

Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt  
für Land- und Forstwirtschaft  
Berlin-Dahlem

Heft 82

Dezember 1954



**Geometrische Figuren und ihre Anwendbarkeit  
auf Düsen-Flüssigkeitsstrahlen bei mehrdüsigem Pflanzen-  
schutzgeräten zwecks Wahl des richtigen Düsenabstandes  
zur Erzielung bestmöglicher Flüssigkeitsverteilung**

Von  
**Dr. Hans Koch**

**Berlin 1954**

*Herausgegeben  
von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft  
Berlin-Dahlem*

Im Buchhandel zu beziehen durch den Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg  
Auslieferung: Berlin SW 68, Lindenstraße 44-47 (Westberlin)



# Geometrische Figuren und ihre Anwendbarkeit auf Düsen-Flüssigkeitsstrahlen bei mehrdüsigem Pflanzenschutzgeräten zwecks Wahl des richtigen Düsenabstandes zur Erzielung bestmöglicher Flüssigkeitsverteilung

Von

Dr. Hans Koch

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Braunschweig,  
Institut für Geräteprüfung.

Das Institut für Geräteprüfung der Biologischen Bundesanstalt Braunschweig ist bemüht, sich für die Prüfung von Schädlingsbekämpfungsgeräten und -geräteteilen bei sich wiederholenden technischen Vorgängen Übersichtsunterlagen über die Abhängigkeitsverhältnisse der maßgebenden Größen in Gestalt von Tabellen oder von graphischen Darstellungen zu beschaffen oder zu erarbeiten. Mit einem derartigen Erkennen und Festlegen der Zusammenhänge läßt sich der Prüfungsgang erleichtern und vielfach abkürzen.

Eine Untersuchung der bestmöglich-gleichmäßigen Verteilung der Flüssigkeit bei sich überschneidenden Düsen-Flüssigkeitsstrahlen führte zu Diagrammen, mit deren Hilfe ein Anhaltswert für den erforderlichen gegenseitigen Abstand von Pralldüsen (Flachstrahlern) oder von Dralldüsen (Rundstrahlern) sehr schnell festgestellt werden kann. Hierzu ist lediglich die Kenntnis des Winkels notwendig, unter dem der Strahl die Düse beim Betriebsdruck verläßt. Die Strahlwinkel sind als Dreiecks- oder als Kegelwinkel oder als innere und äußere Winkel eines Hohlkegels bestimmbar. Es können aber auch die Funktionswerte der Düsenwinkel verwendet werden als Maße aus der Figur, die der betreffende Strahl auf der Spritzfläche abzeichnet. Ein zweckmäßiger Abstand der Düsen von der zu benetzenden Fläche muß zugrunde gelegt werden.

Die aufgestellten Kurven sind bei der Prüfung von Nutzen, um möglichst schnell die richtige Anordnung der Düsen bei Geräten zu erkennen, bei denen Serien von Einzeldüsen verwendet werden, also hauptsächlich bei Feld- oder Weinbauspritzgeräten oder bei mehrdüsigem Strahlrohren. Sie können aber auch schon bei der Planung der Anordnung der Geräteteile zu Rate gezogen werden. Daher soll über die im Institut für Geräteprüfung gefertigten Diagramme berichtet werden.

Als Vorstufe zu den Anwendungs-Untersuchungen wurden die theoretischen Überdeckungslinien von Dreiecks-, Vollkegel-, Hohlkegel-, Vollkegelstumpf-, Hohlkegelstumpf-, Kreis- und Kreisring-Kurven dargestellt. Ihre Berechnung und Aufzeichnung waren für die spätere Feststellung der Übereinstimmung mit den

beim praktischen Spritzen auftretenden Verteilungsbildern erforderlich. Mit der Möglichkeit einer Gleichsetzung von Flüssigkeits-Verteilungskurven in ihrer Form mit entsprechenden stereo- oder planimetrischen Figuren in bestimmten Grenzen konnte gerechnet werden. Wenn man sich mit Düsenstrahlen zu befassen hat, so ist die Kenntnis dieser theoretischen Kurven, auch wenn sie nicht in allen Fällen unmittelbar auf Strahlen anwendbar sind, durchaus zweckmäßig. Sie geben interessante Aufschlüsse.

Man geht von der Überlegung aus, daß beim Bewegen eines Düsenstrahles über eine Linie auf jeden Teilabschnitt dieser Linie — als Verteilungsbreite oder

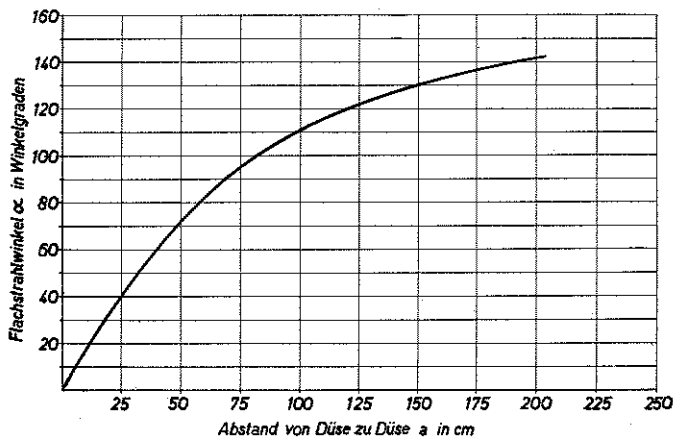


Abb. 1. Diagramm zur Bestimmung des Düsenabstandes aus dem Spritzwinkel bei Flachstrahldüsen (Abstand der Düse von der Spritzfläche gleich 70 cm).

als Querverteilung — die Menge an Flüssigkeit der diesem Teilabschnitt gleichbreiten senkrechten Scheibe oder des gleichbreiten senkrechten Streifens fällt, in die man sich den Strahl parallel zu seiner Bewegungsrichtung aufgeteilt denkt. Der Düsenstrahl wird dann durch eine ihm ähnliche geometrische Figur ersetzt. Diese Figur wird in möglichst viele Scheiben oder Streifen aufgeteilt, und die Volumina der Scheiben oder Streifen werden ausgerechnet und die Werte nebeneinander gestellt und zu einer Kurve miteinander verbunden. Bringt man zwei oder mehrere dieser Kurven durch gegenseitiges Verschieben so zur Überdeckung, daß ihre geometrische Addition von Höchstwert zu Höchstwert der Ursprungskurven möglichst eine horizontale Gerade ergibt, so hat man die bestmögliche Überdeckung. Der Abstand von Spitze zu Spitze der Ursprungsfiguren entspricht dann — sobald sich nachweisen läßt, daß die gewählte geometrische Figur dem untersuchten Düsenstrahl gleichgesetzt werden kann — dem erforderlichen Abstand der Düsen zur Erreichung der gleichmäßigsten Verteilung der Flüssigkeit bei sich überschneidenden Düsenstrahlen.

Die unkomplizierteste Form eines Düsenstrahles findet man beim flachen Strahl. Er entsteht bei Pralldüsen, bei denen die Prallebene durch eine der Seitenflächen eines Schlitzes gebildet wird. Der Flachstrahl möge einem Dreieck

entsprechen (eine leichte Krümmung, mit der die Projektion des Strahles in Streifenlinie vielfach auf der Auftreffebene erscheint, soll und kann diese Betrachtungen nicht stören). Offensichtlich wird beim Überschneiden von Dreiecken dann aus der Addition ihrer Streifensummenlinien (geneigte Geraden) eine Waagerechte, wenn in der Grundlinie der Anfangspunkt einer der Seitenlinien des einen Dreiecks in die Mittelsenkrechte des benachbarten Dreiecks fällt, also wenn  $a$  ( $a$  = Dreiecksspitzen- bzw. Mittelsenkrechtenabstand = Düsenabstand) gleich  $l/2$  ( $l$  = Länge der Grundlinie des Dreiecks = Strahllänge in der Auftreff-

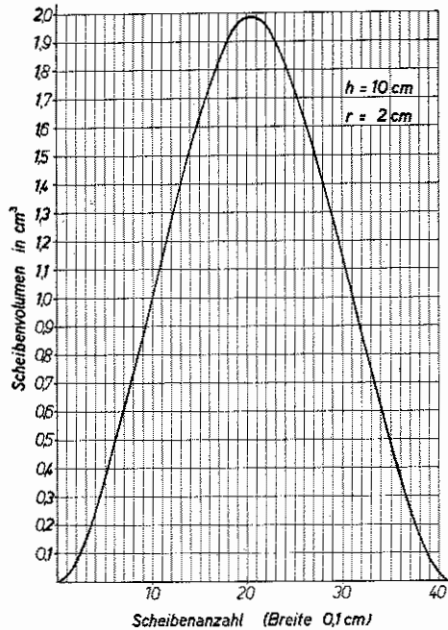


Abb. 2. Volumenlinie eines in Scheiben aufgeteilten Vollkegels.

ebene) wird. Da mit der Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Höhe  $h$  der Düsenaustrittsquerschnitte von der Benetzungsebene bei gleichem Strahlwinkel  $\alpha$  die Länge des Strahles  $l$  auf der Grundfläche größer bzw. kleiner wird, ist es nötig, einen zweckmäßigen Abstand  $h$ , bei dem das ideale Verteilungsbild erwünscht ist, festzulegen; es wird  $h$  gleich 70 cm vorgeschlagen.

Man kann nun in einfacher Weise bei dem Flachstrahl (Dreieck) unmittelbar (unter Zugrundelegung von  $h = 70$ ) oder als Vielfaches von  $h$  aus der Beziehung  $a = h(70) \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2}$  ein Diagramm aufstellen, aus dem man für jeden Strahlwinkel  $\alpha$  (Spitzenwinkel des Dreiecks) den erforderlichen Abstand  $a$  der Düsen voneinander für die günstigste Verteilung der Flüssigkeit entnehmen kann. Die Kurve bei  $h = 70 \text{ cm}$  ist in der Abb. 1 dargestellt.

Bei den Dralldüsenstrahlen ist es etwas schwieriger, sich über ihre Gestalt klar zu werden. Betrachte man sie zunächst einmal als Vollkegel. Damit ergibt sich nach der Methode der Aufteilung in Scheiben die Aufgabe, die Inhalte des in senkrechte Scheiben zerlegten Vollkegels zu berechnen und die einzelnen Volumina kurvenmäßig aufzuzeichnen.

Die Rauminhalte der Körper, die sich durch Zerlegen eines Vollkegels in senkrechte Schnitte ergeben, lassen sich durch ein Doppelintegral bestimmen. Nach Auflösung dieses Doppelintegrals kommt man auf folgende Formel für den Inhalt der einzelnen Kegelscheibe:

$$V = \frac{2h}{r} \cdot \left[ \frac{r}{3} (b \cdot \sqrt{r^2 - b^2} - a \sqrt{r^2 - a^2}) + \frac{r^3}{6} \left( \arcsin \frac{b}{r} - \arcsin \frac{a}{r} \right) - \left( \frac{b^3}{6} \cdot \ln \frac{\sqrt{r^2 - b^2} + r}{b} - \frac{a^3}{6} \ln \frac{\sqrt{r^2 - a^2} + r}{a} \right) \right] \quad (1)$$

$h$  ist die Kegelhöhe,  $r$  der Radius des Kegelgrundkreises,  $a$  und  $b$  grenzen jeweils die zu berechnende Scheibe ein, und zwar ist  $b$  der senkrechte Abstand vom Kegelmittelschnitt bis zur äußeren Scheibenfläche und  $a$  der Abstand vom Kegelmittelschnitt bis zur inneren Scheibenfläche.

Rechnet man sich nach dieser Formel die einzelnen Scheiben eines Vollkegels aus, trägt die Summen der Inhalte nebeneinander auf und verbindet sie miteinander, so erhält man eine Kurve nach A b b. 2 (hier ein Vollkegel aus  $h = 10$  cm,  $r = 2$  cm, in Scheiben von 0,1 cm Stärke zerlegt).

Aus der großen Zahl vorliegender Kegellinien, die nach der Formel (1) berechnet worden waren — siehe Tabelle I —, ergab sich, daß bei Einteilung in die gleiche Anzahl von Scheiben und bei gleicher Lage der Scheiben zum Mittelschnitt bei jedem Vollkegel das entsprechende Scheibenvolumen immer den gleichen Bruchteil vom gesamten Kegelinhalt beträgt. Als Beweisbeispiel sind aus der Tabelle I die in gleiche Scheibenzahl aufgeteilten Kegel ausgewählt worden und einmal die 44. Scheiben der Kegel mit  $r = 30$  und  $r = 10$  ( $h = 10$ ) und zum anderen die 33. Scheiben der Kegel mit  $r = 28,2$  und  $r = 9,4$  ( $h = 10$ ) herausgegriffen worden. Es wird das Verhältnis vom Vollvolumen zum Scheibenvolumen =  $4712,4000 : 170,1730 = 27,7$  und  $523,6104 : 18,9056 = 27,7$ . Ebenso ist  $4163,8766 : 131,2112 = 31,7$  und  $462,6530 : 14,5880 = 31,7$ . Nach dieser Erkenntnis ließ sich ein Diagramm aufstellen, aus dem man ohne die langwierige Rechnung unmittelbar — hauptsächlich für Überschlagsrechnungen — die Inhaltswerte von Kegelscheiben feststellen kann. In A b b. 3 ist das Verhältnis von Vollkegelvolumen zu Scheibenvolumen in Abhängigkeit von der Scheibenanzahl, in die der Kegel aufgeteilt wird, aufgetragen. Es ist allerdings nur die Darstellung für die ersten fünf Scheiben gebracht worden, beginnend mit der größten Scheibe unmittelbar neben dem Mittelschnitt.

Wenn man also beispielsweise einen halben Kegel in zwölf Teile geteilt hat, so geht man von der Zahl 12 auf der Abszisse aus und trifft auf der Kurve für die Scheibe I auf einen Punkt, dem auf der Ordinate die Zahl 12,7 entspricht. Man muß nun das Gesamtvolumen des Vollkegels, das nach der bekannten und einfachen Formel  $\frac{\pi \cdot r^2 \cdot h}{3}$  schnell ausgerechnet ist, durch 12,7 teilen und erhält so den Inhalt der größten Scheibe.

Werden nun zwei oder mehrere gleiche Kurvenfiguren nach A b b. 2 zum Überschneiden gebracht, so enthält man für jeden Vollkegel nach den Berechnungen und Feststellungen im Institut für Geräteprüfung die günstigste Überdeckung bei einem Abstand der Mittelsenkrechten (Düsenabstand) von  $a = r + 0,0565 r$  oder  $a = 1,0565 r$ .

Als Beispiel für die Bestimmung des günstigsten Mittenabstandes für die ideale geometrische Ausgleichsline bei zwei sich überdeckenden Vollkegellinien ist aus der Tabelle I der Kegel mit  $r = 10$  ( $h = 10$ ) gewählt worden. Wenn man die Scheibenwerte des ersten Kegels von 50 bis 1 und des zweiten Kegels von 1 bis 50 — entsprechend der Überdeckung des abfallenden Teiles der Vollkegellinie des ersten Kegels mit dem aufsteigenden Teil der Linie des zweiten Vollkegels — nebeneinander stellt und so gegeneinander verschiebt, bis beispielsweise  $a = r$  wird, so stehen sich in diesem Falle die Scheiben 50 + 1 usw. und in der Mitte 26 + 25 gegenüber. Bei der Addition dieser zugehörigen Werte bekommt man als Ausgleichsline eine stetig ansteigende Kurve mit ihrem Scheitelpunkt bei dem Scheibensummenwert  $26 + 25 = 10,9947 + 10,4666 =$

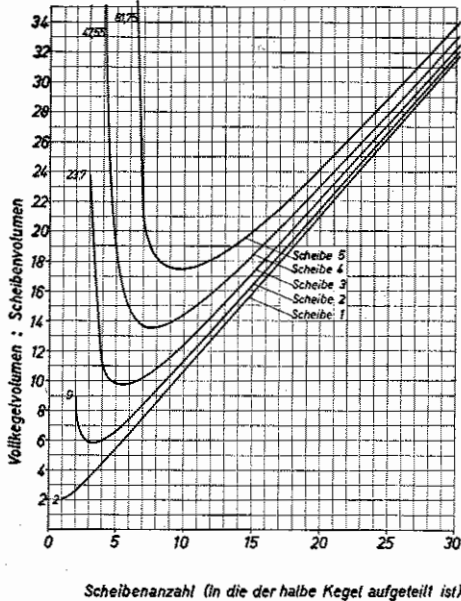


Abb. 3. Diagramme zur Bestimmung der Scheibenvolumina eines in Scheiben aufgeteilten Kegels.

21,4613 (siehe obere gestrichelte Linie in Abb. 4). Wenn man jetzt  $a$  um eine Scheibenbreite — also um 0,2 — vergrößert, so fällt bei der Addition der jetzt gegenüberstehenden Scheiben die Kurve vom Anfangswert der Scheibe 50 = 19,9854 aus zunächst ab und steigt dann wieder bis zum Höchstwert bei den Scheiben  $25 + 25 = 10,4666 + 10,4666 = 20,9332$  stetig an. Wenn man nun die Verschiebung der Kegelmitten — durch Vergrößerung des Abstandes  $a$  um weitere Scheibenbreiten — weiter fortsetzt, so sieht man, daß die Tendenz der Kurve, zuerst abzufallen und dann nach der Mitte zu wieder anzusteigen, zunächst bleibt. Wenn man jetzt durch stetes Gegeneinanderverschieben der Zahlenreihen den Abstand findet, bei dem der Anfangswert der Kurve von 19,9854 nach anfänglichem Absinken in der Mitte wieder genau erreicht wird, so hat man die bestmögliche Ausgleichsline. Der Wert liegt zwischen der Verschiebung der Mittelsenkrechten um  $r + 0,4$  und  $r + 0,6$ . Rechnerisch findet man den genaueren Wert durch die Überlegung, daß die Differenz der Scheibensummen in der Kurvenmitte  $25 + 24 = 10,4666 + 9,9443 = 20,4109$  bei gegenseitiger Versetzung um 0,4 und der Scheiben-

summen  $24 + 24 = 9,9443$  und  $9,9443 = 19,8886$  bei 0,6-Verschiebung gleich  $20,4109$   $\sim 19,8886 = 0,5223$  beträgt für diesen Verschiebungsabstand von 0,2, so daß man den Verschiebungswert der Differenz von  $20,4109$  (Wert für 0,4-Verschiebung) bis  $19,9854$  (Anfangswert der Kurve)  $= 0,4253$  durch den Ansatz  $0,5223 : 0,4253 = 0,2 : y$  finden kann.  $y = \frac{0,2 \cdot 0,4253}{0,5223} = 0,163$ . Die endgültige Mittenverschiebung ist jetzt  $x = 0,4 + y = 0,4 + 0,163 = 0,563$ . Der Wert  $x$  ist genauestens durch Verwendung von in 1 mm starke Scheiben aufgeteilte Kegel und durch Kurvenkorrektur für den Vollkegel mit  $r = 10$  zu  $0,565$  gefunden worden. Bei allen Berechnungsbeispielen ergaben sich die Mittenverschiebungswerte für den idealen Ausgleich stets so, daß der prozentuale Anteil von  $r$  an der Vergrößerung des Mittenabstandes über  $r$  hinaus immer 5,65 wurde. Für alle Vollkegel ist also  $a = r + 0,0565 r$ .

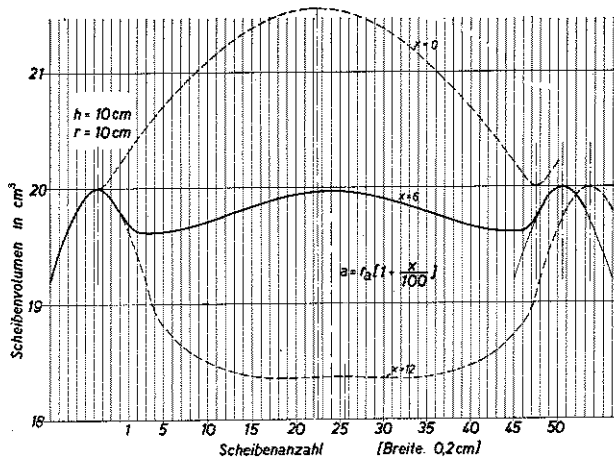


Abb. 4. Überschneidung und Summierung von Volumenlinien von Vollkegeln (in Scheiben aufgeteilt).

In Abb. 4 ist die Linie des gleichmäßigst-möglichen Ausgleichs mehrerer sich überschneidender Vollkegel-Inhaltlinien bei diesem idealen Abstand in der voll ausgezogenen Kurve zu sehen, ebenfalls in der oberen Kurve der Abb. 9. Eine gerade Linie ist nicht zu erreichen. Die Wellenlinie ist aber so schwach, daß das Abweichen von der Geraden, mit der die absolute Gleichmäßigkeit des Ausgleichs erzielt wäre, kaum ins Gewicht fällt.

Ein Abgehen im Abstand der Mittelsenkrechten von dem Wert  $1,0565 r$  bringt schon größere Berge und Täler in das Ausgleichsbild. Die obere gestrichelte Linie in Abb. 4 tritt bei kleinerem Abstand ein (hier  $a = r$ ), und die Kurvenspitze wird mit zunehmender Verkleinerung von  $a$  höher, die untere gestrichelte Linie ergibt sich bei einem größeren Abstand als  $1,0565 r$  (hier  $a = 1,12 r$ ) und das Kurvental wird mit zunehmender Vergrößerung von  $a$  tiefer.

Der Abstand der Mittelsenkrechten  $a$  muß also immer um ein geringes größer sein als der Radius  $r$  des Vollkegelgrundkreises ( $1,0565 r$ ). Dies gilt allgemein, wenn man die Figur des Vollkegels auf einen Düsenstrahl übertragen kann, für jeden Abstand  $h$  der Düsen von der Grundfläche (mit zunehmendem  $h$  steigt dabei  $r$  linear an).



Bringt man wieder  $a$  direkt zum Kegelwinkel in Beziehung und setzt man  $h = 70$  cm, so ist  $a = h(70) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot 1,0565 = 73,955 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ . Diese Gleichung läßt sich in einer der Kurve in Abb. 1 ähnlichen Darstellung in Diagrammform aufzeichnen.

Mit der Methode der Zerlegung in Scheiben kann man auch das Verteilungsbild eines Hohlkegels in einfacher Weise finden. Man zerlegt zwei Vollkegel von gleicher Höhe, aber mit verschiedenen Grundkreisradien, in gleichstarke Scheiben und berechnet ihre Inhalte nach Formel (1). Nach der Tabelle I ist eine große Zahl von Hohlkegelscheiben durch einfache Differenzbildung aus den entsprechenden Vollkegelwerten, aus denen der gewünschte Hohlkegel sich ergibt, darstellbar. Nach Abzug der Scheiben des Kegels mit dem kleineren Kegelwinkel

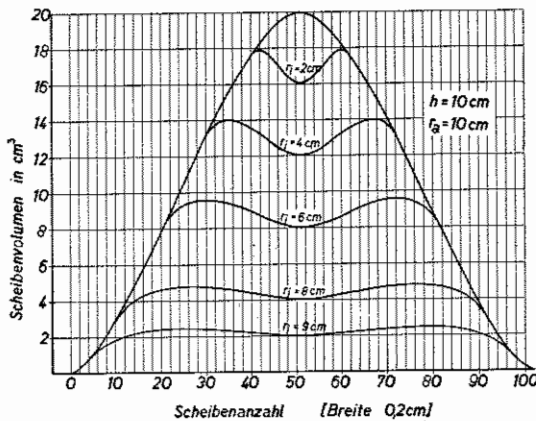


Abb. 5. Volumenlinien von in Scheiben aufgeteilten Hohlkegeln mit der Ursprungsvollkegellinie.

von den entsprechenden Scheiben des Kegels mit dem größeren Kegelwinkel ergeben die gefundenen Werte eines so erfaßten Hohlkegels Kurven nach Abb. 5 (hier Hohlkegel aus  $h = 10$  cm,  $r_a = 10$  cm und  $r_i = 2, 4, 6, 8$  und  $9$  cm, in Scheiben von  $0,2$  cm Dicke zerlegt).

Schwieriger schien es zu sein, bei der unendlichen Vielzahl der möglichen Kombinationen des äußeren und inneren Kegelwinkels — zur Feststellung des Abstandes der Mittelsenkrechten für die bestmögliche Überdeckung mehrerer Hohlkegel — ein Abhängigkeitsverhältnis zu finden, das — wie bisher — nur die beiden Größen  $a$  und  $\alpha$  (bzw. hier  $\alpha_a$  und  $\alpha_i$ ) enthielt. Auch hier gab es einen Weg. Es wurde festgestellt, daß mit einer einzigen und gleichen Verhältniszahl  $r_a : (r_a - r_i)$  (Radius des Außengrundkreises zu Grundflächen-Ringbreite des Hohlkegels) bereits eine unendlich große Schar von Hohlkegeln erfaßt ist und daß zu dieser Verhältniszahl nur ein Wert  $a$  gehört, der um einen bestimmaren Betrag größer ist als  $r_a$ .

Abb. 6 soll die Vielzahl der Hohlkegel mit gleichem Verhältnis  $r_a : (r_a - r_i)$  veranschaulichen. Von der unteren Geraden  $AB$  der Figur lassen sich von den vier Punkten  $A, B, C$  und  $D$  zu beliebig vielen Punkten der Mittelsenkrechten (hier  $E, F$  und  $G$ ) Linien ziehen, wodurch man Hohlkegel mit jeweils anderen Spitzenwinkeln und anderen Höhen, aber mit gleicher Grundfläche, erhält. Dabei bleibt die Verhältniszahl  $r_a : (r_a - r_i)$  gleich groß. Außerdem lassen sich bei jedem dieser Hohlkegel noch beliebig viele Parallelen zu ihren Grundflächen ziehen (hier  $a, b, c$  und  $d$ ), die wiederum neue Hohlkegel ergeben, diesmal mit gleichem Spitzenwinkel, aber mit verschiedenen Grundflächen und verschiedenen Höhen. Auch hier bleibt der Nennwert der Verhältniszahl erhalten.

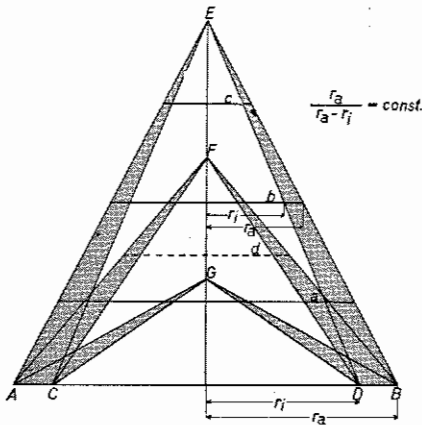


Abb. 6. Verschiedene Hohlkegel mit konstantem Verhältnis  $r_a : (r_a - r_i)$ .

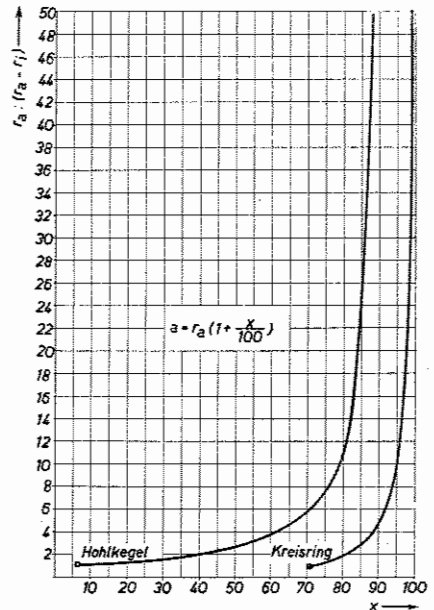


Abb. 7. Diagramme zur Bestimmung des richtigen Abstandes für die günstigste (gleichmäßigste) Überdeckung der Volumenlinien bzw. Flächenlinien von Hohlkegeln und von Kreisringen.

Damit war lediglich notwendig, von irgendeinem Vollkegel auszugehen und festzustellen, welche verschiedenen Werte mit immer größerer Aushöhlung dieses Vollkegels – bis zum Übrigbleiben des Kegelmantels – jeweils der Abstand  $a$  (günstigste Überdeckung) annahm mit dem sich in diesem Fall gleichermaßen ändernden Wert  $r_a : (r_a - r_i)$ .

Beim Vollkegel war  $a = r + 0,0565 r$ . Es wird dafür  $a = r_a \left( 1 + \frac{5,65}{100} \right)$  gesetzt und die Größe  $x$  genannt, die in dieser Gleichung sich mit dem Übergang des Vollkegels in Hohlkegel mit verschiedenen  $r_i$  (Radius des Innengrundkreises) verändert. So beginnt eine Kurve, in der man  $r_a : (r_a - r_i)$  in Abhängigkeit von  $x$  darstellt, mit dem Wert  $x = 5,65$  für  $r_a : (r_a - r_i) = 1$  ( $r_i = 0$  für den Vollkegel)

und endet bei einem Wert  $x = 100$  für  $r_a : (r_a - r_i) = \infty$  ( $r_i = r_a$ ). Die Zwischenwerte für  $x$  sind durch Aufstellen der Kurven der verschiedensten Hohlkegel und durch Feststellen des Abstandes der Mittelsenkrechten bei der günstigsten Überdeckung gleichartiger Hohlkegellinien in großer Zahl und genauestens bestimmt worden. Die Darstellung der Abhängigkeit der Zahl  $r_a : (r_a - r_i)$  von  $x$  wird in Abb. 7 in der linken Kurve gezeigt (zusammen mit der Kurve zur Bestimmung der günstigsten Überdeckung bei Kreisringflächen). Die Kurve ist nochmals in der Schlußabbildung 35 zu sehen. Ihre praktische Anwendungsmöglichkeit wird dort besprochen werden. Das Diagramm ist ebenfalls mit den Kegelwinkelwerten darstellbar. An Stelle von  $r_a : (r_a - r_i)$  wäre  $\operatorname{tg} \alpha_a/2 : (\operatorname{tg} \alpha_a/2 - \operatorname{tg} \alpha_i/2)$  aufzutragen mit den gleichen zugehörigen  $x$ -Werten. Der Abstand  $a$  ist dann  $h \cdot \operatorname{tg} \alpha_a/2 (1 + x/100)$ . Es kann dabei — falls zweckmäßig — wieder  $h = 70$  cm gesetzt werden. Man wird aber sehen, daß bei der Bestimmung der Kegelwinkel

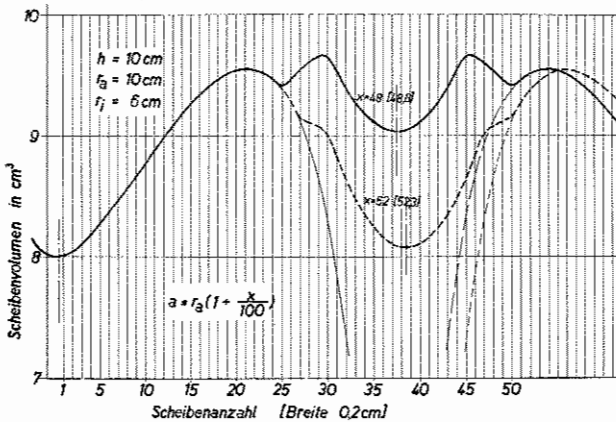


Abb. 8. Überschneidung und Summierung von Volumenlinien von Hohlkegeln (gleichmäßigst-mögliche Überdeckung).

in den meisten Fällen von den Grundkreisradien ausgegangen wird, so daß es besser ist und sein wird, direkt mit den  $r_a$ - und  $r_i$ -Werten zu arbeiten.

Die Überdeckungskurve, die sich nach der Feststellung und Anwendung des günstigsten Mittenabstandes bei Hohlkegeln ergibt, ist in Abb. 8 zu sehen. Die Einbuchtung in der Mitte der Kurven der Hohlkegel kann man durch entsprechendes Verschieben der benachbarten Hohlkegelkurven nicht ausgleichen. Bei einem solchen Versuch werden die Abweichungen im Maximum und Minimum der Kurven zunächst in jedem Falle größer. Man kann nur von einer der Spitzen einer Hohlkegelkurve bis zur angrenzenden Spitze des zweiten Hohlkegels eine Ausgleichslinie finden derart, daß sie mit ihrem Maximum nicht die Spitze der Hohlkegelkurve überschreitet und mit ihrem Minimum nicht unter dem tiefsten Punkt in der Mitte der Hohlkegelkurve liegt. Unter diesen Bedingungen ergeben sich zwei mögliche Grenzlinien der besten Überdeckung bei Hohlkegeln.

Abb. 8 zeigt die Grenzlinien in der voll ausgezogenen oberen Kurve und in der gestrichelten unteren Linie (die Linien liegen etwas höher als die Berge und das Tal

der Hohlkegelkurven, da aus Zeichnungsgründen nur ganze Scheibenwerte aufgetragen werden konnten, während die Berechnungswerte die genaue Unterteilung in Bruchteile von Millimetern ergeben; gezeichnet ist  $x = 48$  und  $52$  an Stelle von  $x = 48,8$  und  $52,3$ ). Es ist also ein gewisser Spielraum für die Bestimmung der Größe von  $a$  vorhanden. Im Darstellungsbeispiel der Abb. 8 liegt  $a$  — bei  $r_a = 100$  und  $x = 48,8$  bzw.  $52,3$  — zwischen den Werten  $148,8$  und  $152,3$ , so daß man — auch bei jedem anderen Berechnungsbeispiel — stets eine gerade, brauchbare Zahl für  $a$  (hier  $150$ ) auswählen kann.

Die Berechnung von  $x$  nach dem Beispiel der Abb. 8 sei im folgenden gezeigt: In Klammern sind gleichzeitig die Zahlenwerte eines weiteren Berechnungsbeispiels aufgeführt. Es wurde die Zahlenreihe des Hohlkegels genommen, die sich aus den Werten der Vollkegel mit  $h = 10$  sowie  $r = 10$  (4) und  $r = 6$  (2) nach Tabelle I bilden läßt. Bei der 30. (13.) Scheibe ist der Höchstwert der Hohlkegelkurve  $13,0623 - 3,5530 = 9,5093$  ( $5,5729 - 0,8584 = 4,7145$ ) erreicht. Bei dem Ausgleich des abfallenden Astes der Hohlkegelkurve und des aufsteigenden Astes der benachbarten gleichen Kurve darf dieser Höchstwert nicht überschritten und außerdem der Tiefstwert der Ausbuchtung der Hohlkegelkurve von  $19,9854 - 11,9780 = 8,0074$  ( $7,9704 - 3,9492 = 4,0212$ ) — Scheibe 50 (20) des Hohlkegels — nicht unterschritten werden. Die Zahlenreihen von 50 bis 1 (20 bis 1) und von 1 bis 50 (1 bis 20) werden nun so gegeneinander verschoben und jeweils die gegenüberstehenden Zahlen addiert, bis diese Bedingungen erfüllt sind. Bei einer Verschiebung um 4,8 (1,6) — um 24 (8) Scheiben — liegt ein Höchstwert bei  $9,6611$  ( $4,7803$ ) — Scheiben  $22 + 5$  ( $11 + 2$ ) —, bei einer Versetzung um 5,0 (1,8) wird der geforderte Wert von  $9,5093$  ( $4,7145$ ) nicht mehr überschritten, sondern unterschritten. Der gesuchte Wert liegt also zwischen einer Verschiebung um 4,8 bis 5,0 (1,6 bis 1,8). Wenn man nun die Differenz vom vorhandenen Höchstwert zum verlangten Wert, also hier von  $9,6611 - 9,5093 = 0,1518$  ( $4,7803 - 4,7145 = 0,0668$ ) als Ordinate und eine zweite Ordinate vom benachbarten Höchstwert im Abstand auf der Abszisse von 0,2 aufträgt, so schneidet die Verbindungslinie der Ordinatenpunkte — die man ohne einen ins Gewicht fallenden Fehler in diesem kurzen Bereich als Gerade annehmen kann — auf der Abszisse den Wert ab, der über 4,8 (1,6) hinaus gesucht wird. Die Ordinate ist dann Null, d. h. der Wert  $9,5093$  ( $4,7145$ ) ist gerade wieder erreicht. Rechnerisch findet man dieses Stück  $y$  durch die Beziehung  $0,1518$  ( $0,0668$ ) :  $y = 0,5116$  ( $0,3754$ ) :  $(0,2 + y)$  oder  $y = 0,03036$  ( $0,01336$ ) :  $0,3598$  ( $0,3086$ ) =  $0,0844$  ( $0,0433$ ), nachdem man vorher festgestellt hat, daß bei 4,6- (1,4-) Verschiebung der Kurvenhöchstwert bei  $10,0209$  ( $5,0899$ ) — Scheiben  $21 + 7$  ( $11 + 3$ ) — liegt, so daß man als Differenz zum verlangten Sollwert  $10,0209 - 9,5093 = 0,5116$  ( $5,0899 - 4,7145 = 0,3754$ ) erhielt. Der obere Verschiebungswert  $x$  ist jetzt gleich  $4,8$  (1,6) +  $y = 4,8$  (1,6) +  $0,0844$  ( $0,0433$ ) =  $4,8844$  ( $1,6433$ ).  $4,8844$  ( $1,6433$ ) sind  $48,8$  ‰ ( $41,1$  ‰) des äußeren Grundkreisradius des Hohlkegels.

Für die Ermittlung des unteren Grenzwertes von  $x$ , also für das Auffinden der Ausgleichskurve, bei der der Wert  $8,0024$  ( $4,0212$ ) nicht unterschritten werden darf, findet man, daß beim Gegeneinanderverschieben der Scheibenzahlenreihen des Hohlkegels mit  $h = 10$  und  $r_a = 10$  (4) und  $r_i = 6$  (2) der Wert zwischen der Verschiebung um 5,2 (1,6) und um 5,4 (1,8) liegen muß, also zwischen den Summenwerten in der Kurvenmitte — der Tiefstwert liegt in der Mitte der Ausgleichskurve —  $(13 + 12) = 3,7866 + 4,2938 = 8,0804$  [ $(7 + 6) = 2,4559 + 1,9606 = 4,4165$ ] und  $(12 + 12) = 3,7866 + 3,7866 = 7,5732$  [ $(6 + 6) = 1,9606 + 1,9606 = 3,9212$ ]. Die Differenz dieser beiden Werte  $8,0804 - 7,5732 = 0,5072$  ( $4,4165 - 3,9212 = 0,4953$ ) tritt auf bei 0,2-Verschiebung; die erforderliche Differenz von  $8,0804 - 8,0074 = 0,0730$  ( $4,4165 - 4,0212 = 0,3953$ ) bei  $y$ -Verschiebung. Also ist  $0,5072$  ( $0,4953$ ) :  $0,2 = 0,0730$  ( $0,3953$ ) :  $y$  und  $y = 0,0146$  :  $0,5072 = 0,029$  ( $0,07906$  :  $0,4953 = 0,16$ ). Der untere Verschiebungswert  $x$  ist jetzt gleich  $5,2$  (1,6) +  $y = 5,2$  (1,6) +  $0,029$  (0,16) =  $5,229$  (1,76).  $5,229$  (1,76) sind  $52,3$  ‰ ( $44,0$  ‰) des äußeren Grundkreishalbmessers des Hohlkegels.

Damit hat man die Grenzwerte von  $x$  mit 48,8 bis 52,3 (41,1 bis 44,0) für  $r_a : (r_a - r_i) = 10 : (10 - 6) = 2,5$  [ $= 4 : (4 - 2) = 2$ ] gefunden (siehe Abb. 35). Eine für die Darstellung des Diagramms nach Abb. 35 aus  $r_a : (r_a - r_i)$  und  $x$  ausreichende Anzahl von  $x$ -Werten ist auf die gleiche Weise aus den verschiedensten Hohlkegeln bestimmt worden. Man findet bei der Darstellung weiterer derartiger Werte auch bestätigt, daß für dieselbe Zahl  $r_a : (r_a - r_i)$  sich stets die gleichen Grenzwerte für  $x$  ergeben.

Damit ist die Doppellinie der Kurve in Abb. 35 erklärt. Die Kurve ist für den praktischen Gebrauch dargestellt zur Bestimmung des günstigsten Düsenabstandes bei in Hohlkegelform spritzenden oder sprühenden Düsen und umschließt diese Grenzwerte von  $x$ .

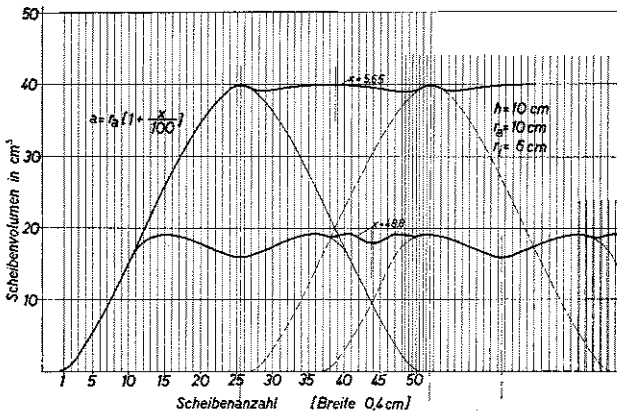


Abb. 9. Gleichmäßigst-mögliche Überdeckung von Vollkegel- und Hohlkegel-Volumenlinien im Vergleich zueinander.

In Abb. 9 wird nochmals eine der Linien der bestmöglichen Überdeckung von Hohlkegeln (untere Kurve) im Vergleich zu der günstigsten Ausgleichslinie bei Vollkegelüberschneidung (obere Kurve) gezeigt. Die Berge und Täler sind bei der Hohlkegelkurve zahlreicher und etwas höher bzw. tiefer. Die Abweichungen von der horizontalen Geraden würden aber — bei einer Flüssigkeitsverteilung in Hohlkegellinie — beim praktischen Spritzen noch nicht zu Streifenbildungen führen. Es ist aber immer wünschenswert, den idealen gegenseitigen Düsenabstand anzustreben, da schon kleine Verschiebungen von diesem Abstand ins Gewicht fallende Unterschiede in den Maxima und Minima der Verteilung hervorrufen können.

Man sieht nach Abb. 5, daß die Linien der Hohlkegel um so flacher werden, je größer  $r_i$  bei konstantem  $r_a$  wird, also je größer der Grad der Aushöhlung eines Vollkegels ist. Man darf sich aber nicht durch den kleineren Unterschied zwischen Berg und Tal bei der Kurve mit einem sehr großen Verhältnis  $r_a : (r_a - r_i)$  zu dem Trugschluß verleiten lassen, daß dünne Hohlkegelstrahlen eine gleichmäßigere Überdeckung ermöglichen als dicke, da prozentual zu den jeweils gesamtangebrachten Flüssigkeitsmengen die Differenzgrößen zwischen den Höchst- und Tiefstwerten der Verteilung sich kaum

ändern. Beim Vergleich von Hohlkegel- mit Kreisringkurven (Seite 21) wird noch eingehender auf diese Verhältnisse hingewiesen.

Beim praktischen Spritzen oder Sprühen reicht die Spritzzeit nicht aus, um die durch den Strahl gebildete Figur voll auf den Boden abzusetzen. Der Düsenstrahl trifft nur sehr kurzzeitig auf die zu benetzende Fläche auf. Es wäre also möglich, daß die sehr kleine Flüssigkeitsmenge sich in einer Form aufsetzt, die einem Vollkegelstumpf, einem Hohlkegelstumpf oder dem Inhalt eines Vollzylinders oder eines Hohlzylinders von einer bestimmten Höhe entspricht. Diese Überlegung führte dazu, auch das Verhalten dieser Körper bei Überschneidungen zu einem Teil mit in die Untersuchungen einzubeziehen. Praktische Bedeutung hatten die Ergebnisse nach den späteren Feststellungen nur insoweit, als damit nachgewiesen werden konnte, daß das Spritzbild nicht aus diesen Formen entsteht.

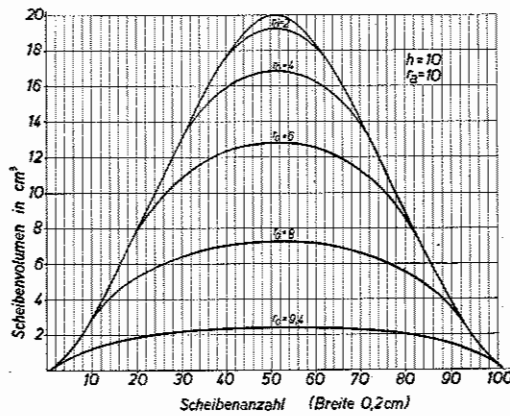


Abb. 10. Volumenlinien von in Scheiben aufgeteilten Vollkegelstümpfen mit der Ursprungs-Vollkegellinie.

Schneidet man von einem Vollkegel — von der Spitze ausgehend — immer weitere Stücke — auch wiederum Vollkegel, so daß man bei der Anwendung der Scheibenmethode bei Kegelstümpfen mit der Berechnungsformel (1) arbeiten kann — parallel zu seiner Grundfläche ab, so ergeben die jeweils verbleibenden Vollkegelstümpfe Volumenlinien nach Abb. 10.

Der Abstand der Mittelsenkrechten für die beste Überdeckung von Kegelstümpfen sei wie bei den Voll- und Hohlkegeln wieder  $a = r_a (1 + x/100)$ . Die veränderliche Zahl  $x/100$  zeigt an, um welchen Bruchteil des Wertes des Grundkreisradius  $r_a$  der Abstand  $a$  bei den verschiedenen Kegelstümpfen größer wird als  $r_a$ . Die Volumenlinien in Abb. 10 lassen erkennen, daß mit abnehmender Höhe des Kegelstumpfes sich  $x$  von dem Wert 5,65 für den Vollkegel dem Wert 100 nähern wird (bei  $h = 0$  wären  $x = 100$  und  $a = 2r_a$ ). Trägt man  $x$  in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Vollkegelhöhe zur Kegelstumpfhöhe  $h : (h - h_0)$  auf (oder dafür auch  $r_a : (r_a - r_0)$ ;  $r_0 =$  Radius der obren Begrenzung-

Kreisfläche der Kegelstümpfe), so erhält man eine Linie, die den Kurven in Abb. 7 im Verlauf — nicht in den Zahlenwerten — ähnlich ist. Man kann dann für jede Kegelstumpfform die Zahl  $x$  unmittelbar aus dem Diagramm entnehmen und damit den Abstand  $a$  für die günstigste Überschneidung sofort bestimmen.

Die Kurve ist zur Vervollständigung der Untersuchungsergebnisse in Abb. 11 dargestellt. Die Berechnung der einzelnen  $x$ -Werte erfolgte ähnlich wie bei dem Hohlkegelstumpfdiagramm. Als Beispiel sei der Vollkegelstumpf genommen, dessen Scheibenwerte sich nach Tabelle I aus den Vollkegeln mit  $h = 10$  und  $r = 10$  sowie  $h = 6$  und  $r = 6$  bilden lassen. Die hierzu nötige Umwertung der Zahlen des Vollkegels aus  $h = 10$  und  $r = 6$  in die Werte mit  $h = 6$  und  $r = 6$  ist einfach durch Division der  $h_{10}$ -Zahlen durch 10 und Multiplikation mit 6 zu bewerkstelligen. Man erhält schließlich den Vollkegelstumpf mit  $h = 4$  und  $r_a = 10$  und  $r_o = 6$ . Der Höchstwert der Kegelstumpfkurve (Scheibe 50)

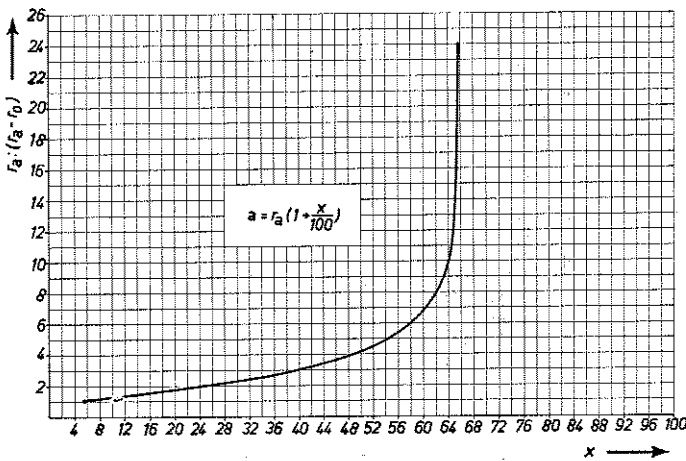


Abb. 11. Diagramm zur Bestimmung des richtigen Abstandes von Vollkegelstümpfen für die günstigste (gleichmäßigste) Überdeckung ihrer Volumenlinien.

ist  $19,9854$  (Scheibe 50 des Vollkegels mit  $h = 10$  und  $r = 10$ ) —  $11,978 \cdot 6/10$  (aus Scheibe 30 des Vollkegels mit  $h = 10$  und  $r = 6$ ) =  $12,7986$ . Dieser Wert muß in der Mitte der idealen zunächst abfallenden und dann wieder ansteigenden Ausgleichskurve gerade wieder erreicht werden. Beim Gegeneinanderversetzen der Scheiben des Kegelstumpfes von 50 bis 1 und von 1 bis 50 erhält man beim Gegenüberstehen der Scheiben  $(18 + 17) = 6,7883 + 6,2569 = 13,0452$  eine höherliegende Zahl und beim Gegenüberstehen der Scheiben  $(17 + 17) = 6,2569 + 6,2569 = 12,5138$  eine tieferliegende Zahl als den verlangten Wert  $12,7986$ . Die Verschiebung des aufsteigenden Astes der Kegelstumpflinie aus der Mitte der benachbarten Kegelstumpflinie beträgt hierbei  $3,2$  und  $3,4$ , und der gesuchte Verschiebungswert  $x$  liegt zwischen diesen beiden Zahlen. Das Stück  $y$ , um das man  $3,2$  vergrößern muß, um  $x$  zu erhalten, findet man durch die Beziehung  $(13,0452 - 12,5138) : 0,2 = (13,0452 - 12,7986) : y$ ;  $y = 0,04932 : 0,5314 = 0,093$ .  $x$  ist jetzt gleich  $3,2 + y = 3,2 + 0,093 = 3,293$ .  $3,293$  sind  $32,9\%$  des Grundkreisradius des Kegelstumpfes. Der  $x$ -Wert ist also  $32,9$  für die Zahl  $r_a : (r_a - r_i) = 10 : (10 - 6) = 2,5$  (siehe Abb. 11).

Welche Möglichkeiten sich für eine günstige geometrische Addition der Inhaltslinien von Hohlkegelstümpfen ergeben, zeigt die Abb. 12. Bei der Aufstellung der Linien wurde ein Hohlkegel ( $h = 10$ ,  $r_a = 10$  und  $r_i = 6$ ) zu verschiedenen Hohlkegelstümpfen verkürzt ( $h_s =$  Höhe des Hohlkegelstumpfes = 8, 6, 4, 2).

Es wurde gefunden, daß hier bei einer gleich großen Verhältniszahl  $r_a^2 : (r_a - r_i) \cdot (r_a - r_0)$  die unendlich große, ähnliche Schar von Hohlkegelstümpfen erfaßt wird, die wiederum durch den gleichen Wert von  $x$  gekennzeichnet ist (mit einem bestimmten Spielraum, ähnlich den Verhältnissen entsprechend Abb. 8 bzw. Abb. 35). Der Wert  $x$  läßt sich also wieder in Abhängigkeit von den verschiedenen Verhältniszahlen kurvenmäßig auftragen. Nach der Feststellung von  $x$  aus dem Diagramm für einen bestimmten Hohlkegelstumpf ist der günstigste Abstand der Mittellinien mehrerer dieser Stümpfe für die beste Überdeckung

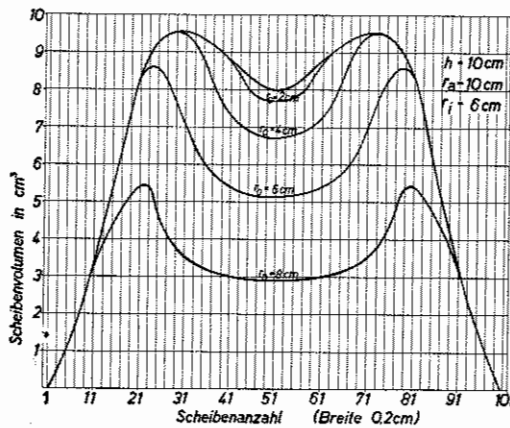


Abb. 12. Volumenlinien von in Scheiben aufgeteilten Hohlkegelstümpfen mit der Ursprungs-Hohlkegellinie.

ihrer Volumenlinien wieder  $a = r_a (1 + x/100)$ . Die Richtigkeit dieser Abhängigkeitsverhältnisse ist an einer genügenden Zahl von Berechnungsbeispielen nachgewiesen worden. Wegen der umfangreichen Berechnungsarbeit ist davon abgesehen worden, die Kurve in allen ihren Punkten genauestens zu bestimmen. Sie dürfte aber einen Verlauf entsprechend der Abb. 13 haben. Der Spielraum für  $x$  ist breiter geworden als bei der Hohlkegelkurve. Für die Untersuchungen waren nur die Hohlkegelstümpfe nötig, die für die späteren Vergleichsbilder mit den praktischen Spritz- oder Sprühformen gebraucht wurden.

Zur Nachprüfung des Verhaltens von Zylindern und Hohlzylindern beim Zerlegen in Scheiben und beim Übereinanderstellen und Addieren der Scheibenhöhe zu Summenwerten, die möglichst gleich groß wurden, genügte die Untersuchung von in Streifen geteilten Kreis- bzw. Kreisringflächen. Irgendeine Höhe vergrößert nur jeden Flächenwert um ein stets gleichbleibendes Vielfaches, ohne daß sich damit die Charakteristik der Summenlinien vom Kreis gegenüber dem Zylinder oder vom Kreisring gegenüber dem Hohlzylinder verändert.



Nach Bildung und Auflösung des Integrals aus den Summen der Kreisstreifen unter Zugrundelegung der Kreisgleichung findet man für Kreisstreifen — siehe Tabelle II — die Berechnungsformel:

$$F = b \cdot \sqrt{r^2 - b^2} - a \cdot \sqrt{r^2 - a^2} + r^2 \left( \arcsin \frac{b}{r} - \arcsin \frac{a}{r} \right). \quad (2)$$

$r$  ist der Radius des Kreises,  $a$  und  $b$  sind die Abstände von den Begrenzungsstrecken des zu berechnenden Streifens jeweils von der Kreismittellinie aus;  $b$  ist die Entfernung von der Mittellinie bis zur äußeren Streifenlinie, und  $a$  ist der senkrechte Abstand bis zur inneren Begrenzungslinie.

Werden zwei oder mehrere Summenlinien von Kreisstreifenflächen zum Überschneiden gebracht, so erhält man — nach einer großen Zahl von Kontrollrechnungen — für jeden Kreis die bestmögliche Überdeckung bei einem Abstand der Mittellinien von  $a = r + 0,73 r$  oder  $1,73 r$  ( $x = 73$ ).

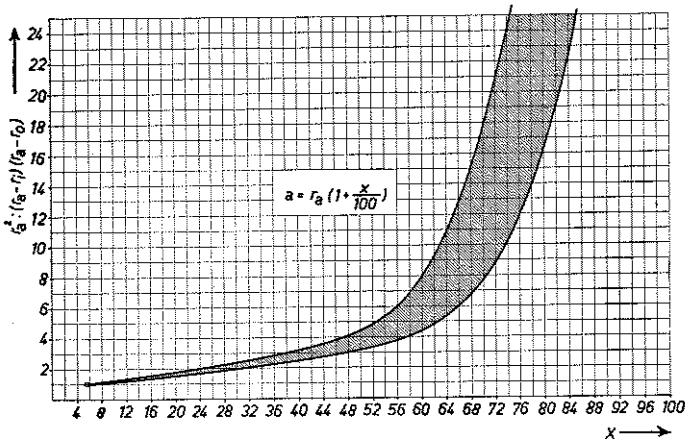


Abb. 13. Diagramm zur Bestimmung des richtigen Abstandes von Hohlkegelstümpfen für die günstigste (gleichmäßigste) Überdeckung ihrer Volumenlinien.

Als Beispiel für die Bestimmung des günstigsten Mittenabstandes für die ideale geometrische Ausgleichslinie bei zwei sich überdeckenden Kreislinien ist aus der Tabelle II der Kreis mit  $r = 10$  (6) ausgewählt worden. Der abfallende Teil der Kreislinie — Streifen 50 bis 1 (30 bis 1) — und der aufsteigende Teil des benachbarten Kreises — Streifen 1 bis 50 (1 bis 30) — müssen so ausgeglichen werden, daß bei zunächst abfallender und dann in der Mitte wieder ansteigender Kurve der Höchstwert der Kreiskurve von 3,9996 (2,3996) — Scheibe 50 (30) — nicht überschritten und nicht unterschritten, sondern gerade wieder erreicht wird. Man findet beim Gegeneinanderverschieben der Streifenwerte beim Gegenüberstehen der Streifen  $14 + 1$  ( $9 + 1$ ) — also bei einer Verschiebung um 36 Scheiben = 7,2 (21 Scheiben = 4,2) — in der Mitte der Kurve die Summe  $(8 + 7) = 2,1054 + 1,9723 = 4,0777$  [ $(5 + 5) = 1,2617 + 1,2617 = 2,5234$ ]. Bei 7,4-Verschiebung (4,4-Verschiebung) ergibt sich  $(7 + 7) = 1,9723 + 1,9723 = 3,9446$  [ $(5 + 4) = 1,2617 + 1,1273 = 2,3890$ ]. Der Wert für die bestmögliche Ausgleichslinie liegt also zwischen der Verschiebung der Mittelsenkrechten um  $r + 7,2$  ( $r + 4,2$ )

und  $r + 7,4$  ( $r + 4,4$ ). Rechnerisch findet man den genauen Wert durch den Ansatz  $(4,0777 - 3,9446) : 0,2 = (4,0777 - 3,9996) : y$  [ $(2,5234 - 2,3890) : 0,2 = (2,5234 - 2,3996) : y$ ].  $y = 0,01562$  ( $0,02476$ ) :  $0,1331$  ( $0,1344$ ) =  $0,117$  ( $0,184$ ). Der Verschiebungswert  $x$  ist jetzt gleich  $7,2$  ( $4,2$ ) +  $y = 7,2$  ( $4,2$ ) +  $0,117$  ( $0,184$ ) =  $7,317$  ( $4,384$ ).  $7,317$  ( $4,384$ ) sind  $73\%$  des Kreishalbmessers von  $10$  ( $6$ ).

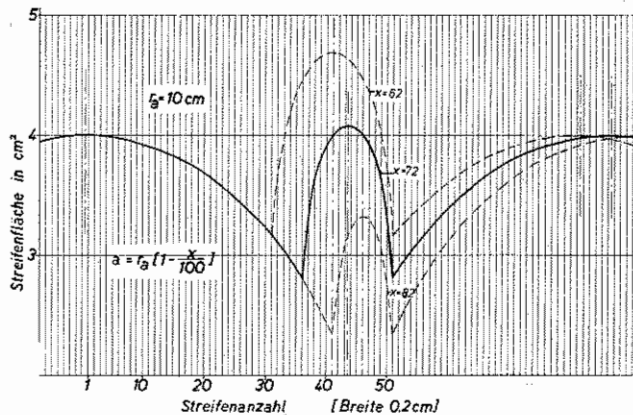


Abb. 14. Überschneidung und Summierung von Flächeninhalts-Linien von Kreisen (in Streifen aufgeteilt).

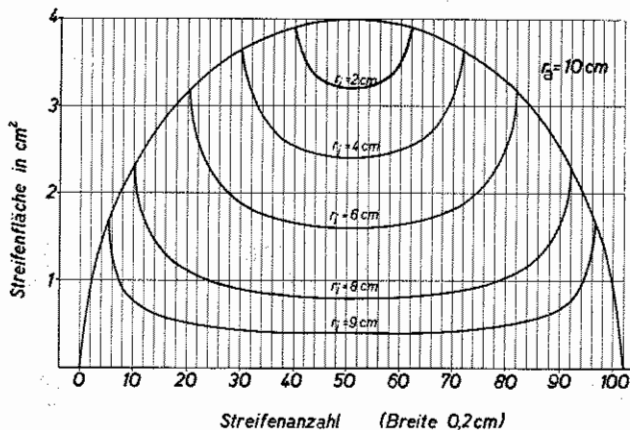


Abb. 15. Flächeninhalts-Linien von in Streifen aufgeteilten Kreisringen mit der Ursprungs-Kreislinie.

Der zweite Rechnungswert in der Klammer und jede weitere Bestimmung zeigen, daß der bestmögliche Ausgleich bei Kreislinien für alle Kreise stets bei dem gleichen Mittellinienabstand von  $a = r + 0,73 r$  liegt.

Die Linie dieses günstigsten Ausgleichs ist in Abb. 14 in der voll ausgezogenen Kurve zu sehen ( $x = 72$  aus Zeichnungsgründen). Auch die obere Kurve der Abb. 17 zeigt sie nochmals. Die gestrichelten Linien lassen den ungünstigeren

Verlauf erkennen, sobald der Mittenabstand kleiner oder größer wird. Bei der oberen gestrichelten Linie in Abb. 14 ist  $a = 1,62 r$ , bei der unteren  $a = 1,82 r$ :

Bei Kreisringen — Kreisringkurven siehe Abb. 15 — läßt sich ähnlich wie bei Hohlkegeln eine Kurve  $r_a : (r_a - r_i)$  in Abhängigkeit von  $x$  berechnen, woraus der Mittenabstand jedes nur möglichen Kreisringpaares (oder einer Kombination mehrerer gleicher Kreisringe) für die günstigste Überschneidung einfach mit dem Wert  $x$  wieder aus der Beziehung  $a = r_a (1 + x/100)$  feststellbar ist. Die Bestimmungslinie für  $x$  ist in der rechten Kurve der Abb. 7 zu sehen. Die Kurve beginnt mit dem Wert  $x = 73$  für  $r_a : (r_a - r_i) = 1$  ( $r_i = 0$  für die Vollkreisfläche) und endet bei einem Wert  $x = 100$  für  $r_a : (r_a - r_i) = \infty$  ( $r_i = r_a$ ).

Die günstigste Überdeckungslinie für Kreisringe zeigen die Abb. 16 und Abb. 17 (in der unteren Kurve). Man sieht aus Abb. 16, daß es auch für Kreisringe zwei Grenzwerte für  $x$  bzw. für  $a$  gibt.

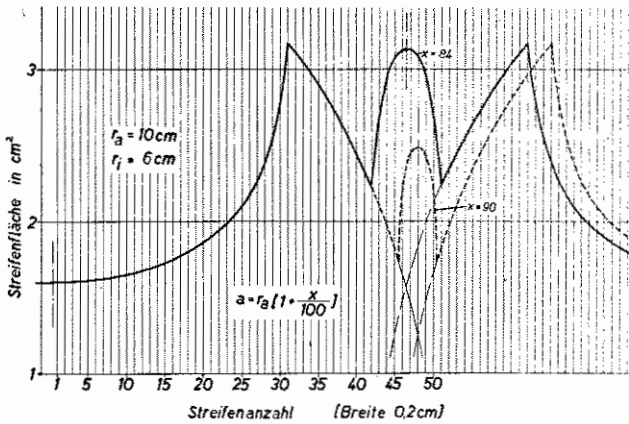


Abb. 16. Überschneidung und Summierung von Flächeninhalts-Linien von Kreisringen (gleichmäßigst-mögliche Überdeckung).

In dem dargestellten Beispiel eines Kreisringes mit einem Außendurchmesser von 20 und einem Innendurchmesser von 12 liegt der Mittenabstand für die zweckmäßigste Überdeckung zwischen 18,35 und 19,26.

Der Berechnungsgang ist folgender: Der Höchstwert der Kreisringstreifen liegt bei dem Kreisring mit  $r_a = 10$  und  $r_i = 6$  bei Streifen 20 = 3,1712. Beim Ausgleich muß dieser Wert in der Mitte der Linie gerade wieder erreicht werden. Beim Gegenüberstehen der Streifen 9 + 1, also bei einer Verschiebung der zweiten Zahlenreihe um 8,2 (41 Scheiben), erhält man in der Ausgleichskurvenmitte den Wert  $(5 + 5) = 1,6585 + 1,6585 = 3,3170$  und bei 8,4-Verschiebung den Wert  $(5 + 4) = 1,6585 + 1,4683 = 3,1268$ , zwischen denen die gesuchte Zahl 3,1712 liegt. Die Strecke  $y$ , um die man 8,2 vergrößern muß, um den genauen Verschiebungswert  $x$  zu erhalten, findet man durch den Ansatz:  $(3,3170 - 3,1268) : 0,2 = (3,3170 - 3,1712) : y$ ;  $y = 0,02916 : 0,1902 = 0,153$ .  $x = 8,2 + y = 8,2 + 0,153 = 8,353$ . 8,353 sind 83,5% des äußeren Ringradius. Der erste Grenzwert für den Mittenabstand von Ring zu Ring für die beste Überdeckung ist demnach  $a = r + 0,835 r = 10 + 8,35 = 18,35$ .

Der tiefste Wert der Ausgleichskurve, der dem Kleinstwert in der Mitte der Kreisringkurve (Scheibe 50) = 1,6000 (3,9996 - 2,3996) entsprechen muß, liegt außerhalb der Mitte, so daß man den Ansatz für die Bestimmung von  $y$  ähnlich wählen muß wie bei der oberen Ausgleichslinie für Hohlkegel. Man findet bei 9,2-Verschiebung den Ausgleichskurventiefstwert zu 1,6585 und bei 9,4-Verschiebung zu 1,4683. Es verhält sich nun  $(1,6585 - 1,6000) : y = (1,6000 - 1,4683) : (0,2 - y)$ ;  $y = 0,01170 : 0,1902 = 0,0615$ . Dann ist  $x = 9,2 + y = 9,2 + 0,0615 = 9,2615$ . 9,2615 sind 92,6 % des äußeren Kreisringradius. Der zweite Grenzwert für den Mittenabstand ist  $a = r + 0,926 r = 10 + 9,26 = 19,26$ .

Ein Vergleich der analogen Überschneidungskurven von Kegeln und von Kreisen, also eine Betrachtung der Abb. 4, 8 und 9 für Kegel und der Abb. 14, 16 und 17 für Kreise, lehrt, daß Kreis- und Kreisringlinien sowohl in der Kurvengestalt als auch in der Differenz der Maxima und Minima wesentlich

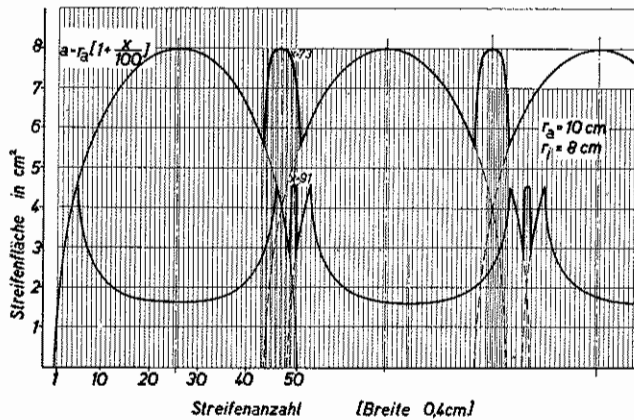


Abb. 17. Gleichmäßigst-mögliche Überdeckung von Kreis- und Kreisring-Flächeninhaltslinien im Vergleich zueinander.

ungünstiger auszugleichen sind als Vollkegel- und Hohlkegellinien. Man setzt zum Beweis (aus zahlreichen berechneten Kurvenwerten) die Differenz zwischen den Maxima von Hohlkegelkurven und von Kreisringkurven und den Minima ihrer Einbuchtungen (die Maße  $a$  und  $b$  in den kleinen, aber maßgerechten und daher vergleichbaren Figuren der Abb. 18) ins Verhältnis zu den Maxima und trägt die Werte prozentual auf ( $a = 100\%$ ) in Abhängigkeit von den zugehörigen Hohlkegeln bzw. Kreisringen. Man erfaßt sie in ihrer Gesamtheit — sowohl Hohlkegel als auch Kreisringe — durch den Zahlenwert  $r_a : (r_a - r_i)$  und erhält also Kurven nach Abb. 18, die aus dem Wert  $100(a-b) : a$  in Abhängigkeit von der Zahl  $r_a : (r_a - r_i)$  dargestellt sind.

Beispielsweise ist der Maximalwert der Hohlkegellinie des für  $r_a : (r_a - r_i) = 2,5$  möglichen Hohlkegels mit  $r_a = 10$  und  $r_i = 6$  ( $h = 10$ ) aus der Tabelle I =  $13,0623 - 3,5530 = 9,5093 = a$  und der Minimalwert in der Kurvenmitte =  $19,9854 - 11,9780$

= 8,0074 =  $b$ . Dem Wert  $r_a : (r_a - r_i) = 10 : (10 - 6) = 2,5$  entspricht also in dem Diagramm die Zahl 100  $(a-b) : a = 100 (9,5093 - 8,0074) : 9,5093 = 150,19 : 9,5093 = 15,8$ .

Für den Kreisring mit  $r_a = 10$  und  $r_i = 6$  [ $r_a : (r_a - r_i) = 2,5$ ] ergeben sich der Höchstwert der Kurve aus Tabelle II zu 3,1712 =  $a$  und der Tiefstwert zu 3,9996 - 2,3996 = 1,6000 =  $b$ . Die Zahl 100  $(a-b) : a$  ist hier 100  $(3,1712 - 1,6000) : 3,1712 = 157,12 : 3,1712 = 49,55$  (siehe Abb. 18).

Die Einbuchtung bei den Hohlkegelkurven nimmt zunächst mit zunehmender Ausbuchtung der Kegel [also bei kleiner Zahl  $r_a : (r_a - r_i)$  beginnend] gering zu, aber sie nähert sich sehr bald einem fast konstanten Wert, der etwa 18,5 % des jeweiligen Maximums der Kurve beträgt. Bei den Kreisringkurven nimmt mit schmaler werdendem Ring die prozentuale Vergrößerung der Einbuchtung ständig zu, erst sehr schnell

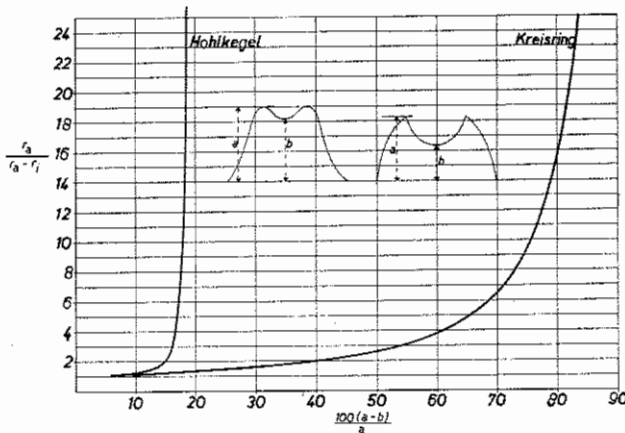


Abb. 18. Unterschied im Maximum und Minimum der Hohlkegelvolumenlinien und der Kreisringflächeninhaltslinien.

und bei größerer Verhältniszahl  $r_a : (r_a - r_i)$  allmählich langsamer. Die Tiefe des Einschnitts einer Kreisringkurve beträgt an der Stelle, an der die Hohlkegelkurve etwa 18,5 % erreicht, bereits über 80 % des Kurvenmaximums. Da bei Drallkörperdüsen (die in Hohlkegelform spritzen, wie sich zeigen wird) öfter die Frage gestellt wird, wie groß bei einer Flüssigkeitsverteilungskurve der Unterschied zwischen Tal und Berg bei bester Verteilung sein darf, wird die Darstellung der in Abb. 18 gezeigten Kurve für Hohlkegel in Abb. 19 nochmals mit größerer Unterteilung der Prozentwerte gebracht, so daß für jede Hohlkegelart [ausgedrückt durch das Verhältnis  $r_a : (r_a - r_i)$ ] zu dem Maximum der Verteilung das theoretische Minimum aus diesem Diagramm genau entnommen werden kann. Bei fast allen praktisch angewendeten Dralldüsen wird also neben dem Maximum der Flüssigkeitsverteilung von 100 % immer im günstigsten Fall ein Minimum von etwa 80 % auftreten. Dieser Unterschied in der Verteilung ist in keinem Falle auszuschalten. Wenn diese Differenz wesentlich überschritten wird, so spritzt die Düse infolge mangelhafter Herstellung schlecht, oder der Düsenabstand bei der Kombination mehrerer Düsen ist falsch gewählt worden.

Nachdem die Überschneidungslinien derjenigen geometrischen Figuren, nach deren äußerer Form und Überdeckungsart sich die Spritz- oder Sprühflüssigkeit bei der Kombination mehrerer Düsen möglicherweise auf der Bodenfläche absetzen konnte, bekannt waren, mußte die Anwendbarkeit der theore-

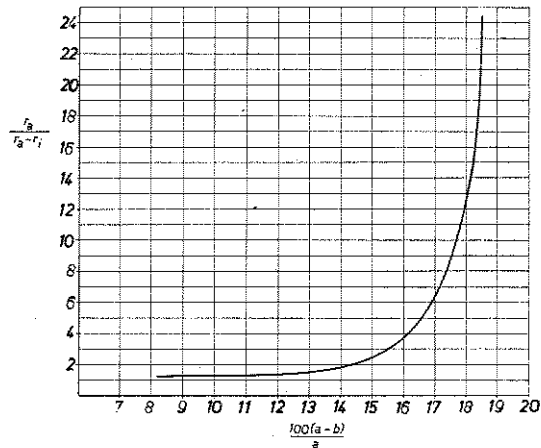


Abb. 19. Unterschied im Maximum und Minimum einer Hohlkegelvolumenlinie bei zunehmender Aushöhlung des Ursprungsvollkegels.

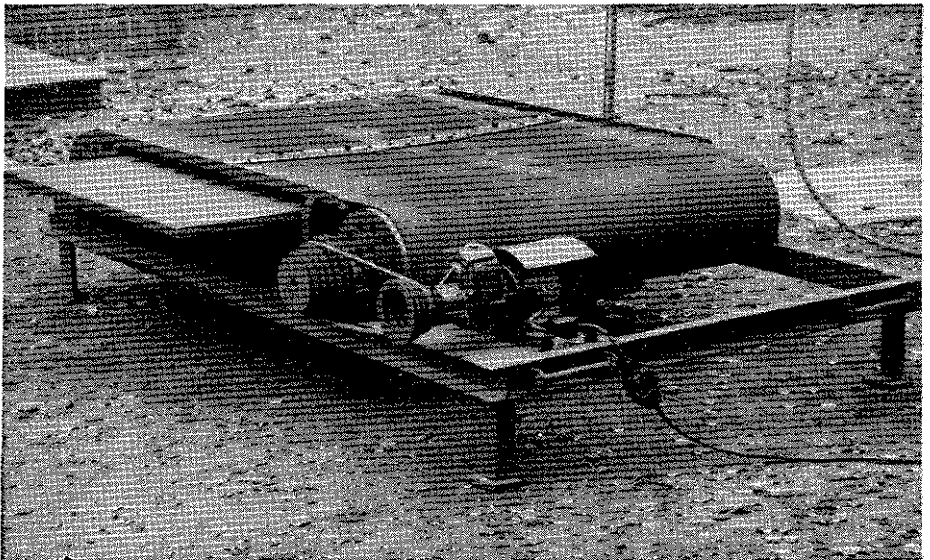


Abb. 20. Gerät zur Aufnahme von Düsen-Spritzbildern.

tischen Linien auf die praktischen Verhältnisse geprüft werden. Es mußte also einmal festgestellt werden, in welcher Gestalt ein durch Düsen erzeugter Flüssigkeitsstrahl den Boden berührt, und zum andern, ob und welche der aus den geometrischen Körpern abgeleiteten Diagramme sich anwenden und verwenden ließen. Der Beweis wurde rein praktisch geführt, ohne weitere Beachtung der exakten Vorgänge im Düsenstrahl und seiner wahren und komplizierteren theoretischen Gestalt<sup>1)</sup>.

Die rohe Form des Strahles wurde mit Hilfe des im Institut für Geräteprüfung entwickelten Gerätes zur Aufnahme von Düsen-Spritzbildern nach A b b. 20 ermittelt<sup>2)</sup>.

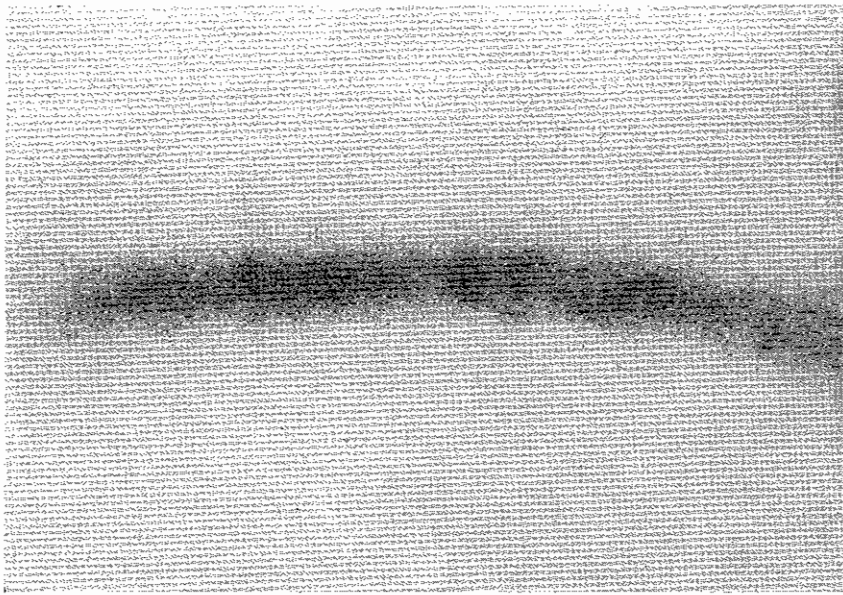


Abb. 21. Schnitt durch einen Flachstrahl (Dralldüsenstrahl).

Man erhält dann Spritzbilder, wie sie als Beispiele in den A b b. 21 und 22 gezeigt werden. Es war nun zu untersuchen, ob die Benetzung des Streifens (Abb. 21), der aus einem Flachstrahl entstanden ist, oder des Ringes (Abb. 22), der von einem Dralldüsenstrahl herrührt, je Flächeneinheit vollkommen gleichmäßig ist oder ob sie sich als Flächenprojektion eines anderen der untersuchten geometrischen Körper ergibt.

Zu diesem Zweck wurde in quadratische Kästen mit einer Kantenlänge von 10 cm, deren Auf- und Zusammenbau die A b b. 23 zeigt, aus der zu untersuchenden Düse eine bestimmte Zeit lang gespritzt. Die in den einzelnen Kästen aufgefangenen Wassermengen wurden ausgelitert und zunächst nach den Zahlen-

<sup>1)</sup> Siehe hierzu: Obering. Dr.-Ing. H. Nickels, „Die Strahlungserstäubung bei Spritzdüsen“. Landtechnische Forschung Heft 3, 1953, 79–83.

<sup>2)</sup> Beschreibung siehe „Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes“ 5. 1953, S. 25.

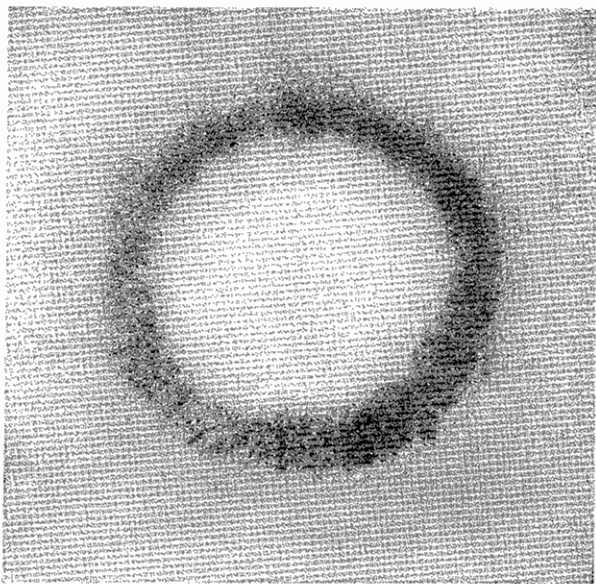


Abb. 22. Schnitt durch einen Rundstrahl  
(Dralldüsenstrahl).

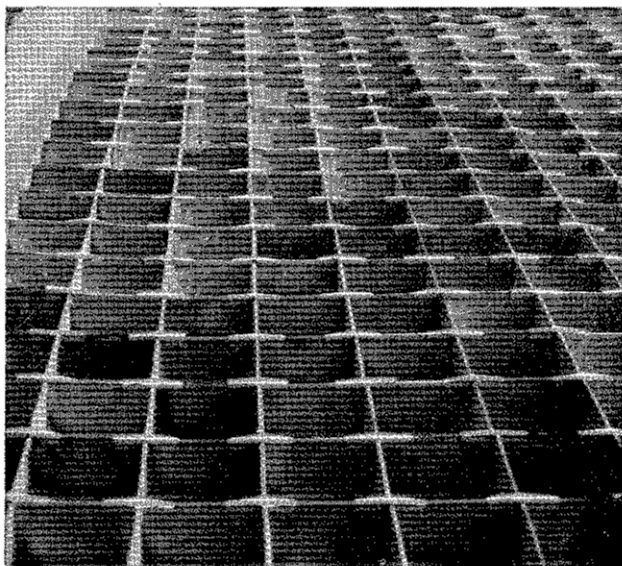


Abb. 23. Kastenform und -aufbau für die Herstellung von  
Düsenstrahl-Verteilungsbildern.



werten aufgeschrieben und später je nach Wasservolumen unterschiedlich farbig in ein Formblatt eingezeichnet, dessen Aufteilung der Anordnung der Kästen entsprach. Für den Flachstrahl kann man schon auf diese Weise infolge der zunehmenden Ansammlung der Flüssigkeitsmengen nach der Mitte der Düse zu auf eine Dreiecksform des Strahles schließen. Den genauen Verlauf erhält man aber erst aus der Addition der senkrechten Reihen der in den Formblättern eingetragenen Zahlenwerte und ihrer Kurvenaufzeichnung. Man bekommt so die Verteilung der Flüssigkeit über der Spritzbreite der Einzeldüse.

In der Abb. 24 ist links als voll ausgezogene Kurve die Querverteilung bei einer Umschalt-Schleierdüse der Pflanzenschutzgeräte-GmbH., Leer (Ostfriesland), zu sehen. Die Zahlenwerte aus dem praktischen Spritzversuch, wonach diese Kurve entstanden ist, zeigt die Tabelle III. Die Kurve besagt, daß die Geschwindigkeit der Flüssigkeit im Flachstrahl nicht gleichmäßig ist. In der Mitte des

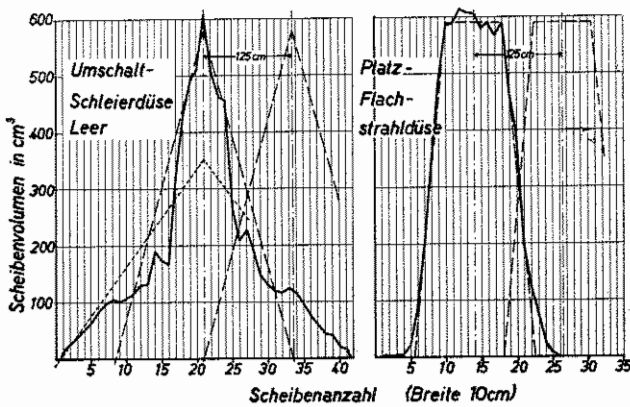


Abb. 24. Praktische Flüssigkeits-Querverteilungslinien und ihre möglichen theoretischen Ersatzkurven.

Strahles herrscht eine Höchstgeschwindigkeit, die dann nach außen zu immer mehr abnimmt. Trotzdem kann die Figur durch ein inhaltsgleiches Dreieck ersetzt werden. Die Grundlinie entspricht allerdings nicht der Länge der beim praktischen Versuch auf der Bodenfläche abgesetzten Flüssigkeit. Sie macht beim vorliegenden Beispiel nur etwa 60 % dieses Wertes aus. Das langgestrichelte Dreieck ist die brauchbare Ersatzfigur<sup>3)</sup>. Die kurzgestrichelten Linien umschließen zum Vergleich die Dreiecksform, die sich ergibt, wenn man die gesamte Spritzbreite als Grundlinie gewählt hätte. Sie wird einer Ersatzfigur nicht gerecht. Für die untersuchte Umschalt-Schleierdüse (Bohrung: 3,5 mm, Prallplattenabstand: 0,65 mm) ergibt sich also bei senkrechter Einstellung und bei einem Druck von 5 atü bei 50 cm Entfernung von der Benetzungsebene ein günstigster Düsenabstand, der gleich der halben Ersatzdreiecksgrundlinie, also gleich 125 cm, ist. Dieser beste Abstand wurde durch praktische Versuche bestätigt.

<sup>3)</sup> Der spitze Dreieckswinkel entspricht nicht etwa dem Winkel des Düsenstrahles, sondern ist allein durch die Wahl der Größeneinteilung der Streifenvolumina auf der Zeichnung bedingt.

Bei der Flachstrahl-Pralldüse der Firma C. Platz, Ludwigshafen, erhält man sowohl bei der unterschiedlich farbigen Darstellung der in Kästen aufgefangenen und ausgeliterten Wassermengen in der Aufsicht als auch bei der Aufzeichnung der Querverteilungskurve ein anderes Bild als bei der Blasator-Umschalt-Schleierdüse. Auf der rechten Seite der Abb. 24 wird der Verlauf der Verteilungslinie eines Strahles aus der Platz-Pralldüse gezeigt. Die Zahlenwerte des praktischen Spritzbildes sind in der Tabelle IV zusammengestellt. Es wird sofort augenscheinlich, daß die Verteilungslinie durch ein Trapez rechteckig ersetzt werden kann, dessen nicht parallele Seiten unter demselben Winkel zur Grundlinie geneigt sind. Es muß also hier dafür gesorgt werden, daß nur die angrenzenden, schräg abfallenden Äste der Querverteilungskurven zweier oder

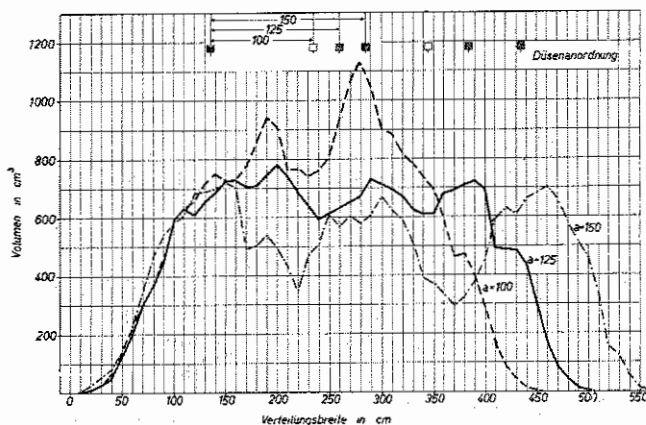


Abb. 25. Flüssigkeitsquerverteilung bei drei Platz-Pralldüsen im Abstand von  $a = 100, 125$  und  $150$  cm (Abstand von der Spritzfläche  $h = 50$  cm).

mehrerer nebeneinander angebrachter Düsen sich in ihrer Mitte überschneiden. Unter dieser Bedingung wird für die Platz-Pralldüse (Bohrung: 1,8 mm, Prallplattenabstand: 1,1 mm) bei einem Druck von 5 atü und 50 cm Entfernung von der Benetzungsebene der günstigste Düsenabstand gleich 125 cm. Das Ergebnis von praktischen Versuchen mit drei nebeneinander spritzenden Platz-Pralldüsen bei 5 atü Druck und in 50 cm Abstand von der Grundfläche und bei 290 Sekunden Spritzdauer ist in Abb. 25 dargestellt. Die Zahlenwerte bringt die Tabelle V. Die voll ausgezogene Kurve ist die Querverteilung bei dem idealen Düsenabstand von 125 cm. Bei einer Verschiebung des Abstandes ergeben sich merkbare Unstetigkeiten im Verteilungsverlauf. Die obere gestrichelte Linie erhält man bei einem Düsenabstand von 100 cm und die untere Kurve bei einer Düsenentfernung von 150 cm.

Aus der farbigen Darstellung der einzelnen, verschieden großen Wassermengen, die beim Spritzen aus einer Pralldüse in untergestellte quadratische Kästen aufgefangen werden, kann man nicht so ohne weiteres auf die Kurvenform schließen, aus der dieses Verteilungsbild entstanden ist. Bei Ringgestalt,

wie sie Abb. 22 zeigt, konnte es neben dem einfachen Kreisring auch die senkrechte Projektion eines Hohlkegelstumpfes oder eines Hohlkegels sein. Zur Klarstellung war also erforderlich, zu einem praktischen Verteilungsbild einer Dralldüse die Bilder der genannten theoretischen Figuren derart darzustellen, daß ihre Volumina gleich dem Rauminhalt des praktisch gespritzten Körpers waren. Die Spritzzeit wurde so gewählt, daß die ausgebrachte Wassermenge unter der Menge lag, die zur Ausfüllung eines ganzen Hohlkegels nötig war. Damit war eindeutiger der Nachweis möglich, ob ein Hohlzylinder, ein Hohlkegelstumpf oder auch unter diesen Umständen ein „aufgelockerter“ Hohlkegel entstand. Die Untersuchung wurde mit mehreren Düsentypen durchgeführt.

Als Beweis-Beispiel und zur Erklärung des Vorganges ist die Fricke-Dralldüse gewählt worden. Mit dieser Düse wurde ein Spritzbild durch Spritzen in untergestellte Kästen bei 3 atü Druck und bei einem Düsenabstand von der Auffangebene von 70 cm hergestellt. Gespritzt wurde 40 Minuten und während dieser Zeit eine entsprechende Wassermenge ( $48\,136\text{ cm}^3$ ) ausgebracht (siehe Tabelle VII). Zur Darstellung der theoretischen Figuren wurden für die Grundfläche ein äußerer Halbmesser ( $r_a$ ) von 60 cm und ein innerer Halbmesser ( $r_i$ ) von 32 cm gefunden (Erläuterung im Schlußabschnitt). Es war nun nötig, zunächst einen Hohlkegel mit diesen Grundflächenwerten und mit einer Höhe von 70 cm (Volumen:  $188\,832\text{ cm}^3$ ) in Säulen von 10 cm mal 10 cm Bodenfläche zu zerlegen, um diese Säulenwerte (reduziert) mit den in den quadratischen Kästen von 10 cm Kantenlänge aufgefangenen Wassermengen beim praktischen Spritzversuch vergleichen zu können. Als Formel zur Berechnung der Säulenwerte eines Kegels wurde gefunden:

$$V = \frac{h}{r} \cdot \left[ r \cdot e (b-a) - \frac{e}{3} \left( b \cdot \sqrt{b^2 + e^2} - a \cdot \sqrt{a^2 + e^2} \right) - \frac{b^3}{6} \ln \frac{e + \sqrt{b^2 + e^2}}{b} + \frac{a^3}{6} \ln \frac{e + \sqrt{a^2 + e^2}}{a} - \frac{e^3}{6} \left( \ln (b + \sqrt{b^2 + e^2}) - \ln (a + \sqrt{a^2 + e^2}) \right) \right] \quad (3^4)$$

Die Größen  $a$ ,  $b$  und  $e$  sind aus der Abb. 26 zu erkennen.

Nach der (vereinfachten) Formel (3) können nur die auf der Grundfläche voll quadratisch erscheinenden Säulen bestimmt werden. Die teilweise durch die Kreislinie begrenzten Säulen ergeben sich als Restwerte der Summe der in der gleichen Scheibenreihe stehenden vollen quadratischen Säulen. Die letzteren müssen also addiert und von der zugehörigen Gesamtscheibe abgezogen werden. Die ganzen Scheiben können nach der Formel (1) ausgerechnet werden.

Nach Berechnung der Säulenvolumina für den Hohlkegel mit  $h = 70\text{ cm}$ ,  $r_a = 60\text{ cm}$  und  $r_i = 32\text{ cm}$  (durch Subtraktion der Säulen für den Vollkegel mit  $h = 70\text{ cm}$  und  $r = 32\text{ cm}$  von den entsprechenden Säulen des Vollkegels mit  $h = 70\text{ cm}$  und  $r = 60\text{ cm}$ )

<sup>4</sup>) Die Formel läßt sich bei öfterer Anwendung für die Kantenlängen von 10 sehr vereinfachen, wenn man sich hierfür eine Anzahl Werte — nur abhängig von  $h$  und  $r$  — ausrechnet und sie in einer Tabelle festlegt. Man kommt dann auf die einfache Formel  $V = 100 \cdot \frac{h}{r} (r-z)$  mit der je Säule veränderlichen Zahl  $z$ . Die gebräuchlichsten Zahlenwerte für  $z$  sind in der Tabelle VI zusammengestellt.

wurde jeder einzelne Wert mit dem Faktor 0,2549 multipliziert, so daß die Summe aller reduzierten Säulen die beim praktischen Spritzbild erreichte Wassermenge von  $48\,136\text{ cm}^3$  ergab. Die Zahlenwerte bringt die Tabelle VII.

Als zweite theoretische Figur wurde der Hohlkegelstumpf mit der Grundfläche aus  $r_a = 60\text{ cm}$  und  $r_i = 32\text{ cm}$  berechnet, dessen Volumen zum genauen Vergleich ebenfalls  $48\,136\text{ cm}^3$  betragen mußte. Der Berechnungsgang ergab eine Stumpfhöhe von  $h_s = 70,00 - 63,46 = 6,54\text{ cm}$  und die oberen Halbmesser  $r_{o,a} = 54,4\text{ cm}$  und  $r_{o,i} = 29,0\text{ cm}$ . Aus den einzeln berechneten Säulen der vier Kegel mit  $h = 70\text{ cm}$  und  $r = 60$  bzw.  $32\text{ cm}$  sowie  $h = 63,46$  und  $r = 54,4$  bzw.  $29\text{ cm}$  ließen sich durch Subtraktion die Säulenwerte für den Hohlkegelstumpf genauestens bestimmen (siehe Tabelle VII).

Die Grenzstücke der Einzelflächen der dritten Figur, des Kreisringes, wurden sowohl bei der äußeren als auch bei der inneren Kreisfläche durch Subtraktion der vollen Flächen-

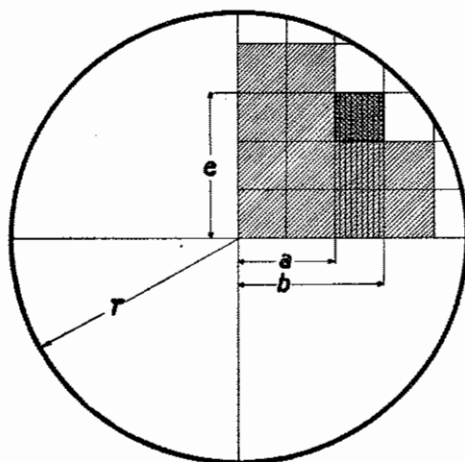


Abb. 26. Figur zur Erläuterung der Größen in der Formel (3).

stücke vom zugehörigen Kreisstreifen erfaßt. Die Kreisstreifen wurden nach der Kreisstreifenformel (2) berechnet. Die einzelnen Flächenwerte mußten mit  $h_z = 5,948$  multipliziert werden, um die vergleichbaren Säulen des dem praktischen Spritzbild volumengleichen Hohlzylinders zu bekommen.

Die Säulen der drei inhaltsgleichen Figuren („aufgelockerter“ Hohlkegel, Hohlkegelstumpf und Hohlzylinder) wurden in verschiedenen Farbwerten, die von der Größe der einzelnen Volumina abhängen, bunt aufgetragen und daneben in gleicher Weise das praktisch gespritzte Bild dargestellt. Der Vergleich zeigte in allen Fällen (nicht nur bei der Fricke-Dralldüse und besonders eindeutig bei der mit größter Präzision gearbeiteten holländischen Lyunet-Düse), daß bei einwandfreiem Spritzstrahl das Spritzbild einer Rundstrahl-düse der senkrechten Projektion eines Vollkegels oder eines Hohlkegels mit nur unbedeutenden Abweichungen gleichgesetzt werden kann.

Die Darstellung der Vergleichsfiguren zeigt die Abb. 27. Da die farbige Wiedergabe schwierig war, wird die Aufnahme eines anschaulichen plastischen

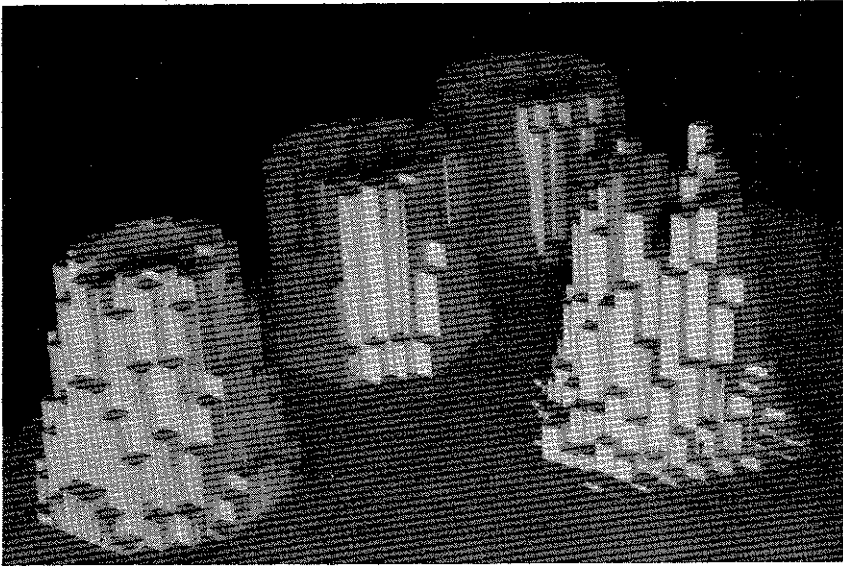


Abb. 27. Vergleich einer praktischen Spritzfigur mit volumengleichen theoretischen Körpern.

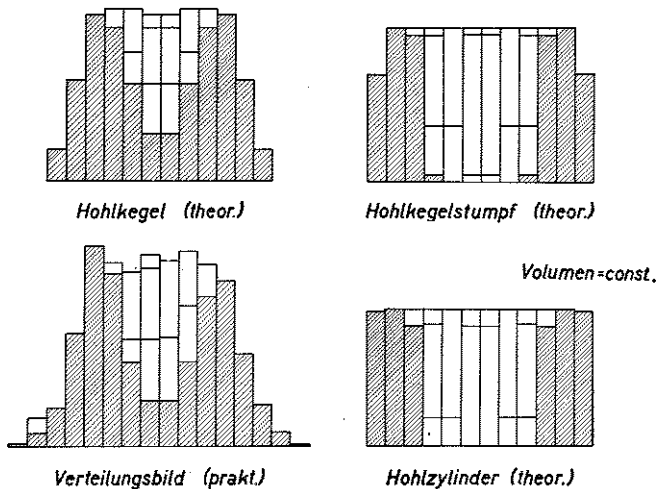


Abb. 28. Mittelschnitt durch die Modelle der Abb. 27.

Aufbaues der Figuren in den Wassermengen entsprechenden und maßgerechten Holzsäulen gezeigt. Eine Schnittzeichnung durch die vier Figuren zur weiteren Vergleichsmöglichkeit bringt die Abb. 28.

Sogar das Verteilungsdiagramm eines breiten, offenen Pralldüsenstrahles, wie er sich bei den Tegtmeier-Düsen ergibt, läßt sich durch eine Hohlkegelkurve ersetzen. Das Beispiel einer willkürlich herausgegriffenen und durchaus nicht „idealen“ Verteilungs-

kurve eines Düsenstrahles aus der Tegtmeier-Düse S 12 bei 5 atü Druck, bei 700 sec Spritzdauer und bei einem Abstand der Düse von der Auffangebene von 50 cm (vollausgezogen; Zahlenwerte siehe T a b e l l e V I I I) und ihrer etwa möglichen Ersatzkurve (gestrichelt) zeigt A b b. 29 [ $r_a = 110$  cm,  $r_i = 65$  cm und  $h$  (zur Volumengleichheit) = 2,9 cm].

Nachdem erkannt war, daß ein Rundstrahl in den weitaus meisten Fällen in einer dem Hohlkegel (gegebenenfalls dem Vollkegel) ähnlichen Figur auf die Bodenfläche auftrifft, wurde zur Bestimmung des günstigsten gegenseitigen Abstandes der Düsen bei Düsenkombinationen die linke Kurve der Abb. 7 zum wichtigsten Diagramm für die Feststellung dieses Düsenabstandes  $a$ . Die Abhängigkeit der Verhältniszahl  $r_a:(r_a - r_i)$  jedes Hohlkegels von dem Wert  $x$  mit den genauen Grenzwerten von  $x$  ist daher nochmals in der Schlußabbildung 35 dargestellt.

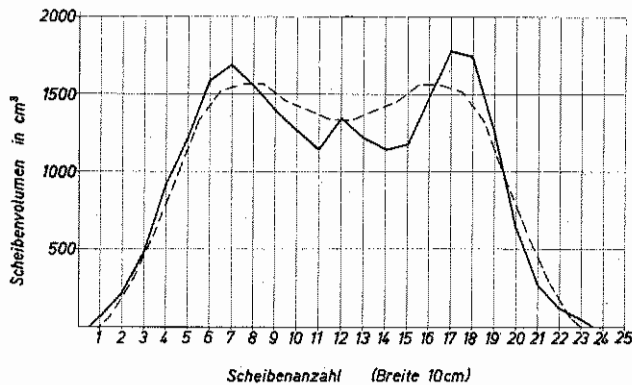


Abb. 29. Verteilungsbild eines Tegtmeier-Düsenstrahles und die theoretische Ersatzkurve.

Zur Anwendung dieses Diagramms wird man zunächst bei einer vorliegenden Düse den äußeren Halbmesser  $r_a$  und den inneren Halbmesser  $r_i$  des „Ringes“ bestimmen müssen, den ihr Flüssigkeitsstrahl auf der Spritzfläche in einem bekannten (gewählten) Abstand von der Düsenmündung bildet.

Am Beispiel der Fricke-Düse mit dem festgestellten  $r_a = 60$  cm und  $r_i = 32$  cm bei  $h = 70$  cm bzw.  $r_a = 42,9$  cm und  $r_i = 22,9$  cm bei  $h = 50$  cm sei gezeigt, wie mit Hilfe des Diagramms der günstigste Abstand bei 50 cm Entfernung der Düsen von der Auftreffebene des Strahles gefunden wird.  $r_a:(r_a - r_i)$  wird 2,145. Dafür ergibt sich aus dem Diagramm ein  $x$  von 41 bis 45. Der Düsenabstand ist also  $a = r_a (1 + x/100) = 42,9 \cdot 1,41$  bis  $42,9 \cdot 1,45 = \sim 60,5$  bis  $62,2$  cm.

Ein Spritzbild mit drei Fricke-Dralldüsen bei 3 atü Druck, bei 50 cm Entfernung von der Bildebene und bei 400 Sekunden Spritzzeit im etwa idealen Abstand von 60 cm ist aufgenommen worden. Die in den Auffangkästen (10 mal 10 cm) ausgeliterten Flüssigkeitsmengen sind in die T a b e l l e IX eingetragen worden. Die Verteilungskurve (voll ausgezogen) im Vergleich mit den ebenfalls unter denselben Bedingungen gespritzten Bildern beim Düsenabstand von 50 cm (gestrichelt) und von 70 cm (strichpunktiert) zeigt die A b b. 30.

Wenn der Abstand der Düsen bei dem Beispiel der Fricke-Düse gleich 60 cm gewählt wird, so ist hier — und in jedem anderen Falle — neben diesem größtmöglichen günstigsten Abstand noch jede Unterteilung in jeweils die Hälfte dieser

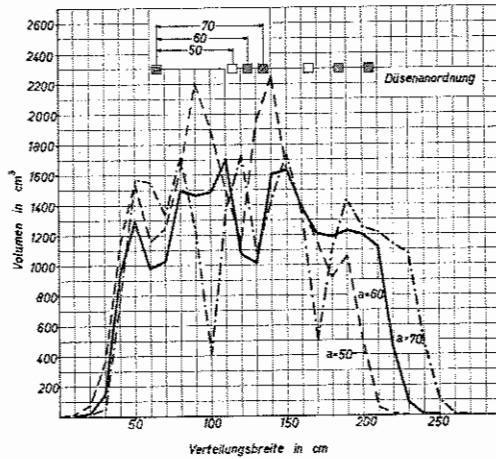


Abb. 30. Flüssigkeitsquerverteilung bei drei Fricke-Dralldüsen im Abstand von  $a = 50$ , 60 und 70 cm (Abstand von der Spritzfläche  $h = 50$  cm).

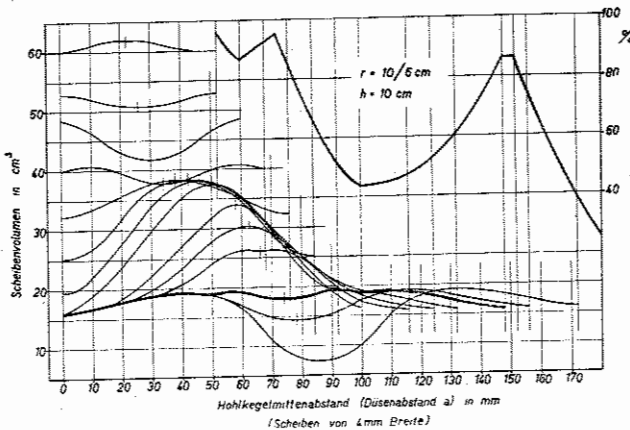


Abb. 31. Verteilungskurven bei Hohlkegel- (Düsen-) Abständen von  $1,15 a$  bis  $0,3 a$ .

berechneten Entfernung und weiterer Halbteilungen möglich. Man kann also die Fricke-Düsen auch in einem Abstand von 30 cm und 15 cm usw. anordnen, da es sich dann lediglich um eine gegeneinander verschobene Überlagerung von zwei bzw. vier Düsenreihen im Abstand von 60 cm handelt. Die Summe ihrer Ausbringmengen ist also nur eine Summierung der idealen Verteilungslinien.

Der genaue Vorgang bei zunehmender Verkürzung des gegenseitigen Düsenabstandes (bei einem festliegenden Abstand von der Spritzebene) wird an dem Beispiel des Hohlkegels mit  $h = 10$  cm,  $r_a = 10$  cm und  $r_i = 6$  cm in der Abb. 31 dargestellt. Die ideale Ausgleichslinie der Scheibensummen liegt bei einem Mittenabstand der Hohlkegel von etwa 150 mm. Die Kurvenschar in der Abbildung links unten zeigt, daß bei einer Vergrößerung dieses Wertes eine immer größere Ausbuchtung der Ausgleichslinie nach unten stattfindet. Beim Zusammenrücken der Kegel wird nach Überschreiten des idealen Abstandes die Ausgleichskurve immer mehr nach oben ausgebuchtet. Eine Grenze und gleichzeitig der ungünstigste Wert sind erreicht, wenn der Abstand gleich dem äußeren Hohlkegel-Radius geworden ist. Mit weiterer Verkürzung des Abstandes füllen sich dann die Täler in der Kurve infolge der zusätzlichen Überschneidungsanteile der anderen benachbarten Hohlkegel immer mehr auf, bis bei dem halben Wert des idealen Abstandes wiederum ein „bester“ Ausgleich vorhanden ist. An der Figur oben rechts in der Abb. 31 ist die Änderung der Maxima und Minima in der Ausgleichskurve mit der Änderung des Mittenabstandes der Hohlkegel eindeutig zu erkennen. Das Maximum ist stets mit 100 % eingesetzt, und die Kurvenwerte geben an, wieviel Prozent des Maximums die Minima bei den verschiedenen Abständen betragen. Man sieht, daß beim halben, diagrammmäßig bestimmten Abstand sogar noch ein besserer Ausgleich erzielt ist als bei dem als Idealgröße für den gegenseitigen Abstand bei den Untersuchungen bisher und auch weiterhin bezeichneten Maximalwert. Auch die weiteren Verkleinerungen im Abstand geben in keinem Falle mehr so ungünstige Ausgleichslinien, wie sie zwischen dem Maximalwert des aus dem Diagramm aufgefundenen günstigsten Abstandes und seinem halben Wert auftreten.

Sobald verschiedene Entfernungen von der Spritzfläche wechselweise eingestellt werden müssen, wird der Maximalwert der bestmöglichen Verteilung nur bei dem Spritzflächenabstand erreicht, der bei der Bestimmung dieses gegenseitigen Düsenabstandes zugrunde gelegt wurde.

So ändern sich (linear) beispielsweise bei der Fricke-Düse die günstigsten maximalen Abstände der Düsen bei Entfernungen von der Auftreffebene des Strahles von 20, 30, 40, 60 und 70 cm wie folgt: 24,5; 37; 49; 61; 73,5 und 86 cm ( $r_a = 17,143$ ; 25,714; 34,286; 42,857; 51,429 und 60 cm).

Es tritt also bei fest angeordneten Düsen nur ein bestmöglicher gegenseitiger maximaler Abstandswert auf bei einem ganz bestimmten bzw. bestimmbaren Abstand von der Spritzebene. Es müßte demnach mit der Höhenverstellbarkeit der Düsen eine Abstandsänderung parallel gehen, um bei Düsenkombinationen immer ideale Spritzverhältnisse zu haben. Nach den vorhergehenden Betrachtungen kann aber bei den fest angeordneten Düsen das Abweichen von der gleichmäßigst-möglichen Verteilung bei verschiedenen Höheneinstellungen dadurch vermindert werden, daß man die Düsen von vornherein in der halben Länge des nach dem Diagramm nach Abb. 35 für die am häufigsten einzustellende Höhe bestimmten maximalen Abstandes über den Spritzbalken verteilt, wenn es Leistung (Ausbringmenge und Druck) und Wirtschaftlichkeit zulassen.

Die genaue Festlegung des äußeren und inneren Kegelhalbmessers bei einer beliebigen, in Kegelform spritzenden Düse ist also die (einzige) Voraussetzung für die Anwendungsmöglichkeit des Diagramms nach Abb. 35 zur Bestimmung des richtigen Düsenabstandes bei Düsenkombinationen. Für eine schnelle Übersicht erfordert die Feststellung von  $r_a$  und  $r_i$  einige Übung. Für die genauere Bestimmung sind zunächst eine Annäherungsberechnung aus der aufzuzeichnenden



praktischen Verteilungskurve und möglichst noch eine Nachkontrolle (Vergleich) durch Berechnung und Aufstellung des theoretischen Kegeldiagramms nötig. Im Institut für Geräteprüfung genügt im allgemeinen ein Schnitt durch den Düsenstrahl beim Betriebsdruck und in einem bestimmten, vorher gewählten Abstand von dem Düsenaustrittsquerschnitt mit Hilfe des Geräts nach Abb. 20. Die

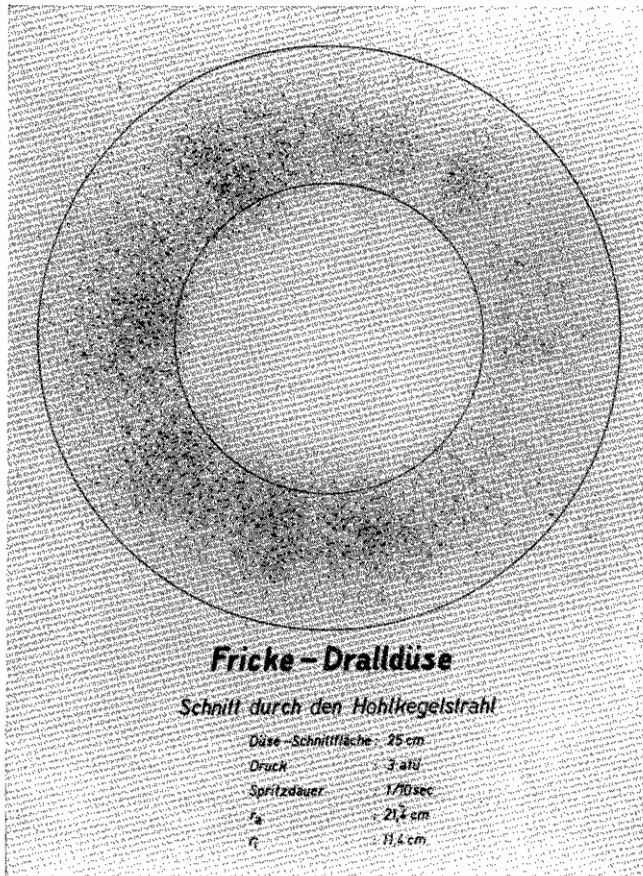


Abb. 32. Bestimmung von  $r_a$  und  $r_i$  aus dem Schnittbild durch einen Dralldüsenstrahl.

den Ring eingrenzenden Linien lassen sich entsprechend der Abb. 32 mit ein wenig Erfahrung — unter Außerachtlassung der über den Kernaußen- und -innenrand versprengten Flüssigkeitströpfchen — ausreichend genau in das Schnittbild einzeichnen und ausmessen.

Für eine Annäherungsbestimmung von  $r_a$  und  $r_i$  ohne diese Spezialapparatur muß die Querverteilungskurve des Düsenstrahles beim Betriebsdruck und bei einem gewählten Abstand von der Spritzfläche hergestellt werden. Man spritzt

mit beliebiger Spritzdauer in untergestellte quadratische Kästen, liert die einzelnen Wassermengen aus und addiert die Werte der Längsreihen. Diese Summenwerte nebeneinander ergeben die Querverteilung der Flüssigkeit. In einem beliebigen Maßstab werden die Querverteilungsvolumina als Kurve über den Breiten der Längsreihen, die der Kantenlänge der Kästen entsprechen, aufgetragen. Man erkennt dann bereits die charakteristische Form der Hohlkegelkurve mit den beiden Maxima und der Vertiefung in der Mitte. Es ist auch ohne weiteres die Hauptrichtung der Seitenlinien festzustellen. Sie verlaufen etwa in der Mitte über eine bestimmte Strecke als zur Grundfläche winklig stehende Geraden. Sie sind Teile der Ausgangslinien des Vollkegels, aus dem der Hohlkegel entstanden ist. Wenn man die geraden Strecken nach unten verlängert, so schneiden sie auf der Grundlinie eine Strecke innerhalb der Figur aus. Macht

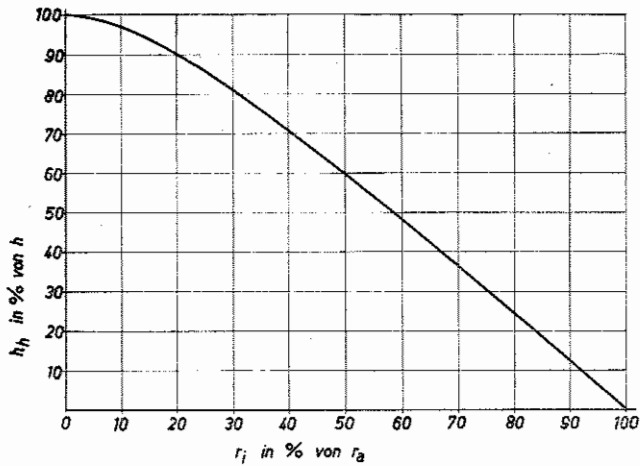


Abb. 33. Kurve zur Bestimmung von  $r_i$ .

man zu der halben Länge dieser Strecke einen Zuschlag von  $\sim 9\%$  der halben Strecke, so hat man mit guter Annäherung den Wert  $r_a$  (kleiner als die halbe Grundlinie des gezeichneten Verteilungsdiagramms). Die nach oben verlängerten Linien schneiden sich außerhalb der Figur in einem Punkte. Durch diese Hilfslinien ist ein Dreieck entstanden. Von der Dreieckshöhe muß man  $\sim 16\%$  der Höhe abziehen. Man kommt dann auf einen Wert, der etwa der Spitzenhöhe  $h$  des Vollkegels entspricht, zu dessen Kurve das aus dem praktischen Versuch aufgetragene Diagramm damit ergänzt ist. Da die Maxima  $h_h$  aller Hohlkegel, die sich aus einem Vollkegel bilden lassen, und die Höhe  $h$  dieses Vollkegels zu  $r_i$  und  $r_a$  in einem festen Abhängigkeitsverhältnis stehen und da dieses Abhängigkeitsverhältnis für jeden Vollkegel mit allen seinen Hohlkegeln in den sich entsprechenden Werten immer das gleiche ist, lassen sich damit  $r_i$  aus  $r_a$ ,  $h$  und  $h_h$  bestimmen. Zu diesem Zweck ist die Kurve nach Abb. 33 aufgestellt worden. Es ist  $h_h$  in Prozent von  $h$  in Abhängigkeit von  $r_i$  in Prozent von  $r_a$  dargestellt. Man stellt also fest, wieviel Prozent das aus den beiden Spitzenwerten des praktischen Spritzbildes als Mittelwert bestimmte Maximum in der gezeichneten Kurve

(in mm der Zeichnung) von der durch den Ergänzungsvollkegel gefundenen Vollkegelhöhe  $h$  (auch in mm) beträgt, und findet mit dieser Größe aus dem Diagramm der Abb. 33 die Prozentzahl, mit deren hundertstem Teil das bereits bekannte  $r_a$  multipliziert werden muß, um so  $r_i$  zu erhalten.

Beim Beispiel des Spritzbildes der Fricke-Düse (voll ausgezogene Linie) und ihrer Hohlkegel-Ersatzfigur (gestrichelte Linie) nach Abb. 34 sind die Höhe des eingezeichneten Ergänzungsdreiecks nach dem gewählten Zeichnungsmaßstab gleich 310 mm und die Grundlinie gleich 110 mm. Das Dreieck wurde gefunden durch die Verlängerung der seitlichen schrägen Begrenzungslinien der praktischen Verteilungskurve (die in der Schräge gering voneinander abweichen). 9 0/0 von der halben Grundlinie ergeben etwa

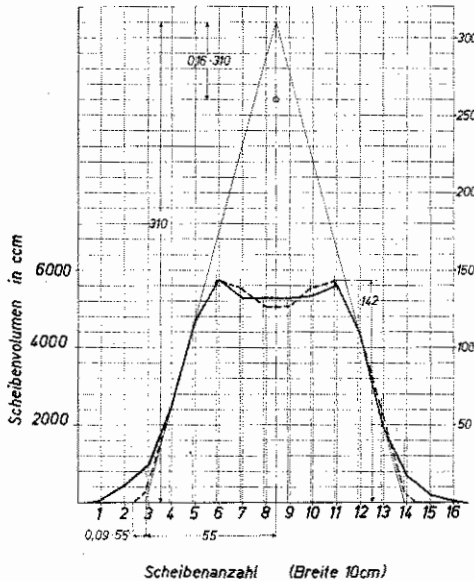


Abb. 34. Beispiel zur Bestimmung von  $r_a$  und  $r_i$  aus der praktischen Querverteilungskurve einer Düse.

5 mm. Damit wird  $r_a = 55 + 5 = 60$  cm (1 mm des Breitenmaßstabes der Zeichnung entspricht 1 cm der tatsächlichen Verteilungsbreite). Als Kegelspitzenhöhe findet man  $310 - 0,16 \cdot 310 = 310 - 50 = 260$ . Die mittlere Höhe der Maxima der Kurve ist 142. 142 sind etwa 55 0/0 von 260. Dafür findet man aus dem Diagramm der Abb. 32, daß  $r_i$  etwa 53 0/0 von  $r_a^2$ , also gleich  $0,53 \cdot 60 = 32$  cm ist.

Es ist gut, sich nicht nur auf ein einziges praktisches Spritzbild zu beziehen, sondern nach der beschriebenen Methode aus zwei oder drei Verteilungskurven die Werte von  $r_a$  und  $r_i$  nachzuprüfen. Ebenso ist es nach Festlegung dieser Größen zweckmäßig, mit den gefundenen  $r_a$  und  $r_i$  und einer berechenbaren Höhe  $h$  die theoretische Ersatzfigur aufzuzeichnen und mit der praktischen Querverteilung zu vergleichen. Der Wert  $h$  des theoretischen Hohlkegels ist dadurch bestimmt, daß das Volumen dieses Hohlkegels gleich der gesamten für die Untersuchung verspritzten Wassermenge sein muß. Man braucht die Höhe  $h$  für

die Berechnung der Scheiben des theoretischen Hohlkegels nach der Formel (1). Die Scheiben müssen in der Breite den Kantenlängen der Auffanggefäße beim praktischen Spritzen entsprechen.

Beim Vergleich der praktischen und der theoretischen Figur ist nach dem hier zur Bestimmung von  $r_a$  und  $r_i$  beschriebenen Verfahren nur noch selten eine Korrektur von  $r_a$  oder  $r_i$  nötig. Sicher lassen sich auch noch andere Methoden zur Festlegung von  $r_a$  und  $r_i$  finden.

Es hat parallel mit diesem Vergleich des Düsenstrahles mit einer geometrischen Figur durch Gegenüberstellen des praktischen und theoretischen Verteilungs-Diagramms keinerlei Untersuchung der Kräfte- und Strömungsverhältnisse im Strahl stattgefunden. Es ist selbstverständlich, daß die in einer unter Druck stehenden Flüssigkeit tätigen Schwer-, Reibungs- und Kapillarkräfte und die dabei verschieden großen und verschieden schnellen Tröpfchen in ihrem Zusammenwirken nicht in so einfache Form gebracht werden können, wie es Dreiecke, Trapeze, Voll- oder Hohlkegel sind. Es ist aber eine Tatsache, daß die aus der Düse ausgebrachte Flüssigkeit, sobald sie bei einem bestimmten Druck (Betriebsdruck) im normalen Strahl spritzt, sich letzten Endes in einer Verteilung auf der Bodenfläche absetzt, die beim Flachstrahl durch ein Dreieck oder durch ein Trapez und beim Rundstrahl in ihren wichtigsten Teilen — im Verlauf der seitlichen Begrenzung und in ihren beiden Maxima — ausreichend genau durch die Kurve eines Hohlkegels ersetzt werden kann. Die geringen Abweichungen in der Ähnlichkeit sind für den vorgesehenen Zweck unbedeutend. Dadurch, daß man einen Flüssigkeitsstrahl einem geometrischen Körper gleichsetzt, kann man dann ohne besondere Schwierigkeiten die beste Überdeckung mehrerer in einer Reihe spritzender oder sprühender Düsen bestimmen.

Der gleichmäßigste Ausgleich durch den richtigen Abstand mehrerer Flachstrahlen läßt sich — wie gezeigt wurde — verhältnismäßig leicht finden. Bei Rundstrahlen ist das Diagramm nach Abb. 35 ein zweckmäßiges Hilfsmittel.

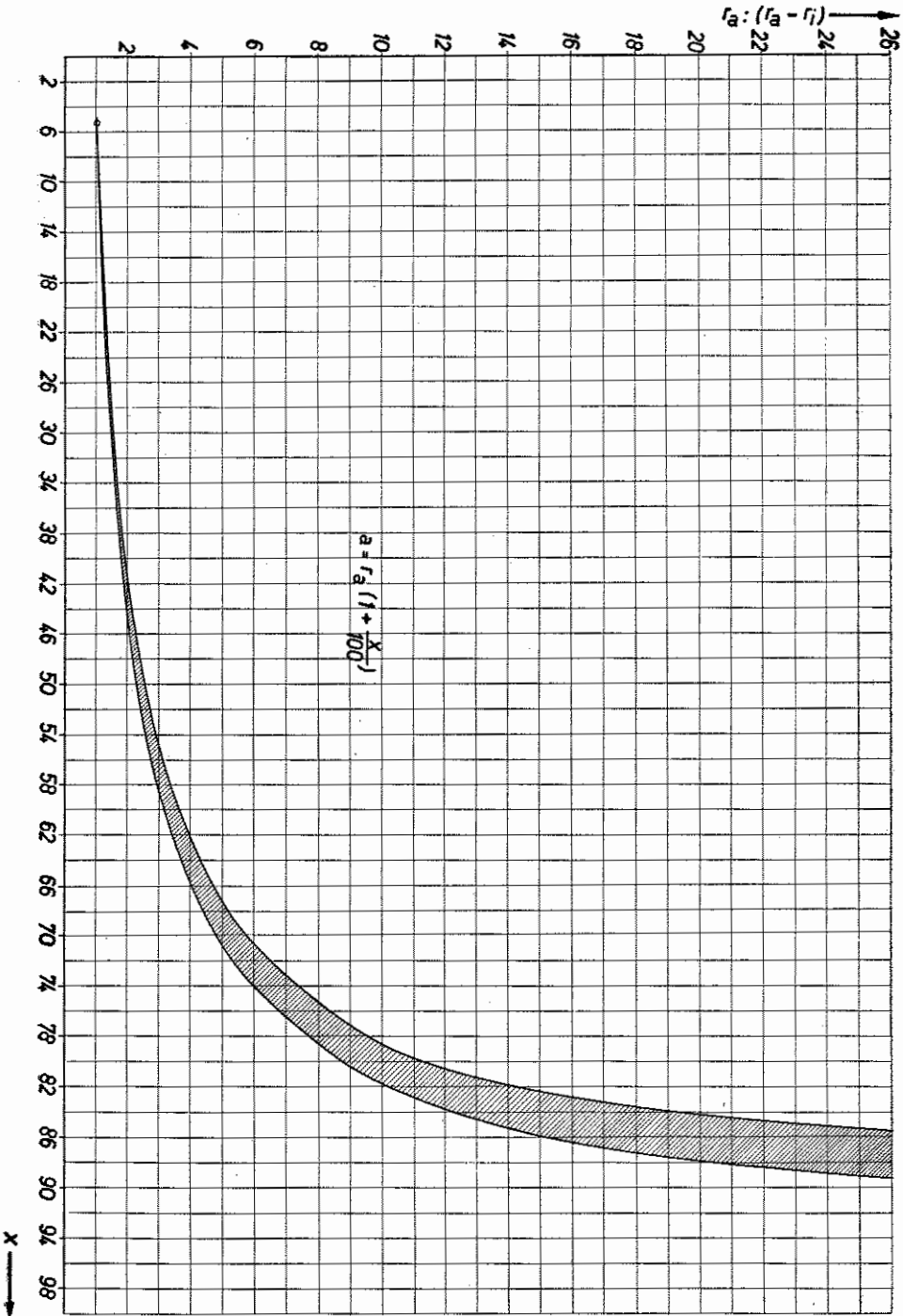


Abb. 35. Diagramm zur Bestimmung des zweckmäßigsten Düsenabstandes von in Voll- und Hohlkegelform spritzenden Düsen.

## Zusammenfassung

Die Summenlinien von Dreiecken, Vollkegeln, Hohlkegeln, Vollkegelstümpfen, Hohlkegelstümpfen, Kreisen und Kreisringen werden aufgestellt nach einer Methode der Aufteilung dieser Figuren in Streifen bzw. in Scheiben und der graphischen Auftragung der Streifeninhalte bzw. der Scheibenvolumina über den Streifen- bzw. Scheibenbreiten. Formeln für die Berechnung der Streifen bzw. Volumina werden angegeben. Gleichartige geometrische Figuren werden im gegenseitigen Abstand so zusammengestellt, daß die geometrische Addition der sich überdeckenden Streifen- bzw. Scheibenanteile möglichst eine Gerade (bestmöglichst gleichmäßigste Ausgleichsline) ergibt.

Das Ziel dieser Art der Untersuchung stereometrischer und planimetrischer Körper war, durch Gleichsetzen mit Flüssigkeitsstrahlen aus Prall- oder aus Dralldüsen — von denen der Nachweis zu erbringen war, ob und welchen der untersuchten Figuren sie weitestgehend ähnlich waren — den richtigen gegenseitigen Abstand von Düsen an Pflanzenschutzgeräten zu finden, bei denen Serien von Einzeldüsen verwendet werden, um eine gleichmäßigst-mögliche Verteilung der Flüssigkeit zu gewährleisten.

Es wird festgestellt und nachgewiesen, daß Flachstrahlen durch Dreiecke oder Trapeze und Rundstrahlen in jedem Fall durch Voll- oder Hohlkegel ausreichend genau ersetzt werden können.

Bei Dreiecken und Trapezen (Flachstrahlen) läßt sich der beste Abstand für die gleichmäßigste Ausgleichsline verhältnismäßig leicht finden. Für Voll- und Hohlkegel (Rundstrahlen) wird ein Diagramm aufgestellt, aus dem der gegenseitige Abstand für die richtige Überschneidung sofort entnommen werden kann. Hierzu ist lediglich die Kenntnis des Außenhalbmessers  $r_a$  und des Innenhalbmessers  $r_i$  nötig, die sich aus dem „Kreisring“ ergeben, den der Kegel von einer bestimmten Höhe bzw. der Flüssigkeitsstrahl in einem vorher festzulegenden Abstand von der Düsenmündung auf der Spritzfläche bildet. Eine Methode für eine Annäherungsbestimmung von  $r_a$  und  $r_i$  aus dem praktischen Spritzbild wird angegeben.

Tabelle I: Inhalte von Kegelscheiben in cm<sup>3</sup> beim Zerlegen von halben Vollkegeln mit h = 10 cm und mit verschiedenen Grundkreisradien in cm in senkrechte Scheiben von 0,2 cm Stärke (0,6 cm Stärke bei r = 30, 29,4 und 28,2 cm)

1	1,2	1,4	1,8	2	2,4	3,6	4	4,2	4,8	5,4	6	7	8	8,2	9	9,4	10	28,2	29,4	30	r <sub>cm</sub>	
0,1282	0,1180	0,1100	0,0975	0,0928	0,0860	0,0724	0,0673	0,0658	0,0600	0,062	0,055	0,0589	0,0474	0,0340	0,0169	0,0393	0,0289	0,3134	0,3765	0,2547	1	
0,5540	0,5177	0,4869	0,3717	0,4193	0,3858	0,3178	0,3177	0,2957	0,2831	0,257	0,255	0,2324	0,2213	0,2377	0,2202	0,2167	0,2047	1,9954	1,8072	1,8479	2	
1,0726	1,0241	0,9769	0,9608	0,8584	0,7967	0,6715	0,6273	0,6273	0,5868	0,562	0,521	0,4915	0,4674	0,4491	0,4418	0,4500	0,4145	3,8682	3,7425	3,8284	3	
1,5648	1,5455	1,5023	1,4041	1,3574	1,2748	1,0834	1,0366	1,0155	0,9573	0,909	0,874	0,7450	0,7472	0,7510	0,7357	0,6655	0,6822	6,1624	6,2486	6,1167	4	
1,9166	2,0083	2,0091	1,9318	1,8824	1,7837	1,5431	1,4732	1,4511	1,3708	1,301	1,244	1,2269	1,0988	1,0701	1,0245	1,0168	0,9920	9,1739	8,9961	8,9072	5	
	2,3263	2,4434	2,4453	2,4075	2,3123	2,0330	1,9606	1,9164	1,8150	1,735	1,656	1,5411	1,4621	1,4565	1,3902	1,3707	1,3211	12,2457	11,9705	11,7572	6	
		2,7340	2,9124	2,9067	2,8375	2,5457	2,4559	2,4149	2,3024	2,194	2,104	1,9784	1,8627	1,8407	1,7618	1,7383	1,6911	15,6370	15,3916	15,2576	7	
			3,2960	3,3536	3,3433	3,0702	2,9736	2,9266	2,7962	2,674	2,569	2,4147	2,2876	2,2618	2,1732	2,1309	2,0670	19,1069	18,8435	18,5929	8	
			3,5450	3,7166	3,8116	3,6011	3,5019	3,4496	3,3040	3,176	3,060	2,8761	2,7271	2,6885	2,5963	2,5459	2,4895	23,0976	22,4507	22,4349	9	
				3,9492	4,2226	4,1260	4,0285	3,9825	3,8320	3,689	3,553	3,3578	3,1887	3,1703	3,0345	2,9921	2,9116	26,7987	26,3371	26,2103	10	
					4,5494	4,6425	4,5554	4,5068	4,3599	4,207	4,068	3,8539	3,6654	3,6217	3,4927	3,4139	3,3662	31,0197	30,5229	30,1558	11	
					4,7555	5,1382	5,0735	5,0321	4,8896	4,737	4,591	4,3633	4,1506	4,1205	3,9680	3,9065	3,7866	34,7452	34,5603	34,2368	12	
						5,6077	5,5729	5,5408	5,4156	5,269	5,120	4,8754	4,6590	4,6198	4,4586	4,3970	4,2938	39,8207	38,8218	38,5523	13	
						6,0411	6,0538	6,0367	5,9334	5,794	5,648	5,4026	5,1662	5,1280	4,9459	4,8771	4,7592	43,8339	43,1179	42,9196	14	
						6,4281	6,5012	6,5050	6,4418	6,317	6,177	5,9262	5,6849	5,6307	5,4576	5,3769	5,2592	48,3096	47,6879	47,3282	15	
						6,7571	6,9131	6,9429	6,9327	6,835	6,704	6,4588	6,2114	6,1621	5,9631	5,8875	5,7527	53,1390	52,2066	51,8302	16	
						7,0121	7,2799	7,3460	7,4012	7,344	7,223	6,9861	6,7357	6,6875	6,4713	6,3975	6,2569	57,5334	56,8200	56,3265	17	
						7,1672	7,5871	7,7016	7,8429	7,831	7,740	7,5125	7,2672	7,2125	7,0312	6,9227	6,7883	62,3069	61,4687	61,1051	18	
							7,8261	8,0028	8,2599	8,298	8,237	8,0403	7,7948	7,7484	7,5429	7,4681	7,3018	66,9833	66,1594	65,6555	19	
							7,9704	8,2315	8,6324	8,740	8,729	8,5586	8,3235	8,2782	8,0590	7,9537	7,8337	71,7095	70,7589	70,4751	20	
								8,3713	8,9618	9,168	9,192	9,0691	8,8506	8,7983	8,5992	8,5076	8,3088	76,6645	75,7570	75,1275	21	
									9,2370	9,553	9,644	9,5704	9,3725	9,3332	9,1264	9,0255	8,9241	81,2525	80,4154	80,0250	22	
									9,4478	9,900	10,072	10,0595	9,8943	9,8441	9,6515	9,5649	9,4211	86,1138	85,1425	84,6653	23	
									9,5740	10,211	10,466	10,5338	10,3992	10,3613	10,1745	10,0929	9,9443	90,7422	89,9947	89,5043	24	
										10,467	10,837	10,9964	10,9051	10,8707	10,7006	10,6216	10,4666	95,6158	94,6084	94,2427	25	
										10,658	11,164	11,4322	11,3899	11,3692	11,2146	11,1323	10,9947	100,1930	99,3519	99,0106	26	
										10,776	11,451	11,8503	11,8744	11,8535	11,7187	11,6563	11,5191	104,9682	104,1020	103,6811	27	
											11,692	12,2447	12,3375	12,3247	12,2204	12,1679	12,0460	109,3797	108,8826	108,3667	28	
											11,870	12,6104	12,7863	12,7882	12,7126	12,6639	12,5601	114,0949	113,3777	113,0322	29	
											11,978	12,9473	13,2183	13,2338	13,1988	13,1621	13,0623	118,4422	117,8786	117,5775	30	
												13,2489	13,6318	13,6531	13,6641	13,6478	13,5639	122,8334	122,3390	122,0639	31	
												13,5116	14,0212	14,0703	14,1210	14,1187	14,0638	127,0599	126,5526	126,5367	32	
												13,7229	14,3905	14,4563	14,5590	14,5880	14,5415	131,2112	131,2815	130,9271	33	
												13,8859	14,7290	14,8145	15,0381	15,0278	15,0172	135,3410	135,2181	135,1119	34	
												13,9797	15,0380	15,1485	15,4493	15,4592	15,4801	139,1241	139,4303	139,3506	35	
													15,3101	15,4556	15,8787	15,8835	15,9293	142,9620	143,1921	143,3370	36	
													15,5571	15,7260	16,1998	16,2743	16,3991	146,4641	147,1008	147,2626	37	
													15,7481	15,9623	16,5391	16,6587	16,7488	149,9374	150,8122	151,1198	38	
													15,8993	16,1533	16,8343	17,0182	17,1863	153,1589	154,2710	154,6586	39	
													15,9822	16,2992	17,1433	17,3479	17,5759	156,1248	157,6809	158,1877	40	
														16,3823	17,4199	17,6627	17,9403	158,9534	160,7549	161,4735	41	
															17,6364	17,9373	18,2900	161,4460	163,6681	164,6160	42	
															17,7513	18,1898	18,6070	163,7123	166,5035	167,4299	43	
															17,8894	18,4053	18,9056	165,6347	168,8417	170,1730	44	
															17,9654	18,5698	19,1750	167,1941	171,0739	172,5733	45	
																18,7192	19,4220	168,4126	172,9338	174,7906	46	
																	18,7823	19,6213	174,4520	176,5917	178,0533	47
																		19,7837	175,6146	178,0533	48	
																		19,9165	176,2677	179,2515	49	
																		19,9854		179,8655	50	
5,2362	7,5399	10,2626	16,9646	20,9439	30,1592	67,8582	83,7760	92,3629	120,6376	152,664	188,494	256,5637	335,1045	352,0676	424,1118	462,6526	523,6008	4163,8781	4525,7882	4712,3315	Summe der Scheiben	
5,2360	7,5398	10,2626	16,9646	20,9440	30,1594	67,8586	83,7760	92,3630	120,6374	152,6818	188,496	256,5640	335,1040	352,0686	424,1160	462,6530	523,6000	4163,8766	4525,7889	4712,4000	$\frac{\pi \cdot r^2 \cdot h}{6}$ $\pi = 3,1416$	

Tabelle II: Inhalte von Kreisstreifen in cm<sup>2</sup> beim Zerlegen von halben Kreisflächen mit verschiedenen Halbmessern r in cm in senkrechte Streifen von 0,2 cm Breite (0,6 cm Breite bei r = 30, 29,4 und 28,2 cm)

1,4	2,0	4,0	6,0	8,0	8,2	9,0	9,4	10,0	28,2	29,4	30,0	r cm
0,1953	0,2349	0,3348	0,4100	0,4755	0,4775	0,5042	0,5133	0,5290	4,6213	4,7730	4,7610	1
0,3443	0,4191	0,6047	0,7472	0,8635	0,8792	0,9150	0,9424	0,9690	8,4774	8,5985	8,7210	2
0,4279	0,5280	0,7734	0,9563	1,1121	1,1242	1,1844	1,2133	1,2471	10,8723	11,0808	11,2350	3
0,4842	0,6071	0,9034	1,1273	1,3059	1,3257	1,3901	1,4119	1,4683	12,7599	13,1021	13,2198	4
0,5225	0,6675	1,0088	1,2617	1,4755	1,4918	1,5669	1,6057	1,6585	14,4492	14,7885	14,9103	5
0,5464	0,7140	1,1030	1,3842	1,6188	1,6407	1,7252	1,7682	1,8239	15,8842	16,2209	16,4253	6
0,5581	0,7490	1,1800	1,4909	1,7476	1,7718	1,8637	1,9058	1,9723	17,1764	17,5551	17,7324	7
	0,7742	1,2486	1,5871	1,8661	1,8924	1,9894	2,0385	2,1054	18,3199	18,7423	18,9486	8
	0,7905	1,3089	1,6757	1,9712	1,9962	2,1061	2,1553	2,2320	19,4384	19,8504	20,0910	9
	0,7987	1,3612	1,7498	2,0699	2,1013	2,2114	2,2691	2,3465	20,3879	20,8592	21,1236	10
		1,4076	1,8234	2,1616	2,1907	2,3107	2,3630	2,4509	21,3269	21,8470	22,0608	11
		1,4482	1,8891	2,2444	2,2777	2,4029	2,4635	2,5511	22,1350	22,6947	22,9488	12
		1,4828	1,9490	2,3228	2,3591	2,4899	2,5563	2,6465	23,0076	23,5424	23,8167	13
		1,5133	2,0042	2,3976	2,4333	2,5704	2,6370	2,7328	23,7236	24,3097	24,6153	14
		1,5381	2,0548	2,4645	2,5018	2,6472	2,7153	2,8171	24,4136	25,0493	25,3491	15
		1,5588	2,1007	2,5299	2,5679	2,7186	2,7908	2,8945	25,1601	25,7734	26,0589	16
		1,5753	2,1430	2,5895	2,6296	2,7859	2,8597	2,9665	25,7268	26,3655	26,7120	17
		1,5869	2,1817	2,6457	2,6865	2,8483	2,9283	3,0422	26,3469	27,0470	27,3612	18
		1,5954	2,2164	2,6981	2,7429	2,9096	2,9890	3,1051	26,9014	27,5993	27,9384	19
		1,5995	2,2486	2,7474	2,7933	2,9668	3,0496	3,1712	27,4266	28,1585	28,5408	20
			2,2759	2,7938	2,8393	3,0193	3,1044	3,2165	27,9707	28,6984	29,0544	21
			2,3012	2,8367	2,8868	3,0699	3,1577	3,2985	28,4186	29,2065	29,5890	22
			2,3242	2,8780	2,9252	3,1173	3,2083	3,3414	28,8829	29,6768	30,0606	23
			2,3425	2,9146	2,9660	3,1623	3,2562	3,3923	29,2901	30,1416	30,5310	24
			2,3594	2,9506	3,0034	3,2054	3,3022	3,4404	29,7240	30,5322	30,9630	25
			2,3732	2,9812	3,0369	3,2447	3,3427	3,4856	30,0807	30,9492	31,3788	26
			2,3825	3,0128	3,0679	3,2809	3,3836	3,5312	30,4648	31,3470	31,7778	27
			2,3923	3,0397	3,0965	3,3162	3,4223	3,5712	30,7646	31,6998	32,1384	28
			2,3965	3,0647	3,1238	3,3495	3,4558	3,6127	31,1339	32,0446	32,5134	29
			2,3996	3,0877	3,1487	3,3803	3,4892	3,6475	31,4018	32,4152	32,8296	30
				3,1085	3,1690	3,4077	3,5211	3,6828	31,6902	32,6699	33,1440	31
				3,1265	3,1912	3,4343	3,5491	3,7168	31,9398	32,9434	33,4458	32
				3,1437	3,2098	3,4572	3,5784	3,7472	32,1813	33,2284	33,7326	33
				3,1575	3,2246	3,4806	3,6009	3,7755	32,4341	33,4607	33,9738	34
				3,1695	3,2382	3,5019	3,6229	3,8032	32,6049	33,7116	34,2330	35
				3,1783	3,2507	3,5175	3,6468	3,8282	32,8227	33,9048	34,4538	36
				3,1885	3,2601	3,5352	3,6633	3,8514	32,9693	34,1061	34,6548	37
				3,1930	3,2680	3,5488	3,6825	3,8729	33,1441	34,3067	34,8666	38
				3,1984	3,2734	3,5640	3,6985	3,8917	33,2855	34,4474	35,0226	39
				3,1995	3,2779	3,5721	3,7108	3,9110	33,3957	34,6297	35,1996	40
					3,2795	3,5823	3,7246	3,9268	33,5197	34,7455	35,3424	41
						3,5890	3,7335	3,9423	33,6035	34,8399	35,4816	42
						3,5937	3,7431	3,9538	33,6877	34,9859	35,5794	43
						3,5983	3,7499	3,9657	33,7477	35,0487	35,6952	44
						3,5994	3,7529	3,9754	33,7865	35,1356	35,7780	45
							3,7601	3,9856	33,8317	35,1886	35,8692	46
							3,7590	3,9902	33,8309	35,2287	35,9118	47
								3,9934		35,2656	35,9406	48
								3,9992		35,2774	35,9928	49
								3,9996			35,9964	50
3,0787	6,2830	25,1327	56,5484	100,5308	105,6205	127,2345	138,7958	157,080	1249,1628	1357,7935	1413,720	Summe der Streifen
3,0787	6,2832	25,1328	56,5488	100,5312	105,6206	127,2348	138,7959	157,080	1249,1630	1357,7367	1413,720	$\pi \cdot r^2$ 2 $\pi = 3,1416$







Tabelle V: Flüssigkeitsverteilung in cm<sup>3</sup> in untergestellten quadratischen Kästen von 10 cm

Druck:

						0,5	1,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5
				0,5	3,5	8	10	8	6	2	1	1	1	1	0,5	1,5	2	9,5
			10	30	61	85	108	132	160	108	48	24	19	25	61	115	150	
0,5	3	13	50	84	133	176	222	301	405	500	572	628	674	642	604	506	428	
0,5	1	8	11	19	24	37	24	18	14	10	24	46	43	42	47	134	234	
	1	4	8	14	1	4	4	3	3	1	5	6	5	7	8	13	29	
		3	2	0,5	0,5	1	2	2	2	1	3	4	4	3	3	4	3	
						0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	2,5	3	1,5
							0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

1	5	28	81	148	223	312	373	467	593	624	655	711	748	722	728	778	858
---	---	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

						0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	2	1,5
			0,5	3	8	10	9	7	2	1	1	1	0,5	2	2	8	10	10	
		10	30	58	86	119	130	159	110	50	25	21	30	72	123	155	193	141	
0,5	2	12	3	63	120	173	211	291	405	505	530	583	614	651	621	525	474	430	356
	1	7	23	20	24	32	23	17	12	10	17	40	40	34	27	42	60	101	248
		4	8	14	1	4	4	4	4	1	6	6	5	6,5	5	6	8	13	20,5
		3		0,5		1	2	2	2	1	3	4	4	3	3	3	2	2,5	3
					0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2,5	3
									0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		1

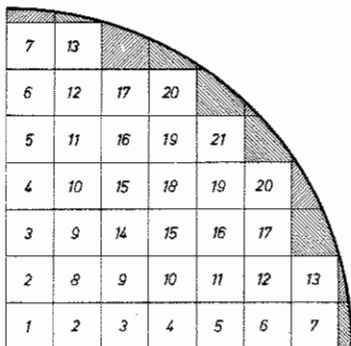
0,5	3	26	44	128	206	305	371	455	591	631	609	661	687	727	733	705	711	754	784
-----	---	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----







$$V = 100 \frac{h}{r} (r - z)$$



Säule	z
1	7.65193
2	16.07775
3	25.65930
4	35.47273
5	45.37110
6	55.2984
7	65.26763
8	75.2857
9	85.3542
10	95.4766
11	105.65757
12	115.893
13	126.1837
14	136.5289
15	146.9249
16	157.3710
17	167.8679
18	178.4134
19	188.9964
20	199.6230
21	210.29897

Tabelle VI:

Werte der Zahl z zur Errechnung der einzelnen Säulen mit quadratischer Grundfläche von der Kantenlänge 10 eines in derartige Säulen aufgeteilten Vollkegels mit der Höhe h und dem Grundkreisradius r (für r = 0 bis 75).









