DK 681.4.024:666.224

Die exakte Berechnung von Linsenkörpern für Planflächen.

Von HANS JENSEN, Hamburg.

(Eingegangen am 20. Januar 1953.)

Für die exakte Berechnung von Linsenanordnungen auf Planplatten wird ein Nomogramm und eine Tabelle angegeben. Im Anschluß daran wird der Ausnutzungsgrad von ring- und zeilenweisen Linsenanordnungen ermittelt und verglichen. Ergebnis: Lassen sich auf einem Plankörper weniger als 200 Linsen unterbringen, so ist eine kreisförmige Anordnung der Linsen zweckmäßig. Eine zeilenweise Anordnung wird bei mehr als 200 Linsen eine nennenswert bessere Ausnutzung des Körpers ermöglichen.

Aufgabenstellung.

Die Linsenanzahl, die sich auf einer ebenen Ankittschale unterbringen läßt, kann durch ein Nomogramm, das nach Näherungsformeln aufgestellt ist, bequem mit oft ausreichender Genauigkeit berechnet werden. Sobald man aber Anzahl und Anordnung der Linsen genau wissen will, versagt diese Methode. Die Formeln für die exakte Berechnung sind leicht aufzustellen. Mit der Ausdrucksweise halten wir uns nahe an den Aufsatz von KLEIN[1]) über sphärische Linsenkörper.

Sehr oft wird man wohl die Anordnung der Linsen ausprobieren. Aber man kommt bestimmt schneller zum Ziel, wenn man rechnet. Natürlich muß man den Rechengang günstig gestalten. Dann wird sicherlich der Arbeitsvorbereiter die Rechnung dem Probieren vorziehen. Dabei erhält man einen Überblick über alle Möglichkeiten, den man durch Probieren wohl kaum erreichen kann.

Auch bei Beschränkung auf den Rechenschieber ist die Berechnung immer etwas unbequem, da der Sinus im Nenner steht. In einem Vordruck kann man bereits die fertigen Zahlenwerte für sin 180°/n angeben und die Rechnung so weit schematisieren, daß man nicht jedesmal neu überlegen muß. Aber nicht immer lohnt für diesen Zweck ein eigener Vordruck, ganz abgesehen von der Mühe, die seine Aufstellung bereitet. So war es meine Absicht, diese exakte Rechnung ebenso wie die angenäherte Anzahlbestimmung durch ein Nomogramm zu erledigen. Dabei treten im Grunde genommen nur sehr wenig Anordnungen wirklich auf, und es könnte einfacher sein, nur die zweckmäßigen Linsenanordnungen in einer Tabelle zusammenzustellen. Wir werden sehen, daß jede der beiden Möglichkeiten ihre Vor- und Nachteile hat.

Formelableitung.

Wir setzen voraus, daß wir die Linsen oder runden Glasstücke in konzentrischen Ringen um den Mittelpunkt der Aufkittschale anordnen. Wenn n Linsen vom Durchmesser $\varnothing$ mit einem kleinsten Abstand k zwischen zwei benachbarten Linsen einen Ring bilden, so entfällt auf jede Linse einschließlich zweier halber Zwischenräume ein Zentriwinkel von $\varphi = 360°/n$. Bedeutet a_n den „Polabstand“[2]) der Linsenmitten vom Mittelpunkt der Aufkittschale (Bild 1), so gilt

$$\sin\frac{\varphi}{2} = \frac{D}{2 \cdot a_n} \text{ mit } D = \varnothing + k\,. \tag{1}$$

[1]) KLEIN, FRANZ: Berechnung der Linsenanordnung für Formschalen der Rundoptik. Glastechn. Ber. **19** (1941) S. 86—89.

[2]) Das Wort „Polabstand“ ist in diesem Zusammenhang nur durch die Analogie zu gekrümmten Linsenkörpern verständlich. Es wird hier der Übereinstimmung wegen beibehalten.

Somit wird der gesuchte Polabstand

$$a_n = \frac{D}{2 \cdot \sin\frac{180°}{n}}\,. \tag{2}$$

Von wirklichem Interesse ist aber der „Füllungsdurchmesser“

$$F_n = 2a_n + D. \tag{3}$$

Genau genommen müßte es $2a_n + \varnothing$ heißen. Es ist aber zweckmäßig, den Mindestabstand k zwischen den Linsen zugleich als Mindestwert für den Schutz

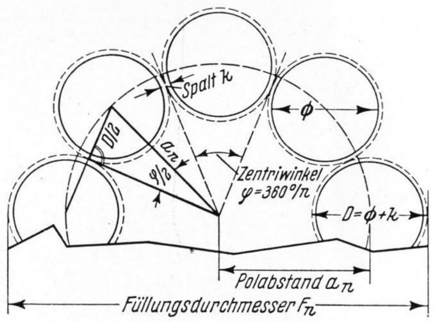


Bild 1. Ring aus n-Linsen. Zur Definition der Abkürzungen.

der äußersten Linsenkante zwangsweise in die Rechnung hineinzunehmen — zumal sich auf diese Weise die Formel nomographisch günstig darstellen läßt.

Haben wir auf der Planscheibe einen Linsenring vorliegen, so heißt die Aufgabe, einen Ring möglichst eng um den ersten herumzulegen. Zweckmäßig rechnet man vorweg für alle Linsenanzahlen im Ring, also $n = 1, 2, 3, \cdots$ die Füllungsdurchmesser $F_1, F_2, \cdots$ aus. Man geht in dieser Reihe so weit, bis man den verwertbaren Durchmesser der Aufkittschale erreicht. Vom Außenrand eines Ringes bis zum Außenrand des nächsten Ringes muß sich der Füllungsdurchmesser um mindestens 2 D erhöhen. Hat also der gedachte Y-te Ring den Füllungsdurchmesser F_Y (die Ringnummer $Y = \mathrm{I, II, III}, \cdots$ gesetzt), so muß für den nächsten Ring $F_{Y+1} \geqq F_Y + 2\,D$ sein. Mit dieser Voraussetzung sucht man aus den vorweg errechneten Füllungsdurchmessern $F_1, F_2, \ldots$ einen passenden Ring heraus.

Berechnung mit Nomogramm.

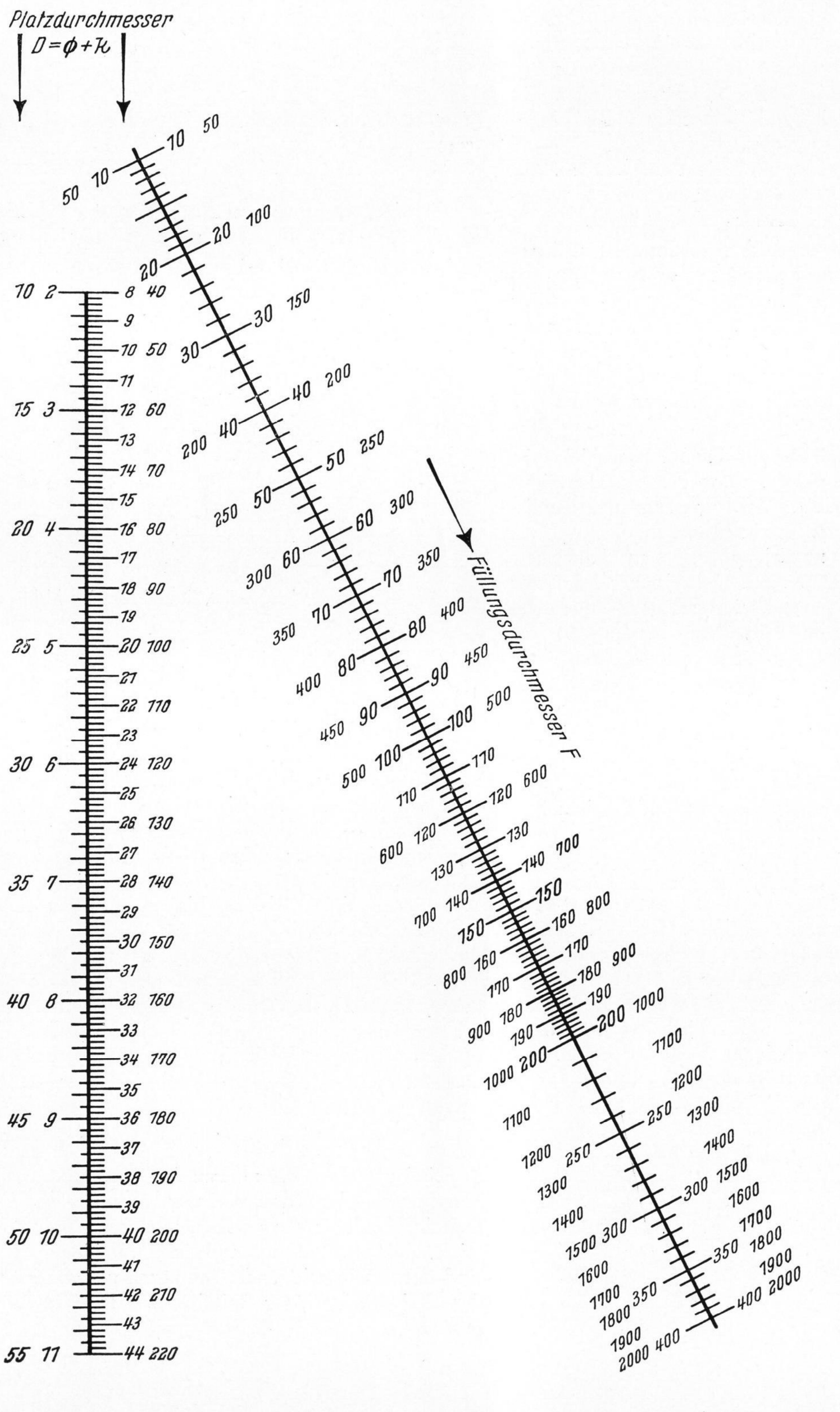
Die Formel (3) kann durch das Nomogramm (Bild 2) berechnet werden. In dem Nomogramm sind alle Skalen mehrfach beziffert, um so einen größeren Bereich mit ausreichendem Maßstab unterzubringen. Bei jeder Rechnung sind stets analog liegende Teilungen und Bezifferungen der drei Skalenträger miteinander in Beziehung zu setzen.

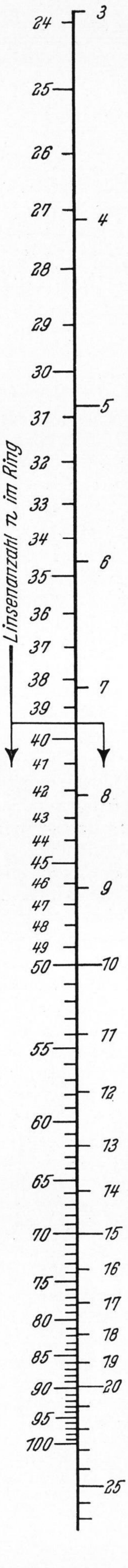
Bild 2. Nomogramm zur exakten Berechnung von Linsenkörpern für Planflächenbearbeitung.
Bezeichnungen:

$\varnothing$ = Linsen-Rohdurchmesser
k = Mindest-Zwischenraum zwischen je 2 Linsen
D = $\varnothing$ + k = Platzdurchmesser
$\lambda = \sin \frac{180}{n}$ als Abkürzung

Formel: Füllungsdurchmesser für einen äußersten Ring mit n-Linsen $F_n = \frac{1+\lambda}{\lambda} D$

Benutze bei einer Rechnung nur gleichsinnig zum Träger liegende Bezifferungen.
Maßeinheit beliebig, vorzugsweise mm.





Die rechts vom Träger stehenden Teilungen sind nach folgenden Skalengleichungen geteilt:

$$x_1 = 0 \qquad y_1 = -5\,D \quad \text{bzw.} -D$$

$$x_2 = 150 \qquad y_2 = \frac{800\,\lambda}{1+\lambda} - 300$$

$$x_3 = -y_3/2 \qquad y_3 = -5 \cdot \frac{300\,F}{800+F} \ \text{bzw.} - \frac{300\,F}{800+F}$$

Für die links vom Träger stehenden Teilungen gelten die Gleichungen:

$$y_1 = -20\,D \ \text{bzw.} -4\,D$$

$$y_2 = \frac{3200\,\lambda}{1+\lambda} - 300$$

x_1, x_2, x_3 und y_3 wie oben
Koordinaten-Nullpunkt entspricht den Werten $D = 0$ und $F = 0$

Beispiel: Für Linsen mit 12 ⌀ in 0,5 mm engstem Abstand ist $D = 12{,}5$. Zehn Stück bilden einen Ring mit dem Füllungsdurchmesser $F_{10} = 53{,}0$ mm. Der nächste Ring des Körpers muß um 25 mm größer sein, also mindestens 78 mm Durchmesser haben. Für die Stückzahlen 16 und 17 werden die Füllungsdurchmesser 76,7 und 80,4. Man kann also um den Ring mit zehn Linsen entweder einen Ring mit 17 Linsen herumlegen und hat dann den Zwischenraum von Ring zu Ring um 2 mm vergrößert. Man kann aber auch den Ring mit 16 Linsen herumlegen, indem dessen Durchmesser einige Zehntel mm vergrößert wird. Dabei wird der Abstand zwischen den Linsen im Ring nur unwesentlich geändert. Wird der Füllungsdurchmesser um dF vergrößert, erweitert sich der Zwischenraum zwischen den Linsen des Ringes um

$$dk = \frac{\pi}{n}\, dF\,. \tag{4}$$

In unserem Falle wäre also $dk = \frac{3{,}14}{16} \cdot 1{,}3 = 0{,}25$ mm.

Man kann grundsätzlich auf zwei Wegen zum Ziele kommen. Entweder beginnt man mit einer vorgegebenen Mittenanordnung aus $n = 1 \ldots 5$ Linsen und baut laufend Ringe herum, bis die Platte ausreichend groß geworden ist.

Hat man aber eine Platte bestimmter Größe vorliegen, so kann es zweckmäßig sein, mit dem Aufbau von außen her zu beginnen. Man bestimmt zuerst den größten Ring, der sich auf der Platte unterbringen läßt, und baut dann laufend passende Ringe hinein.

Allein durch die Wahlmöglichkeit zwischen einem zu großen oder einem zu kleinen Ring können Unterschiede im Aufbau der Körper auftreten. Diese Unterschiede sind aber so gut wie bedeutungslos, da man in der Regel bereits bei dem nächsten Ring wieder den gleichen Aufbau erreicht.

Berechnung mit Tabelle.

Baut man nach dem oben skizzierten Verfahren alle denkbaren Linsenkörper zusammen, indem man um die fünf möglichen Mittenanordnungen $n = 1 \ldots 5$ Ring um Ring möglichst eng herumlegt, so erhält man die Füllungsdurchmesser und die Linsenanzahlen der Tabelle 1. Leider muß man dabei irgendein Maß normieren. Für Tabelle 1 ist $D = ⌀ + k$ als Einheit gewählt. Die Tabelle enthält die Linsenanzahl n der einzelnen Ringe, die Linsenanzahl A des ganzen Körpers und den Füllungsdurchmesser F der Planscheibe. Die Benutzung wird durch das Beispiel sofort klar.

Beispiel: Wir setzen, wie oben, Linsen von 12 ⌀ mit 0,5 mm Zwischenraum voraus. Es ist also $D = 12{,}5$ mm. Der Durchmesser der Aufkittschale sei 265 mm = 21,20 D. Diesem Wert 21,20 am nächsten kommt der Füllungsdurchmesser $F = 21{,}08$. Die Aufkittschale läßt sich also bis zum Füllungsdurchmesser 21,08 D = 264 mm füllen. Der Körper enthält im ganzen 335 Linsen. Die einzelnen Ringe enthalten von außen nach innen aufgezählt 63 + 56 + 50 + 43 + 37 + 30 + 24 + 17 + 11 + 4 Linsen. In der Werkstatt wird man den 3., 5. und 7. Ring etwa um 0,06 D weiter nach außen rücken, damit der Abstand zum voraufgehenden und zum folgenden Ring gleichmäßig wird.

In der Tabelle sind in allen Fällen die kleinstmöglichen Ringgrößen angegeben, da diese von Bedeutung sind, wenn der betreffende Ring den Rand des Körpers bildet. Diese Rechnung erfordert keine 5 Minuten. Wieviel Zeit würde aber für eine experimentelle Probe im Betrieb gebraucht werden, allein um die Schalen aus dem Lager zu holen und Glasstücke passenden Durchmessers zusammenzusuchen?

Die Ausnutzung der Körper.

Wie aus den Beispielen ersichtlich ist, muß man den Abstand zwischen benachbarten Ringen oder zwischen den Linsen innerhalb eines Ringes häufig etwas vergrößern. Man nutzt also die Fläche der Platte nicht vollständig aus. Eine reihenweise Anordnung der Linsen in Art von Bild 3 läßt eine vollständigere Ausnutzung der Körperfläche erwarten. Aber auch hier treten große unbenutzte Flächen auf, und zwar am Körperrand, weil manches Mal ein Restplatz nur wenig kleiner ist als eine Linse. Handelt es sich um große Linsen, so sind die zu bearbeitenden Flächen am Rand des Körpers recht ungleichmäßig verteilt, so daß die optische Flächenpasse leicht ungleichmäßig wird. Sind aber die Linsen im Verhältnis zur Körperfläche klein, so verliert dieser Grund seine Bedeutung, und man kann eine engste Packung in zeilenweiser Anordnung der Linsen verwenden.

Um die Bedeutung der unbesetzten Flächenteile klar zu erkennen, wollen wir die Ausnutzung der Körperfläche untersuchen. Zahlenmäßige Rechnungen setzen jedoch ein bestimmtes Verhältnis von Zwischenraum k zu Linsendurchmesser ⌀ voraus. Wir wählen $⌀ = 0{,}96$, $k = 0{,}04$. Dem entspricht z. B. bei Linsen

Tabelle 1. Linsenkörper für Planflächenbearbeitung.

F = ausgenutzter oder „Füllungsdurchmesser"

Maßeinheit für den Füllungsdurchmesser F ist der Wert $D = ⌀ + k$, also die Summe von Glasdurchmesser und Zwischenraum zwischen je zwei Gläsern.

n = Linsenanzahlen in den einzelnen Ringen

A = Linsenanzahl bis zu den einzelnen Ringen bei Mittenanordnungen mit 1, 2, 3, 4 und 5 Linsen.

Ring-Nr.	F	n und A	F	n und A	F	n und A	F	n und A	F	n und A
I	1,00	1/1	2,00	2/2	2,16	3/3	2,42	4/4	2,70	5/5
II	3,00	6/7	4,00	9/11	4,24	10/13	4,54	11/15	4,86	12/17
III	5,18	13/20	6,12	16/27	6,24	16/29	6,54	17/32	6,86	18/35
IV	7,18	19/39	8,12	22/49	8,36	23/52	8,66	24/56	8,96	25/60
V	9,30	26/65	10,22	29/78	10,36	29/81	10,66	30/86	10,96	31/91
VI	11,30	32/97	12,22	35/113	12,48	36/117	12,80	37/123	13,10	38/129
VII	13,42	39/136	14,36	42/155	14,48	42/159	14,80	43/166	15,10	44/173
VIII	15,42	45/181	16,36	48/203	16,62	49/208	16,92	50/216	17,24	51/224
IX	17,56	52/233	18,50	55/258	18,62	55/263	18,92	56/272	19,24	57/281
X	19,56	58/291	20,50	61/319	20,74	62/325	21,08	63/335	21,40	64/345
XI	21,68	65/356	22,66	68/387	22,74	68/393	23,08	69/404	23,40	70/415
XII	23,68	71/427	24,66	74/461	24,88	75/468	25,16	76/480	25,48	77/492

von 25 mm Durchmesser ein Zwischenraum von 1 mm. Es ist also eine vernünftige Zahlenannahme.

Als Ausnutzungsgrad wollen wir das Verhältnis der von Linsen besetzten Körperfläche zur optimal belegbaren Körperfläche verstehen. Optimale Belegung oder engste Packung der Linsen setzt voraus, daß die Linsen zeilenweise nach Bild 3 angeordnet werden. Das Innere der Körperfläche ist so vollständig belegt, wie es nur möglich ist und soll durch den Ausnutzungsgrad 1 gekennzeichnet sein. Wegen freier Stellen am Plattenrand ist vollständige Ausnutzung nur für unendlich große Platten oder für unendlich kleine Linsen erreichbar. Unter diesen extremen Umständen ist das Verhältnis zwischen belegter und gesamter Fläche nach Bild 3 gegeben durch das Verhältnis von drei Linsensechsteln zur eingezeichneten Dreiecksfläche oder durch das Verhältnis der Flächeninhalte eines regelmäßigen Sechseckes zum einbeschriebenen Kreis. Als Fläche der Linse wollen wir die für jede Linse vorgeschriebene Fläche vom Durchmesser D einsetzen. Die Dreiecksseite ist D, ihre Höhe $D \cdot \sqrt{3}/2$. Somit ist der beanspruchte Flächenbruchteil gegeben durch

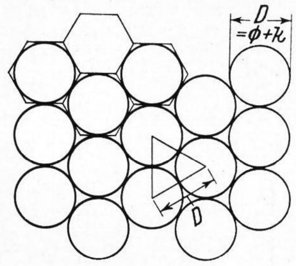


Bild 3. Zeilenweise Anordnung der Linsen auf der Platte.

$$\frac{\varnothing^2 \cdot \pi}{2 \cdot D^2 \cdot \sqrt{3}}. \qquad (5)$$

Mit den angegebenen Daten für $\varnothing$ und k erhält diese Größe den Wert 0,835. Als Ausnutzungsgrad eines Plankörpers durch runde Linsen definieren wir also das Verhältnis des belegten Platzes $A \cdot \pi \cdot \varnothing^2/4$ zum 0,835fachen der Plattenfläche. Bedeutet P den Plattendurchmesser A., so wird der Ausnutzungsgrad

$$\eta = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot D^2 \cdot A}{\pi \cdot P^2} = 1{,}103\,\frac{A}{P^2}. \qquad (6)$$

Für $\eta = 1{,}0$ würden die Linsen so dicht gepackt sein, daß die Plattenfläche im Sinne des Bildes 3 vollständig ausgenutzt ist.

Wir berechnen den Ausnutzungsgrad für die besonders günstigen Fälle, in denen P gerade gleich den in Tabelle 1 angegebenen Füllungsdurchmessern ist. Unter diesen Umständen sind die äußersten Linsenteile um k/2 vom Körperrand entfernt. Außerdem interessiert uns der ungünstigste Fall, bei dem die Plattenfläche gerade eben zu klein ist, um den nächsthöheren Füllungsdurchmesser aufnehmen zu können: $P = F - k/2$. Hält man grundsätzlich einen breiteren Schutzrand als k/2 für notwendig, so interessiert diese Verbreiterung uns hier nicht, da sie in allen Fällen einheitlich zugeschlagen werden muß und ihre Ausnutzung offensichtlich stets unzulässig ist.

Beispiel: Als günstiger Fall sei $P = 6{,}24$ mit $A = 29$ Linsen gewählt. Hierfür wird $\eta = 1{,}103 \times 29/6{,}24^2 = 0{,}827$. Für die gleiche Linsenzahl tritt der ungünstigste Fall ein, wenn $P = 6{,}50$ ist. Dann wird $\eta = 1{,}103 \times 29/6{,}50^2 = 0{,}760$. In diesem Beispiel ist der Unterschied der beiden Ausnutzungsgrade nicht sehr groß. Es gibt Fälle, in denen der Unterschied wesentlich größer ist.

Für alle in der Tabelle 1 enthaltenen Werte ist der Ausnutzungsgrad berechnet und in Bild 4 als Funktion des Plattendurchmessers P in den ausgezogenen Kurven dargestellt. Der eine ausgezogene Streckenzug faßt die ungünstigen Werte, der andere die günstigen Fälle zusammen. Man erkennt, daß mit wachsendem Plattendurchmesser der Ausnutzungsgrad zunächst ansteigt, aber einem Maximalwert von etwa 0,83 zustrebt. Er wird diesen Wert auch bei großem P kaum übersteigen können, da ja immer wieder Lücken gleicher Art auftreten müssen. Auffällige Schwankungen sind nur für bestimmte besonders ungünstige Fälle im unteren Streckenzug festzustellen. Diese treten stets bei der Anordnung einer zentralen Einzellinse ein, weil beim Übergang von der Mittenanordnung mit einer Linse zu einer solchen mit zwei Linsen die Platte erheblich vergrößert werden muß. Um so günstiger liegt dann der jeweils folgende Punkt des unteren Kurvenzuges, weil beim Übergang von der Mittenanordnung mit zwei Linsen zur Mittenanordnung mit drei Linsen nur eine unwesentliche Zunahme des Füllungsdurchmessers eintritt. Liegt der Plattendurchmesser nur wenig oberhalb

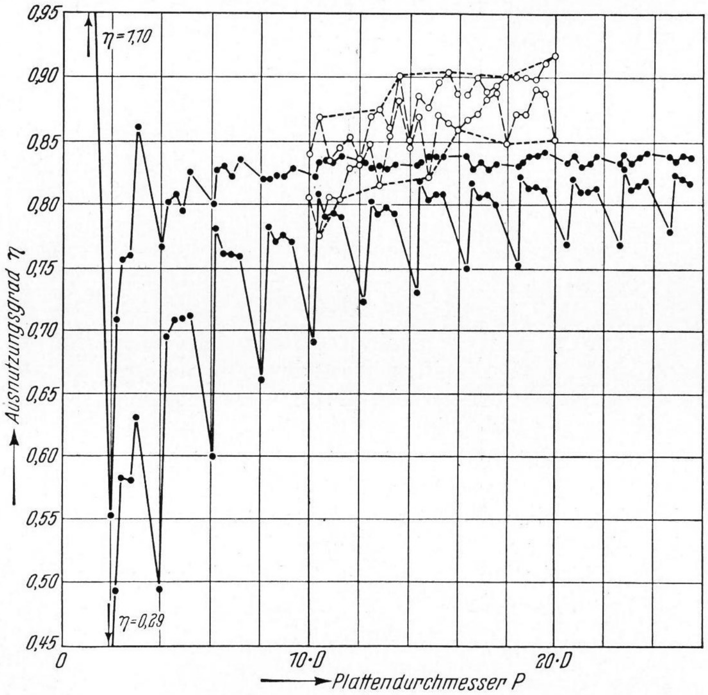


Bild 4. Der Ausnutzungsgrad der Körper als Funktion des Plattendurchmessers.

- • Günstigste und ungünstigste Fälle bei Ringanordnungen
- o Zufällig ausgewählte Fälle bei zeilenweiser Anordnung runder Linsen auf Plankörpern

D = Linsenrohdurchmesser + Zwischenraum = $0{,}96 \cdot D + 0{,}04 \cdot D$

eines tabulierten Füllungsdurchmessers (obere ausgezogene Kurve), so ist kaum eine der möglichen Mittenanordnungen im Ausnutzungsgrad bevorzugt.

Die Überlegungen wären unvollständig, wollte man nicht auch die tatsächliche Ausnutzung von zeilenweise angeordneten Linsen in engster Packung mit dem bisherigen Ergebnis vergleichen. Hierzu wurden versuchsweise Linsenanordnungen aufgezeichnet. Nach Überdecken mit einem durchsichtigen Papier, auf dem der Plattendurchmesser aufgezeichnet war, wurde die Anzahl der darauf passenden Linsen ausgezählt. Zwei Anordnungen wurden behandelt: Im ersten Fall lag der Mittelpunkt einer Linse im Mittelpunkt des Körpers (Einer-Zentrum), beim anderen Typus lag der Körpermittelpunkt auf einer Berührungsstelle zweier Kreise (Zweier-Zentrum). Das Ergebnis des tatsächlichen Ausnutzungsgrades bei zeilenweiser Packung ist in Bild 4 mit gestrichelten Kurvenzügen eingetragen. Der eine gestrichelte Linienzug verbindet jeweils die höchsten Ausnutzungsgrade miteinander, während der andere die Punkte niedrigsten Ausnutzungsgrades zusammenfaßt, unabhängig davon, ob der betreffende Punkt aus einer Anordnung mit Einer- oder Zweier-Zentrum gewonnen war. Ein prinzipieller Vorteil ist bei keiner der beiden Typen deutlich, wenn auch dem Zweier-Zentrum eine kleine Andeutung besseren Ausnutzungsgrades nicht ganz abzusprechen ist. Die obere Kurve enthält nämlich 19 Werte für Zweier-Zentrum und nur 7 Werte für Einer-Zentrum. Theoretisch ist dabei ein solcher Vorteil der einen oder anderen Anordnung kaum plausibel und man wird diese Bevorzugung wohl als ein Zufallsergebnis ansprechen dürfen. Es erscheint ein müßiges Unterfangen, diesem Effekt durch Häufung des Zahlenmaterials nachzuspüren.

Mit wachsender Plattengröße (unter der Fiktion stets gleichen Linsendurchmessers $\varnothing = 0{,}96$ und gleichen Zwischenraumes $k = 0{,}04$) steigt der Ausnutzungsgrad ständig an. Da die Fehlstellen am Rand eine immer kleinere Rolle spielen, je größer P/D wird, strebt der Ausnutzungsgrad für $P/D \to \infty$ gegen 1. Bei kleinen P/D-Werten (d. h. praktisch gesprochen: bei großen Linsen) ist die Ausnutzung bei zeilenweiser Packung nicht günstiger als bei kreisförmiger Packung.

In Bild 5 ist die Linsenzahl als Funktion des Plattendurchmessers P aufgetragen. Um eine deutliche Darstellung zu erhalten, sind zwei verschiedene Ordinatenmaßstäbe benutzt. Die Differenzen der Linsenzahlen bei den verschiedenen Anordnungen sind relativ gering. In dem Maßstab, der bei dieser Figur möglich war, wird man die Differenzen nur mit Mühe feststellen können.

Aus Bild 4 und 5 folgt das eindeutige Ergebnis, daß bis P = 12 D keine von beiden Anordnungen vorteilhafter ist als die andere. Der Plattengröße P = 12 D entspricht eine Linsenzahl von etwa 100 Stück. Oberhalb P = 15 D, d. h. bei mehr als 170 Linsen im Körper, ist die zeilenweise Anordnung eindeutig überlegen. Im Mittel erhalten wir für P = 15 D bis 20 D bei ringförmiger bzw. zeilenweiser Packung die Ausnutzungsgrade 0,82 bzw. 0,88. Die zeilenweise Packung bringt also hierbei etwa 7% mehr Linsen auf dem Körper unter. Das heißt natürlich noch nicht, daß die Produktion den gleichen Mehrertrag einbringt, denn die Schleif- und Poliergeschwindigkeit verlängert sich ja bei der größeren Angriffsfläche, und die Nebenarbeiten wie Aufkitten, Putzen usw. bleiben proportional zur Linsenanzahl. Im Gebiet zwischen P = 12 D und P = 15 D ist die zeilenweise Anordnung im allgemeinen, aber nicht unbedingt in jedem Fall, günstiger. Steigt P über 20 D, so wird der Vorteil der zeilenweisen Packung immer größer, da ihr Ausnutzungsgrad ständig weiterhin ansteigt, während der Ausnutzungsgrad bei kreisförmiger Packung einen Wert zwischen 0,82 und 0,84 zu behalten scheint. Ein solcher Körper enthält mindestens 200 Linsen, die in mindestens acht Ringen angeordnet werden müssen, also höchstens einen Durchmesser P/16 haben können. Die Linsen sind also schon nicht mehr ausgesprochen groß. Bei Körpern von 300 mm Durchmesser z. B. müßten sie schon unter 20 mm liegen. Wenn man dann außerdem besonders große freie Stellen am Rand durch geringe Verschiebung benachbarter Linsen etwas verteilt, so ist von den Unregelmäßigkeiten der Linsenverteilung kaum noch eine nennenswerte Verschlechterung der Flächenpasse zu befürchten.

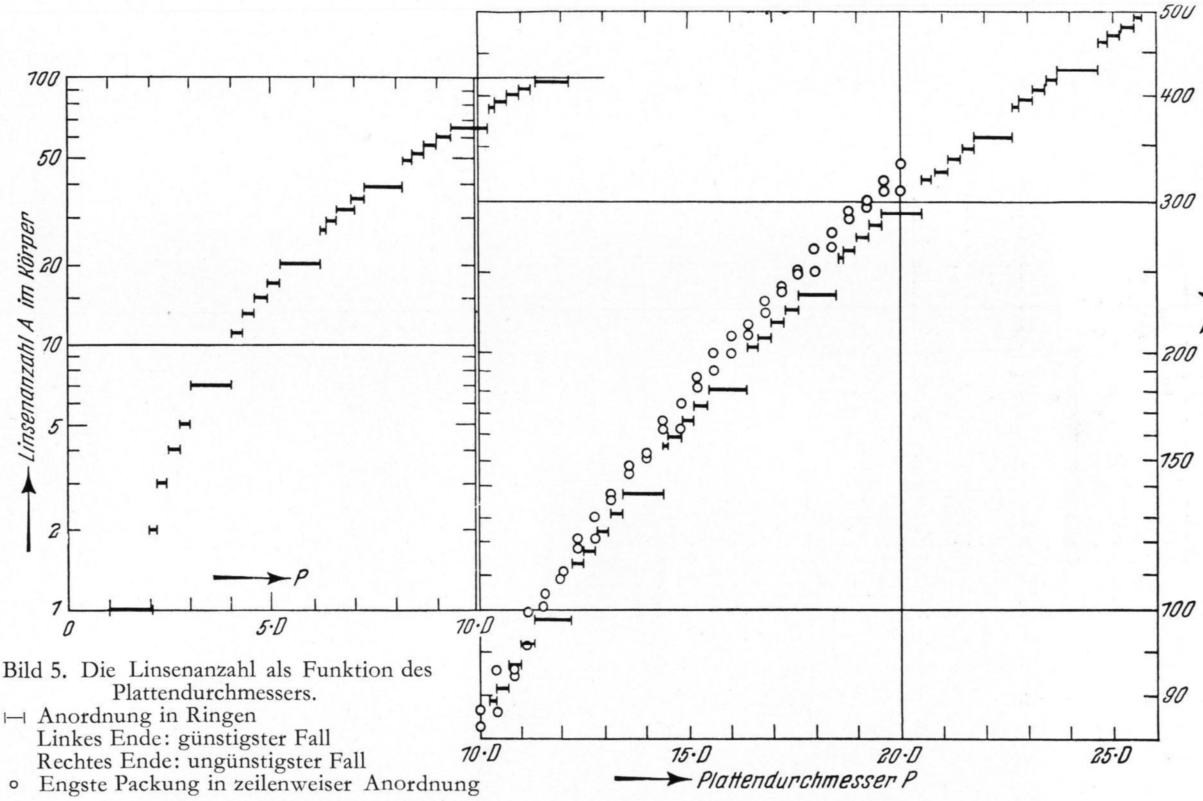


Bild 5. Die Linsenanzahl als Funktion des Plattendurchmessers.
⊢⊣ Anordnung in Ringen
Linkes Ende: günstigster Fall
Rechtes Ende: ungünstigster Fall
o Engste Packung in zeilenweiser Anordnung