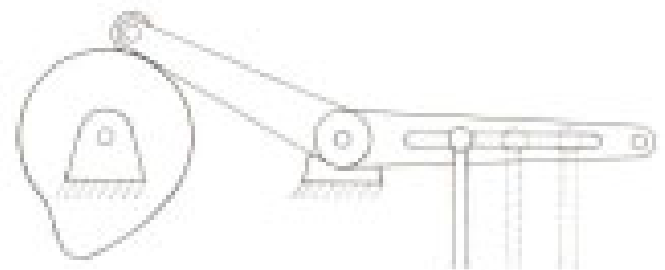


Fig. 3.99

Im Bild 3.99 ist die Länge des Schwinghebels unveränderlich, während der Hub des Abtriebes durch Verstellen nach Wunsch geändert werden kann. Als Experiment verwendet man eine bestehende Kurve und ermittelt das Zeit-Weg-Diagramm bei verschiedenen Einstellungen des Abtriebes, was durch Verschieben des Kurbelzapfens erreicht wird.

Bild 3.100 zeigt eine prinzipiell andere Anordnung zur Änderung des Hubes. Während die Länge des Hebelarmes des Abtriebes gleich bleibt, wird durch Verschiebung des Lagerbockes das Verhältnis zur Kurvenscheibe geändert.

Eine interessante und freiwillige Aufgabe besteht darin, mittels Versuchen die Veränderung der Bewegungsgesetze festzustellen. Man beginne damit, indem man einen Doppel-Hebel aus zwei Hebeln von je 75 mm Länge zusammenmontiert. Man fertigt alsdann eine beliebige Kurvenscheibe an, oder verwendet eine solche aus bisherigen Versuchen. Der Lagerbock wird an einer ersten Stelle befestigt. Um die Versuche zu erleichtern, kann der Lagerbock wie aus Fig. 3.101 ersichtlich, mittels einer Stellschraube verschiebbar angeordnet werden. Eine Skala und ein Zeiger werden befestigt, um die Stellungen und die daraus abgeleiteten Werte genau festhalten zu können. Man beginne den Versuch, wenn der Lagerbock so eingestellt ist, daß der Hebelarm mit der Kurvenrolle wie bei den bisherigen Beispielen abrollt und Kreisbogen wie in Fig. 3.35 beschreibt.

Die einzelnen Bewegungen werden auf einem Zeit-Weg-Diagramm eingetragen.

Um die Zeitabstände und den veränderlichen Hub genau erfassen zu können, werden am besten am Mechanismus eine Skala und ein Zeiger befestigt. Das Zeit-Weg-Diagramm wird in zwölf Teile eingeteilt, die je 30° darstellen. Der Hub wird an einer senkrechten Skala abgelesen. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen lassen sich auf Grund des Zeit-Weg-Diagrammes ermitteln.

Nachdem dies geschehen ist, verschiebe man den Lagerbock um einen Teilstrich der Skala. Am besten sind Teilstriche in 5 mm Abständen. Man erstellt aus das Zeit-Weg-Diagramm auch für diesen Fall, und zwar am besten mit anderer Farbe auf dem gleichen Diagramm, und wiederholt das Vorgehen für zwei bis drei weitere Teilstriche. Es entstehen mit der gleichen Kurvenscheibe vollständig verschiedene Kurven des Zeit-Weg-Diagrammes.

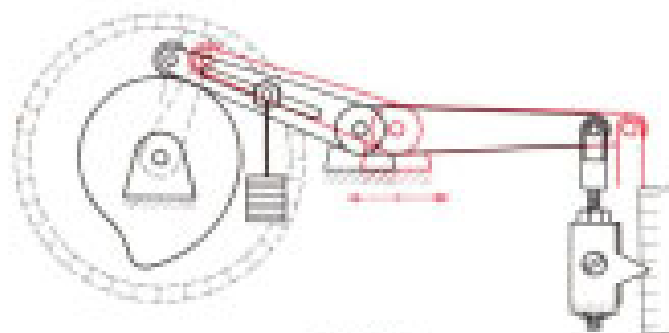


Fig. 3.100

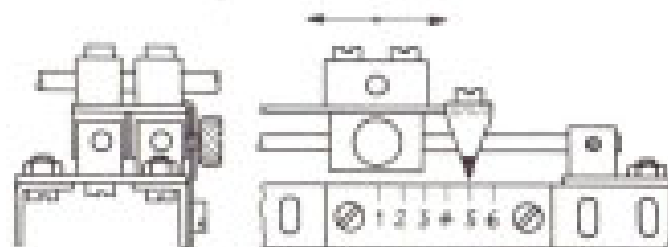


Fig. 3.101



Fig. 3.102

Von Dr. Ing. H. Brandenberger, Zürich

Kurven an Verarbeitungsmaschinen zu ermitteln ist eine wichtige Aufgabe, da doch die Leistung einer Maschine von der Güte der Kurvenscheiben abhängig ist. Leider finden wir nicht nur in der Literatur, sondern auch bei den ausführenden Firmen die Methode, die Kurvenscheiben der Werkstätte in Form von vorgezeichneten durch Punkte festgelegte Kurven anzugeben. Dies kommt daher, weil man bisher die Mittelpunktskurven der Rollen punktwise ermittelt und die Kurven der Scheiben als Äquidistante dazu festlegt. Die Kurven müssen deswegen genau ermittelt werden, weil die durch sie zu erzeugenden Beschleunigungen die Federkräfte, mit denen die Rollenhebel an die Kurven angedrückt werden, bestimmen. Da die Beschleunigungen jedoch von den Krümmungen der Bahnen abhängig sind, werden vorteilhaft die punktwise ermittelten Mittelpunktskurven der Rollen durch Krümmungskreise angenähert ersetzt, so daß auch die Kurven der Scheiben leicht als Kurven gleicher Evolute mit Angabe der Krümmungen der Werkstätte vorgeschrieben werden können. Dies erfordert allerdings die Beherrschung der graphischen Kinematik, um nachträglich aus gegebenen Krümmungsverhältnissen die Bahnbeschleunigungen der Rollen ermitteln zu können. Die anzuwendenden Ermittlungsverfahren der Kurven und die graphischen Methoden zur Bestimmung der Beschleunigungen werden aufgezeigt.

Die Aufgabe einer Kurvenscheibe soll darin bestehen, ein Organ während einer vorgegebenen Zeit eines bestimmten Weg zurücklegen zu lassen. Wir wollen also nur das Problem behandeln, wo am Anfang und am Ende der Bewegung das Organ sich jedesmal wieder in Ruhelage befindet. Dabei soll diese Stellungsänderung durch eine offene Kurve erzeugt werden, so daß von der Kurvenscheibe nur in einer Richtung eine Kraft ausgeübt werden kann, während in der anderen Richtung der Kraftschluß durch eine Feder erzeugt werden muß. Die kleinste maximale Beschleunigung bzw. Verzögerungsbeschleunigung wird dann auftreten, wenn diese jeweils einen konstanten Wert aufweist. Die Ermittlung der maximal auftretenden Beschleunigung ist deswegen wichtig, weil durch sie die Feder bestimmt wird, die das Abheben der auf der Kurvenscheibe ablaufenden Rolle zu verhindern hat.

Die bei gegebenen Verhältnissen auftretende maximale Beschleunigung kann zunächst rechnerisch erfüllt werden. Es soll z. B. (Fig. 3.104) der Rollenmittelpunkt A auf einem Hebel um M bei einem Weg von M um O von 48 mm in 0,06 Sekunden eine Strecke von 25 mm zurücklegen. Somit ist der halbe Weg von $s = 12,5$ mm in $t = 0,03$ Sekunden auszuführen. Bei jeweils gleichförmig beschleunigter Bewegung ergeben sich im Weg-Zeit-Diagramm zwei Parabelbögen. (Fig. 3.104)

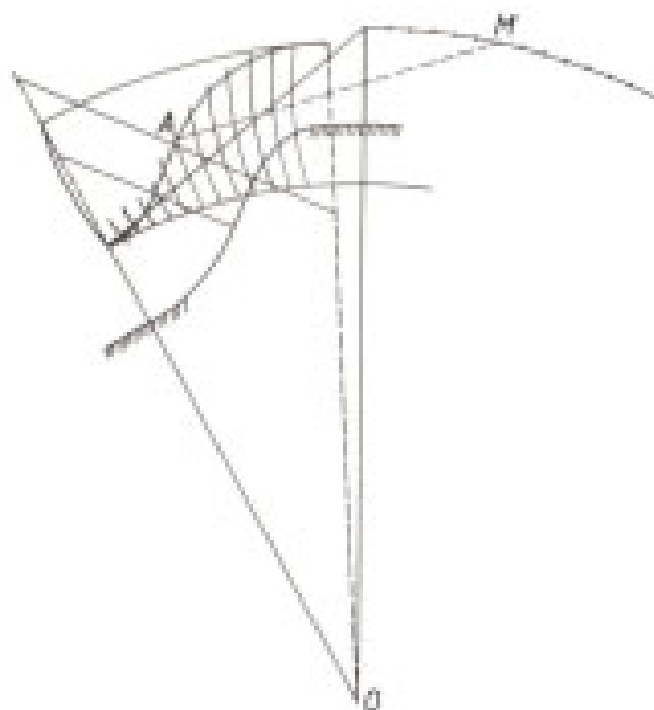


Fig. 3.103

Es ist $s = \frac{b}{2} t^2$ und die konstante Beschleunigung

$$b = \frac{2s}{t^2} = \frac{2 \cdot 0,0125}{0,03^2} = 27,8 \text{ m/s}^2$$

Die dabei erreichte maximale Geschwindigkeit

$$v = b \cdot t = 27,8 \cdot 0,03 = 0,834 \text{ m/s}$$

Durch Übertragen des Weg-Zeit-Diagramms auf die Verhältnisse der Kurvenscheibe ergibt sich (Bild 1) zunächst die Mittelpunktslinie des Rollenmittels A und dann als Äquidistante im Abstand des Rollenhalbmessers die Form der Kurvenscheibe.

Die punktweise Ermittlung der Rollenmittelpunktskurve erlaubt auch nur eine punktweise Festlegung der Form der Kurvenscheibe. Für die Einhaltung einer bestimmten Beschleunigung ist jedoch die Krümmung der Bahn maßgebend, so daß man auch der Werkstätte die Form der Kurvenscheibe nicht durch punktweise Kotierung angeben soll, sondern durch Vorschreiben der Krümmungsradien der Kurven. Der Vorteil liegt weiter noch darin, daß die einzelnen Kurvenabschnitte mit Hilfe eines Rundtisches auf genaue Form gefräst werden können, oder zumindest, daß man die Kurvenscheibe während der Fabrikation mittels Radiuslehren kontrollieren und dann nacharbeiten kann.

Im allgemeinen wird es genügen, wenn man die zeichnerisch möglichst genau ermittelte Form der Kurve durch Kreisbogen ersetzt und die Mittelpunkte und Radien durch Maßzahlen festlegt. Um die dabei auftretenden Abweichungen von den errechneten Beschleunigungen nicht als Fehler in Kauf nehmen zu müssen, kann man an den Übergangsstellen von zwei Kreisbogen mit verschiedenen Radien mit Hilfe der Kinematik die nun wirklich auftretenden Beschleunigungen graphisch ermitteln. Im vorliegenden Fall soll ein anderer Weg beschritten werden. Für die Stelle des Überganges von der gleichförmig beschleunigten Bewegung in die gleichförmig vergrößerte Bewegung (Stelle A der Rolle in Bild 1) soll für die errechneten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhältnisse des Rollenmittels der Krümmungsradius der Bahn des Punktes A ermittelt werden, und zwar für den Teil der Kurvenscheibe, dessen Zwanglauf durch die Feder aufgebracht werden muß. Dabei soll angenommen werden, daß der Mittelpunkt des Hebels M still stehe und sich die Kurvenscheibe in Richtung A 1 (Fig. 3.185) um O drehen. Die Größe dieser Geschwindigkeit errechnet sich aus dem Weg von M um O von 48 mm und dem Verhältnis von

$$\frac{OA}{OM} = \frac{105}{120} \text{ zu } \frac{48}{120} \cdot 105 = 42 \text{ mm}$$

Es sind dabei folgende Bewegungen zu unterscheiden:

1. Die *Absolutbewegung* des Rollenmittels A um den festen Punkt M, als Kreisbahn.
2. Die *Führungsbewegung* des mit A zusammenfallenden Punktes der Kurvenscheibe als Kreisbahn des Punktes A um den festen Punkt O, und
3. die *Relativbewegung* des Rollenmittelpunktes A auf der Kurvenscheibe längs einer Bahn, dessen Krümmungsmittelpunkt aufzusuchen ist.

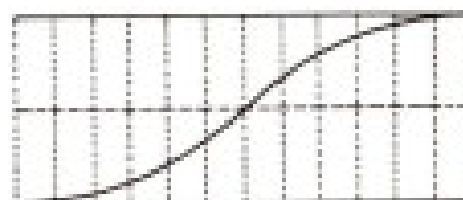


Fig. 3.184

Die Absolutgeschwindigkeit des Rollenmittelpunktes A als Bewegung um den Punkt M haben wir rechnerisch bereits mit

$$v_A = 0,834 \text{ m/s}$$

ermittelt. Führen wir in (Fig. 3.105) einen Geschwindigkeitsmaßstab $v = 1:25$ ein, so ergibt sich die Geschwindigkeit des Punktes A

$$v_A = \frac{834}{25} = 33,3 \text{ mm} = A2$$

Die Tangentialbeschleunigung der Absolutbewegung des Punktes A bei seiner Bewegung um M wurde berechnet mit

$$b_A^{(tang)} = 27,8 \text{ m/s}^2$$

Entsprechend dem Geschwindigkeitsmaßstab $1:25$ ergibt sich der Beschleunigungsmaßstab zu $1:25^2 = 1:625$, so daß

$$b_A^{(tang)} = \frac{27800}{625} = 44,5 \text{ mm} = A4$$

ist. (Die Richtung A4 zeigt deswegen zu Punkt O, weil die Hebelhänge MA für die Mittelstellung so gewählt wurde, daß Winkel MAO gleich 90° ist.

Die Führungsgeschwindigkeit des Punktes A um O ergibt sich entsprechend dem Weg 42 mm, wie berechnet, für A um O während der Zeit von 0,06 Sekunden zu

$$v_{AFO} = \frac{0,042}{0,06} = 0,7 \text{ m/s}$$

und im Maßstab $1:25$ dargestellt, wird

$$v_{AFO} = 28 \text{ mm} = A1$$

Zwischen der Absolutbewegung des Rollenmittelpunktes A um M (v_A), der Führungsbewegung des mit A zusammenfallenden Punktes der Kurvenscheibe (v_{AFO}) und der Relativgeschwindigkeit des Punktes A auf der Kurvenscheibe v_{Arel} besteht die allgemeine vektorielle Beziehung

$$v_A = v_{AFO} + v_{Arel} \dots\dots\dots (I)$$

daraus ergibt sich

$$v_{Arel} = v_A - v_{AFO} \dots\dots\dots (I')$$

Wegen $v_A = A2$ und $v_{AFO} = A1$ wird

$$v_{Arel} = A2 - A1 = A2 + 1A = A2 + 23 = A3$$

da $23 = 1A$ gemacht wurde.

Die Richtung A3 stellt somit die Tangente an die Relativbahn des Rollenmittelpunktes A auf der Kurvenscheibe dar.

Zur Ermittlung des Krümmungsmittelpunktes der Kurve, welche der Rollenmittelpunkt auf der Kurvenscheibe beschreibt, ist die Beschleunigung der Relativbewegung des Punktes A gegen das System der Kurvenscheibe zu ermitteln.

Allgemein besteht die Gleichung (siehe Coriolisbeschleunigung Abschnitt 9, Fig. 9.9'' bis 9.11'')

$$b_A = b_{AFO} + b_{Arel} + b_{Cor} \dots\dots\dots (2)$$

woraus sich ergibt

$$b_{Arel} = b_A - b_{AFO} - b_{Cor} \dots\dots\dots (2')$$

Die Beschleunigung der Absolutbewegung des Rollenmittelpunktes A während seiner Bewegung um M setzt sich aus seiner Normal- und Tangentialbeschleunigung zusammen.

Es ist

$$b_A = b_A^{(tang)} + b_A^{(norm)}$$

$b_A^{(tang)}$ kennen wir aus der Rechnung:

$$b_A^{(tang)} = \frac{v_A^2}{MA} = v_A \cdot \frac{v_A}{MA} = A2 \cdot \frac{A2}{MA} = 26 = 49$$

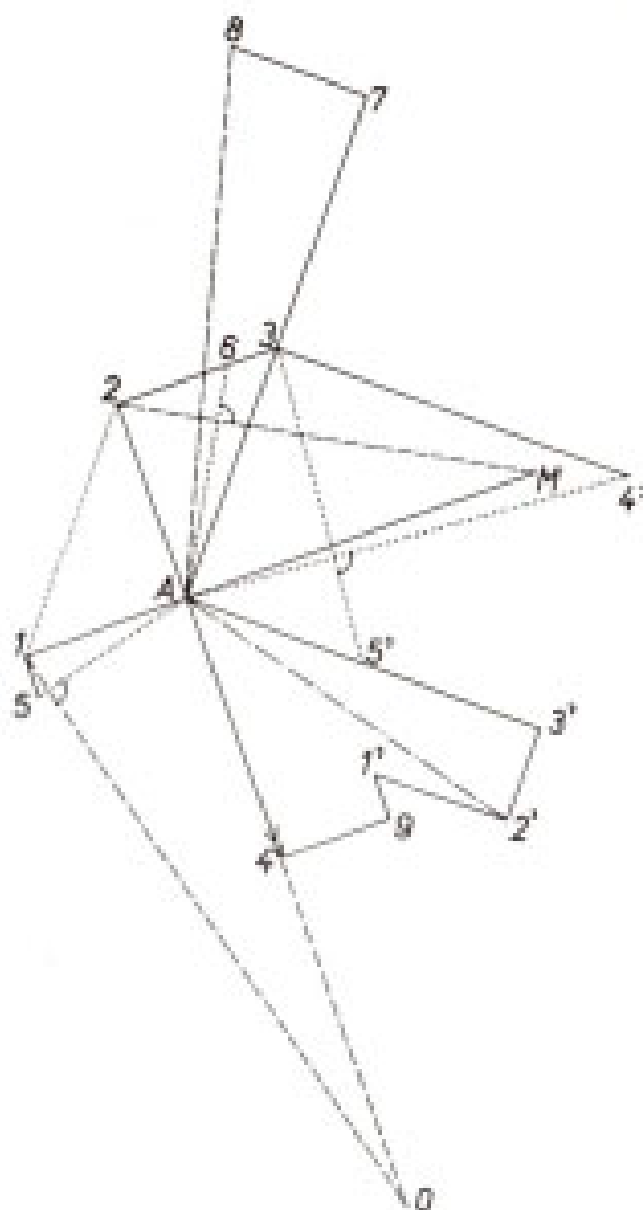


Fig. 3.105

Es ist somit

$$b_A = b_A^{(tang)} + b_A^{(norm)} = A4 + 49 = A9$$

Die Beschleunigung der Führungsbewegung, d. h. des mit A zusammenfallenden Punktes des Systems der Kurvenscheibe $b_{A, Fu}$ setzt sich zusammen aus einem tangentialen und einem normalen Teil. Wegen der gleichförmigen Bewegung der Kurvenscheibe ist

$$b_{A, Fu}^{(tang)} = 0$$

und

$$b_{A, Fu}^{(norm)} = \frac{v_{A, Fu}^2}{OA} = A1 \frac{A1}{OA} = 15 = 1'9$$

Die Coriolisbeschleunigung b_{Cor} gleich zweimal der Relativgeschwindigkeit multipliziert mit der Winkelgeschwindigkeit der Führungsbewegung, ergibt sich zu

$$b_{Cor} = 2 \cdot v_{A, Rel} \omega_{Fu} = 2A3 \frac{A1}{OA} = 78 = 2'1'$$

Entsprechend der Gleichung (2') erhält man

$$b_{A, Rel} = A2'$$

Diese Gesamtbeschleunigung der Relativbewegung des Punktes A auf der Kurvenscheibe kann zerlegt werden in einen normalen und einen tangentialen Teil, hinsichtlich seiner Relativbahn mit der tangentialen Richtung A3. Es ist

$$b_{A, Rel} = A3' + 3'2'$$

wobei

$$A3' = b_{A, Rel}^{(norm)} = 34'$$

Aus der allgemeinen Gleichung

$$b_{A, Rel}^{(norm)} = \frac{v_{A, Rel}^2}{r}$$

erhält man den Krümmungsradius der Relativbahn des Rollenmittelpunktes A auf der Kurvenscheibe

$$r = v_{A, Rel} \frac{v_{A, Rel}}{b_{A, Rel}^{(norm)}} = A3 \frac{A3}{34'} = 5'A$$

mit 5' als den Krümmungsmittelpunkt für die Bahn des Rollenmittelpunktes A auf der Kurvenscheibe, der zu suchen war.

Es besteht aus die Möglichkeit für jeden anderen Punkt der Bahn von A den Krümmungsmittelpunkt auf gleiche Art zu bestimmen. Begnügt man sich nicht für die Stelle A mit dem Krümmungsmittelpunkt der Bahn des Punktes A auf der Kurvenscheibe, sondern möchte für die angenommene Bewegung der konstanten Beschleunigung oder für ein anderes Beschleunigungsgesetz auch noch die Krümmung der Evolute der Bahnkurve ermitteln, so kann man dies unter Heranziehung der höheren Beschleunigungen. Wird die erste Beschleunigung der Tangentialbewegung des Punktes A um M als konstant angenommen, so ergeben sich die höheren tangentialen Beschleunigungen des Punktes A und M alle zu null.

Die allgemeine Gleichung

$$b_A = b_{A, Fu} + b_{A, Rel} + b_{Cor}$$

gilt auch für die höheren Beschleunigungen.

Zwischen der Beschleunigung eines Punktes und dem Krümmungsradius der Bahn des Punktes und der ihrer Evolute, sowie den Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen der Bahnnormalen²⁾ bestehen folgende Beziehungsgleichungen:

$$v = r_1 \omega$$

$$b = r_1 \lambda + \omega^2 (r_1 - r_2)$$

$$b' = r_1 \lambda' + 3\omega \lambda (r_1 - r_2) + \omega^2 (r_1 - 2r_2 + r_3)$$

$$b'' = r_1 \lambda'' + 4\omega \lambda' (r_1 - r_2) + 3\lambda^2 (r_1 - r_2) + 6\omega^2 \lambda (r_1 - 2r_2 + r_3) + \omega^2 (r_1 - 3r_2 + 3r_3 - r_4)$$

$$b''' = r_1 \lambda''' + 5(r_1 - r_2)\omega \lambda'^2 + 10(r_1 - r_2)\lambda \lambda' +$$

$$+ 10(r_1 - 2r_2 + r_3)\omega \lambda'^2 +$$

$$+ 15(r_1 - 2r_2 + r_3)\omega \lambda'^2 +$$

$$+ 10(r_1 - 3r_2 + 3r_3 - r_4)\omega \lambda'^2 +$$

$$+ (r_1 - 4r_2 + 6r_3 - 4r_4 + r_5)\omega^2 \lambda'$$

Da sich die Rolle mit dem Mittelpunkt A bloß um die feste Achse eines Hebels dreht (M), und die Kurvenscheibe ebenfalls eine Bewegung um eine feste Achse ausführt, sind die für Absolutbewegung des Punktes A und für seine Führungsbewegung die Radien r_1, r_2 usw. gleich null zu setzen, während für die Relativbewegung diese Werte zu ermitteln wären.

Für die höheren Beschleunigungen erhält man auch höhere Coriolisbeschleunigungen²⁾, wobei folgende Gleichungen zur Geltung kommen:

$$v_A = v_1 + v_2$$

$$b_A = b_1 + b_2 + 2\omega v_2$$

$$b'_A = b'_1 + b'_2 + 3\omega b_2 + 3\lambda v_2$$

$$b''_A = b''_1 + b''_2 + 4\omega b'_2 + 6\lambda b_2 + 4v_2 \lambda'$$

Führt die Kurvenscheibe, wie angenommen werden kann, eine gleichförmige Drehung aus, so sind die ersten und höheren Winkelbeschleunigungen gleich null zu setzen.

Wie man allgemein aus der Geschwindigkeit der ersten und der höheren Beschleunigungen zu den Krümmungen der Bahn einer Kurve und ihrer ersten und höheren Evoluten kommt, ist ebenfalls in der angegebenen Abhandlung enthalten. Damit ist das gestellte Problem auch im Hinblick auf die Krümmungen der Evoluten gelöst.

²⁾ Brandenberger, P.: Die graphischen Methoden der Bewegungslehre (Kinematik) (II. Teil: Die höheren Beschleunigungen. Helvetica Physica Acta 1930) S. 110/11.