

Die Getriebe in Feuerleitgeräten

Von Regierungsbaumeister a. D. Dr.-Ing. A. Kuhlenskamp VDI, Berlin

Die Aufgabe der Feuerleitgeräte besteht im mechanischen Lösen mathematischer und geometrischer Beziehungen. Die hierfür entwickelten Getriebe zum Ausführen von Additionen und Multiplikationen, zum Bestimmen trigonometrischer Funktionen und des Differentialquotienten sowie zum Lösen von Funktionen mit zwei und mehreren Veränderlichen werden in ihrem grundsätzlichen Aufbau behandelt und durch Zeichnungen erläutert.

Die Feuerleitgeräte, deren eine Art — die Kommando-geräte für Flugabwehrkanonen (Flak) — hier bereits behandelt wurde¹⁾, dienen dazu, auf Grund der Zielverfolgung mit optischen Einrichtungen die Schußwerte, die zum Bekämpfen des Zieles an die Geschütze zu geben und dort einzustellen sind, zu ermitteln. Feuerleitgeräte gibt es demnach auf Schiffen und an der Küste für See- und Luftziele und in ausländischen Armeen für die Flugabwehr. Die Getriebe dieser Geräte sind dadurch gekennzeichnet, daß sie zum Lösen geometrischer und mathematischer Beziehungen dienen und daß zum Bedienen der Geräte keine besonderen Kenntnisse und Vorbildungen vorausgesetzt werden dürfen, sondern daß die Handhabung schnell von jedem Mann erlernbar sein muß. Daß des ferneren Beschränkung auf den Mindestaufwand, einfache und unempfindliche Ausführung mit Rücksicht auf den exerziermäßigen Gebrauch erforderlich sind, braucht nicht besonders hervorgehoben zu werden. Letzteres gilt insbesondere für die Flakkommandogeräte des Heeres.

Bildung der geometrischen Summe zweier Komponenten

Geometrische Lösung. In den Lösungsmöglichkeiten der Aufgaben der Feuerleitgeräte kann man zwei Wege unterscheiden, die am besten an einem Beispiel erläutert werden. Eine häufig vorkommende Aufgabe ist die der Bildung der geometrischen Summe zweier Komponenten. Sie kommt vor bei Schiffen zur Ermittlung der „relativen“ Fahrt aus der eigenen Fahrt und der des Gegners, bei Luftzielen zum Bestimmen der wirklichen Zielgeschwindigkeit aus der Eigengeschwindigkeit und der Windgeschwindigkeit, bei der „Vorhaltrechnung“¹⁾ zum Bestimmen der Treffentfernung und deren Seitenwinkel aus der Meßentfernung und deren Richtung und der Auswanderungstrecke. Die eine Lösung dieser Aufgabe besteht in Anlehnung an Abb. 1a in der Nachbildung des aus den der Größe und Richtung nach gegebenen Seiten a und b und der zu suchenden Strecke c unter dem Winkel γ gegenüber einer Hauptrichtung gebildeten Dreiecks. Derartige einfache Geräte sind unter der Bezeichnung „Dreieckrechner“ oder „Dreieckauflöser“ im Heer sehr viel im Gebrauch und dienen auch dazu, bei einem Stellungsunterschied zwischen Beobachtungsstelle und Geschütz die Seitenrichtung und Entfernung des Zieles, bezogen auf das Geschütz, aus den für den Beobachtungsstand bekannten Größen zu bestimmen. Eine Ausführungsform eines solchen Gerätes zeigt Abb. 1b. Über einer mit einer Teilung versehenen Kreisscheibe bewegen sich konzentrisch zwei mit Teilung versehene Lineale a und c und auf dem einen der beiden (a) verschiebbar ein drittes (b). Das Lineal b wird nach Verschieben in den Mittelpunkt mit Hilfe der Kreisteilung unter den Winkel β verstellt und dann auf dem Lineal a verschoben. Im Schnittpunkt der Lineale b und c liest man auf c die gesuchte Strecke und an der Kreisteilung den Winkel γ zwischen null und dem Lineal c ab.

Algebraische Lösung. Außer der geometrischen Lösung dieser Aufgabe ist grundsätzlich eine zweite möglich, die algebraische, die, ausgehend von den sich aus dem Pythagorassatz ergebenden Gleichungen

$$c^2 = a^2 + b^2 + 2ab \cos(\beta - \alpha)$$

und

$$\sin(\gamma - \alpha) = \sin(\beta - \alpha) \frac{b}{c}$$

¹⁾ A. Kuhlenskamp, Z. VDI Bd. 77 (1933) S. 949.

die gesuchten Werte c und γ errechnet. Wenn auch die als Beispiel angeführte mit so einfachen Mitteln geometrisch lösbare Aufgabe niemals in der verwickelten letzteren Art gelöst wird, so zeigt sie doch die beiden grundsätzlichen Möglichkeiten. Sobald es sich aber um sphärische Probleme, wie z. B. den Einfluß der Verkan- tung des Geschützes infolge schiefen Räderstandes oder an Bord infolge der Schiffbewegung auf die Sprengpunkt- lage, handelt, deren geometrische Darstellung konstruktiv Schwierigkeiten macht, sind beide Lösungen praktisch durchaus möglich. Die geometrischen und algebraischen Lösungen sind auch in den nachfolgend behandelten Ge- trieben erkennbar.

Die besonderen Aufgaben der Feuerleitgeräte haben zu Entwicklungen von mechanischen Rechengliedern ge- führt, die z. T. in keinem anderen Gebiete der Technik verwendet werden. Von der einfachsten Rechenoperation, der Addition, bis zur Lösung von Gleichungen mit zwei und mehreren Unbekannten sind die verschiedensten Lösungsmöglichkeiten vorhanden, deren zweckmäßigste Verwendung von den jeweiligen besonderen konstruktiven Verhältnissen abhängig ist. Von der großen An- zahl derartiger Getriebe seien im folgenden einige für die häufigsten Rechenoperationen angeführt.

Addition

Das bekannteste Additionsgetriebe ist das Differen- tial. Abb. 2 zeigt ein Kegelrad-Differential. Gehen in der gezeichneten Weise die Summanden a und b in das Getriebe ein, so liefert die Achse der Planetenräder die halbe Summe $\frac{a+b}{2}$.

In einer anderen Art kann nach Abb. 3 die halbe Summe als hin- und hergehende Bewegung gewonnen werden, wenn an den Gestängen I und II die beiden Sum- manden eingestellt werden. In ähnlicher Weise lassen sich auch drei Summanden addieren.

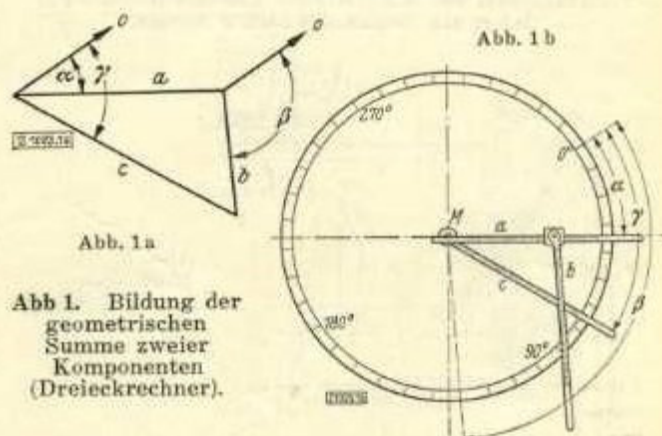


Abb. 1. Bildung der geometrischen Summe zweier Komponenten (Dreieckrechner).

Abb. 1a. Aufgabe: Die Komponenten a und b sind nach ihren Größen und den Winkeln α und β zu einer Hauptrichtung null bekannt; gesucht ist c unter Winkel γ .

Abb. 1b. Lösung: Um den Mittelpunkt M sind die Lineale a und c drehbar. a wird unter Winkel α eingestellt, b nach Verschieben in den Mittelpunkt M unter β und nach der Teilung auf a eingestellt. c wird so lange um M gedreht, bis am b -Lineal die bekannte Größe im Schnitt mit c erscheint. Auf c ist dann die geometrische Summe und an der Kreisteilung der Winkel γ abzulesen.

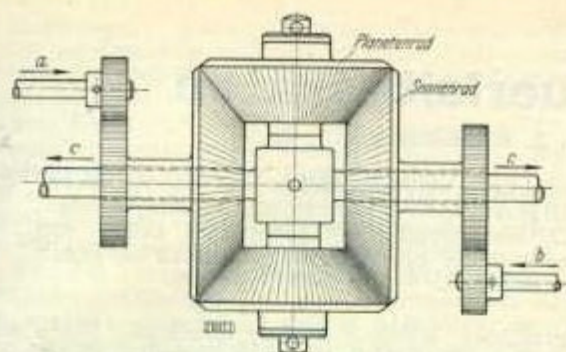


Abb. 2. Kegelrad-Differential.

a und b sind die auf die Sonnengrader gehenden Summanden. Das Planetenräderpaar liefert als Ergebnis c die halbe Summe, also $c = \frac{a+b}{2}$.

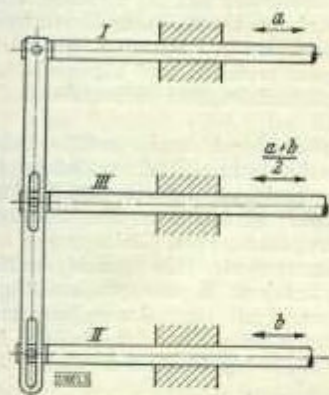


Abb. 3. Additionsgetriebe.

Die Summanden a und b werden an den Gestängen I und II als Verschiebung eingestellt. Das mittlere Gestänge III ergibt die halbe Summe.

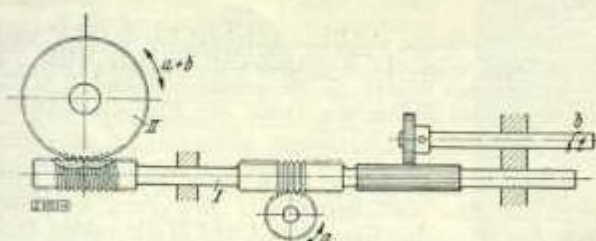


Abb. 4 (unten). Additionsgetriebe.

Der Summand b geht als Drehwert, der Summand a als Verschiebewert auf die Welle I. Das Schneckenrad II liefert die Summe aus beiden Werten.

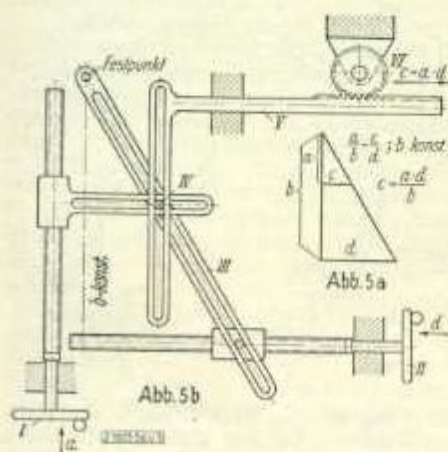
Abb. 5
Multiplikationsgetriebe.Abb. 5a. Geometrische Grundlage:
Für $b = \text{konst.} = 1$ ist $c = a \cdot d$.

Abb. 5b. Lösung: Durch Drehen am Handrad II wird die Schere III um einen dem Faktor d entsprechenden Betrag ausgelenkt. Durch Drehen am Handrad I wird der Stift IV um einen dem Faktor a entsprechenden Betrag in der Schere verschoben. Durch Schlitten V geht das Ergebnis auf Ritzel VI.

Ein weiteres Additionsgetriebe zeigt Abb. 4. Die Schnecke kann einerseits axial verschoben und andererseits gedreht werden, so daß auf das Schneckenrad die Summe aus der Verschiebung und der Drehung gelangt. Die Zahnstange muß dabei in besonderer, aus Abb. 4 ersichtlicher Weise ausgeführt sein.

Multiplikation

Dem in Abb. 5 dargestellten gebräuchlichsten Multiplikationsgetriebe liegt die nach dem Strahlensatz bestehende Beziehung $a : b = c : d$, Abb. 5a, zugrunde. Wird $b = \text{konst.} = 1$ gesetzt, so ist $c = a \cdot d$. Die mechanische Lösung ist aus Abb. 5b ohne weiteres ersichtlich. An dem Handrad I wird der eine Faktor a und an dem Handrad II, dessen Achse vom Festpunkt den konstanten Abstand b hat, der Faktor d eingestellt. An dem Ritzel V wird das Produkt $a \cdot d$ abgenommen.

Ein anderes Multiplikationsgetriebe²⁾ geht von der Tatsache aus, daß die Kurven gleicher Ergebnisse für verschiedene Faktoren durch gleichseitige Hyperbeln dargestellt werden, Abb. 6a. In der mechanischen Lösung dieses Getriebes werden die sich für die Produkte ergebenden Hyperbeln derart aneinandergereiht, daß ein Kurvenkörper entsteht, bei dem die Radialschnitte für einen bestimmten a -Wert des einen Faktors die Werte des anderen Faktors b und des Ergebnisses c in Polarkoordinaten angeben. Wird demnach durch Drehen des Zahnrades I der Abnahmestift III axial verschoben und dadurch der a -Wert eingeführt, Abb. 6b, so ist der am Handrad II einzustellende Wert des Produktes c dann richtig, wenn an der Anzeigeeinrichtung IV der bekannte Wert des zweiten Faktors b erscheint.

Trigonometrische Funktionen

Von den trigonometrischen Funktionen können die Sinus- und Cosinus-Werte oder unmittelbar die Produkte $a \sin a$ oder $a \cos a$ nach Abb. 7b durch Verwirklichung der geometrischen Darstellung (Abb. 7a) gefunden werden. Die Einstellspindel des a -Wertes sitzt fest auf dem großen Zahnrad II, das vom Ritzel I nach dem Winkel a verdreht wird. An den beiden Schlitten wird einerseits $a \cos a$, andererseits $a \sin a$ abgenommen.

Eine andere Möglichkeit, die Sinus- und Cosinus-Werte in Form von Kurven- oder Nockenscheiben darzustellen, so daß der Funktionswert als Radiusvektor nach Verdrehen um den Winkelwert a abnehmbar wird, dürfte bekannt sein.

Ein Tangensgetriebe zeigt Abb. 8. Die mit dem Handrad I verschene Einstellspindel a ist von dem festen Dreh-

²⁾ Engl. Patent 348 707.

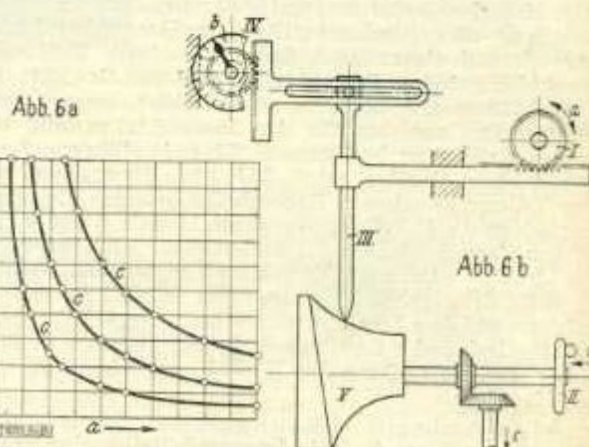
Abb. 6a. Theoretische Grundlage: Die Kurven für das Ergebnis c sind gleichseitige Hyperbeln.

Abb. 6b. Lösung: Durch Faktor a wird der Abnahmestift III axial verschoben. Der Faktor b kann an der Anzeigevorrichtung IV abgelesen werden. Durch das Handrad II wird der Kurvenkörper V so lange gedreht, bis die Anzeigevorrichtung den Faktor b anzeigt.

punkt M des Hebels II um den konstanten senkrechten Abstand b entfernt gelagert. In dem sich aus a , b und dem Hebel II bildenden rechtwinkligen Dreieck ist, wenn α der Winkel bei M ist, $\tan \alpha = a/b$, oder für $b = \text{const} = 1$ ist $\tan \alpha = a$. Wird demnach am Handrad I so lange gedreht, bis auf der Anzeigevorrichtung III der bekannte Winkel α angezeigt wird, so ist die Verdrehung des Handrades gleich $\tan \alpha$.

Differentiation

Eine häufig vorkommende Aufgabe ist die der Bestimmung von Ableitungen nach der Zeit irgend welcher Bewegungsgrößen, sei es der des Gegnerweges, um die Zielgeschwindigkeit zu ermitteln, seien es die der Winkelveränderungen beim Verfolgen des Zieles zum Errechnen der Winkelgeschwindigkeiten. Grundsätzlich dienen diesen Zwecken die Umdrehungszähler oder Tachometer. Ihr Verwendungsbereich ist jedoch dadurch stark begrenzt, daß die Zahl der Umdrehungen in der Minute häufig sehr klein ist, wodurch die Ungleichmäßigkeiten der Bewegung bei Handantrieb zu stark pendelnden Anzeigen führen, und daß der Geschwindigkeitswert nicht unmittelbar in den Rechengang, sondern nur zur Anzeige gebracht werden kann. Man bedient sich deshalb mit Vorliebe der Reibradgetriebe, die nach Abb. 9 und 10 aus einer mit konstanter Umdrehungszahl angetriebenen Reibrolle I , einer radial dazu verstellbaren Reibrolle II und einer radial gelagerten Reibwalze III bestehen. An der Reibrolle besteht immer Gleichheit der Umdrehungsgeschwindigkeit der Reibrolle und der Reibwalze. In einer Stellung r_1 der Reibrolle ist die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe $2r_1\pi n$, wobei n eine Konstante ist, und die Umdrehungsgeschwindigkeit der Walze $2R\pi n$, wobei R eine Konstante ist. Da beide gleich sind, folgt

$$2r_1\pi n = 2R\pi n$$

oder, da $2\pi n = \omega$ ist,

$$\omega r_1 = R\omega_1 \text{ oder } r_1 = \text{const. } \omega_1,$$

d. h. die Stellung der Reibrolle ist immer direkt proportional der ersten Ableitung nach der Zeit des von der Reibwalze abgenommenen Wertes. Stellt der von der Walze herausgehende Wert a den Weg des Zieles dar, so gibt der Halbmesser r_1 und damit die Stellung der Reibrolle die Geschwindigkeit des Zieles an.

Das Reibradgetriebe kann weiterhin zum Ausführen von Multiplikationen mit den zeitlichen Ableitungen benutzt werden, wenn der Antrieb der Reibrolle nicht mit konstanter Drehzahl, sondern nach dem Kehrwert des mit den Ableitungen zu multiplizierenden Faktors geregelt wird.

Eine andere Möglichkeit zum Bestimmen zeitlicher Ableitungen ist nach Abb. 11 in Anlehnung an die geometrische Bestimmung des Differentialquotienten die, den zu differenzierenden Wert aufzuzeichnen und die Tangente daran zu legen. Eine derartige Einrichtung besteht aus einer mit gleichmäßiger Geschwindigkeit abrollenden Schreibfläche I , auf die mit einem Schreibstift die Kurve des Wertes aufgezeichnet wird. Mit Hilfe eines Handrades IV wird ein durchsichtiger Zeiger III immer so gedreht, daß er die Tangente an die Kurve bildet. Ist der aufgeschriebene Wert z. B. der Seitenwinkel α zum Ziel, so ist bei Zwischenschaltung eines Tangensgetriebes nach Abb. 8 der Drehwert am Handrad gleich $\tan \alpha$ und damit gleich der Winkelgeschwindigkeit $d\alpha/dt$.

Funktionen mit zwei Veränderlichen

Eine besondere Rolle in den Feuerleitgeräten spielt die Ermittlung und Verarbeitung der der Ballistik des Geschützes betreffenden Funktionen. Die Schußtafel, Abb. 12, gibt für jedes durch Geschosform, Kaliber und Anfangsgeschwindigkeit gegebene Geschos die empirisch-rechnerisch gefundenen Gesetzmäßigkeiten an, die zwischen den vom Geschos unter den verschiedenen Rohrerhöhungen zurückgelegten Entfernungen und Höhen und den Flugzeiten bestehen. Während für waagerechte

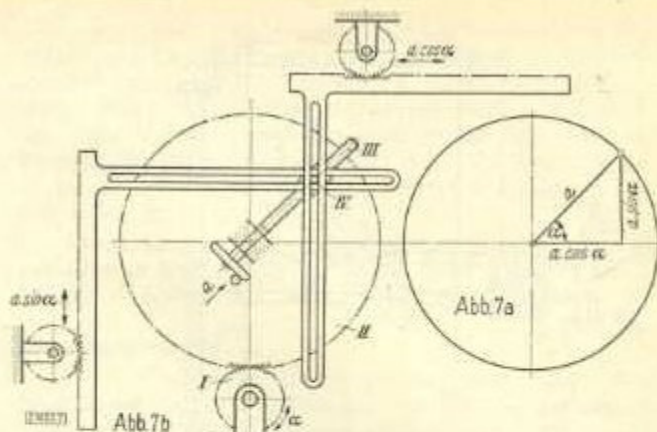


Abb. 7. Sinus-Cosinus-Getriebe.

Abb. 7a. Geometrische Grundlage.

Abb. 7b. Lösung: Durch Ritzel I wird das große Zahnrad II um den Winkel α verdreht. Auf II sitzt festgelagert Spindel III, an der der Wert α eingestellt wird. Das Kreuzschlittenpaar wird durch Stein IV nach den Werten $a \sin \alpha$ und $a \cos \alpha$ verschoben.



Abb. 8. Tangensgetriebe.

Hebel II ist im konstanten Abstand b von Spindel a in dem festen Drehpunkt M gelagert. Der Hebel II wird durch den auf Spindel a verschiebbaren Stift gedreht. Der Drehwert am Handrad I ist gleich $\tan \alpha$, wenn Hebel II um den an der Anzeigevorrichtung III abzulesenden Winkel α ausgelenkt worden ist.

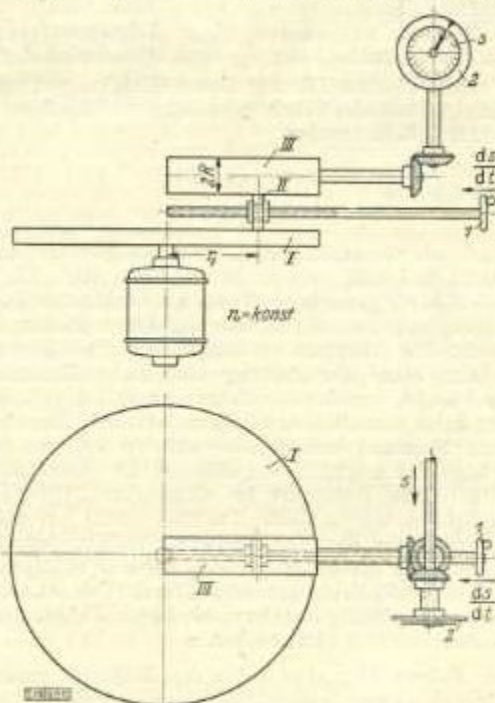


Abb. 9 und 10. Reibradgetriebe zur Differentiation.

Der Wert des zu differenzierenden Wertes a geht auf den inneren Zeiger der Anzeigevorrichtung 2. Durch Drehen am Handrad I wird die Reibrolle II verschoben und die Umdrehungsgeschwindigkeit der Reibwalze III so gesteuert, daß der Folgezeiger der Einrichtung 2 mit dem inneren Zeiger in Deckung bleibt. Dann ist der Drehwert am Handrad I gleich der ersten Ableitung des Wertes a nach der Zeit.

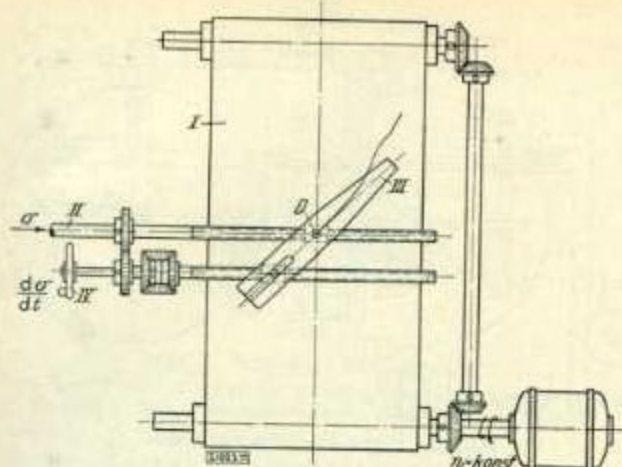


Abb. 11. Graphische Differentiation.

Auf das mit gleichmäßiger Geschwindigkeit angetriebene Schreibband I wird der durch Welle II hereinkommende Winkel σ aufgezeichnet. Das durchsichtige Lineal III, dessen Drehpunkt D mit der Achse des Schreibstiftes zusammenfällt, wird durch Drehen am Handrad IV in die Tangente an die Kurve gelegt. Da der Antrieb über ein Tangensgetriebe, vgl. Abb. 8, erfolgt, ist der Dreh-

wert des Handrades gleich $\tan \sigma = \frac{d\sigma}{dt}$.

Ziele (Seeziele) der Aufsatzwinkel (d. i. der Winkel, den das Rohr beim Abschuss mit der Waagerechten bildet) ein Maß für die Entfernung und die Geschossflugzeit t ist, ist bei Luftzielen eine doppelte Abhängigkeit vorhanden. Unter gleichen Rohrerhöhungswinkeln φ können ganz verschiedene Ziele in verschiedenen Höhen und mit verschiedenen Entfernungen je nach der Länge der Geschossflugzeit beschossen werden. Bei Luftzielen sind demnach der Aufsatzwinkel und die Geschossflugzeit von zwei willkürlich Veränderlichen abhängig, wobei diese beiden aus folgenden Werten zu wählen sind: Schrägentfernung e , Höhe h , Kartenentfernung e_K und Höhenwinkel γ .

Zur mechanischen Lösung dieser Gleichungen mit zwei unabhängig Veränderlichen geht man verschiedene Wege. Man wählt beispielsweise

$$\varphi = f(e_K, h)$$

$$t = f_1(e_K, h)$$

entnimmt die bestehenden Gesetzmäßigkeiten aus der Schußtafel und trägt sie in einem Plan, Abb. 13, derart auf, daß sich die gesuchten Werte als Ordinaten aus einer Darstellung ergeben, die Kurven gleicher Höhen enthält und in der die Abszisse die Kartenentfernungen angibt. Wird dann diese Darstellung auf einer Trommel befestigt, Abb. 14, vor der ein Zeiger gemäß der Kartenentfernung axial verschoben wird, so ist nach Kenntnis der Höhe die Trommel lediglich so weit zu drehen, daß der Zeiger über der angegebenen Höhe steht. Der am Handrad eingeführte Drehwert ist dann direkt proportional dem gesuchten Werte. Der Nachteil dieses oft angewendeten Verfahrens der Verwendung von Kurventrommeln ist der, daß zur Ermittlung eines jeden Funktionswertes ein besonderer Bedienungsmann erforderlich ist, der ständig einen zwangsläufig axial verschobenen Zeiger auf einer bestimmten Kurve zu halten hat.

Der andere Weg, durch den der Bedienungsmann und seine individuellen Bedienungsfehler vermieden werden, ist der der selbsttätigen Bestimmung mit Hilfe von Kurvenkörpern, Abb. 15 und 16. Diese bestehen aus einer sehr großen Anzahl einzelner Kurvenscheiben, von denen beispielsweise jede für eine bestimmte Höhe gilt und in Polarkoordinaten aufgetragen den gesuchten Funktionswert in Abhängigkeit von beispielsweise der Kartenent-

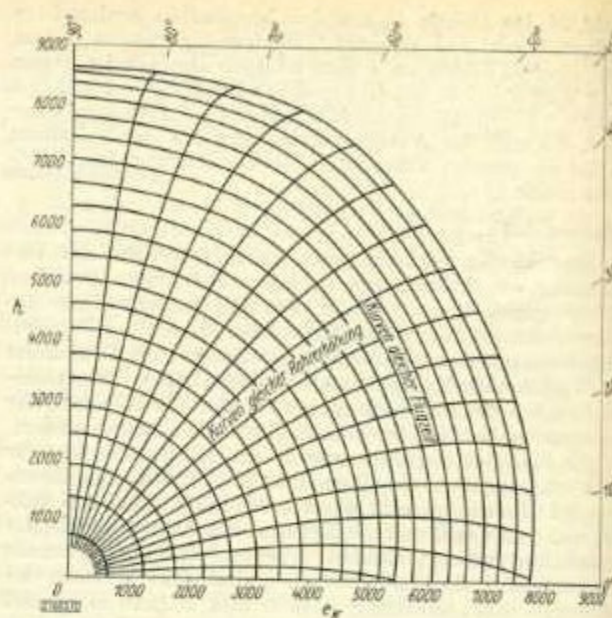


Abb. 12. Schußtafel.

Die Ordinate gibt die Zielhöhen h , die Abszisse die Kartenentfernungen e_K an. Für jeden durch Höhe, Entfernung oder Höhenwinkel bzw. durch zwei dieser Werte gegebenen Punkt läßt sich die zugehörige Rohrerhöhung des Geschützes und die Flugzeit des Geschosses entnehmen.

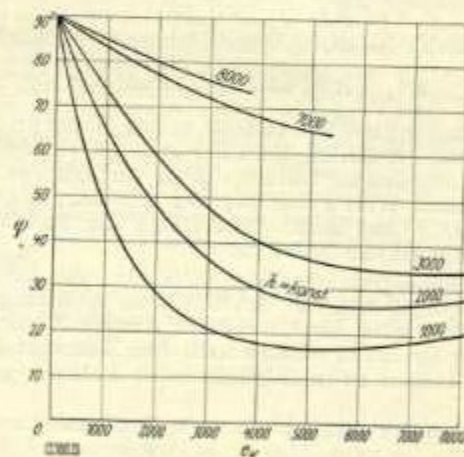
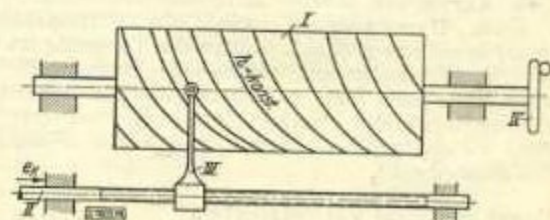
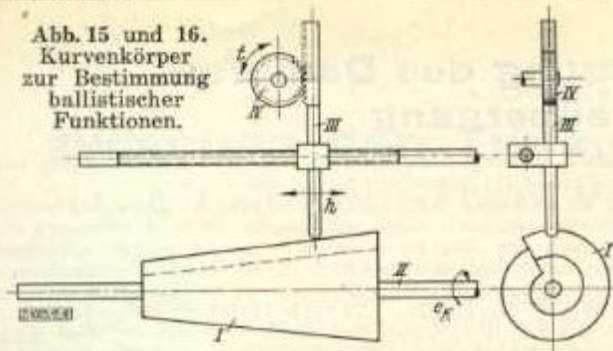
Abb. 13. Kurven gleicher Höhen in Abhängigkeit von der Kartenentfernung e_K und der Rohrerhöhung φ .

Abb. 14. Kurvenzylinder zum Bestimmen ballistischer Funktionen.

Die Trommel I trägt ein Kurvenblatt nach Abb. 13. Der Zeiger III wird zwangsläufig durch Welle II gemäß e_K verschoben. Wird durch Handrad IV die Trommel immer so gedreht, daß sich der Zeiger über der Kurve der bekannten Höhe bewegt, so ist der Drehwert gleich dem gesuchten Funktionswert.

Abb. 15 und 16.
Kurvenkörper
zur Bestimmung
ballistischer
Funktionen.



Der Kurvenkörper *I* enthält in Radialschnitten den Funktionswert für gleiche Höhen in Abhängigkeit von e_K , in Axialschnitten den Funktionswert für gleiche e_K -Werte in Abhängigkeit von der Höhe h . Der Kurvenkörper wird durch Welle *II* gemäß e_K gedreht, der Abnahmestift *III* gemäß der Höhe des Zieles h verschoben. Der an dieser Stelle als Halbmesser erscheinende Funktionswert geht auf Zahnrad *IV* zur Anzeige oder zur weiteren Verarbeitung in nachfolgende, hier nicht gezeichnete Getriebe.

fernung enthält. Die Abnahme des als Radiusvektor aufgetragenen Funktionswertes erfolgt durch einen als Hebel ausgebildeten oder mit Verzahnung versehenen Abnahmestift. Wird dann der Kurvenkörper gemäß dem Wert der Höhe h axial verschoben und gemäß dem Wert der Kartenentfernung e_K gegenüber dem Abnahmestift gedreht, so gibt letzterer den gesuchten Funktionswert selbsttätig an.

Durch Hintereinanderschaltung mehrerer Kurvenkörper können auch Gleichungen mit mehr als zwei unabhängig Veränderlichen selbsttätig gelöst werden.

Zusammenfassung

Die vorstehenden Ausführungen sollen einen Einblick in die bei der Konstruktion von Feuerleitgeräten an den Ingenieur herantretenden Aufgaben vermitteln. Die angeführten Beispiele sind einige wenige aus dem großen Gebiete derartiger Getriebe und beschränken sich in ihrer Art der Darstellung auf die grundsätzliche Form der mechanischen Lösung, ohne auf Einzelheiten der konstruktiven Ausführung weiter einzugehen. B 1003