

**Zeitschrift:** Commentarii Mathematici Helvetici  
**Herausgeber:** Schweizerische Mathematische Gesellschaft  
**Band:** 23 (1949)

**Artikel:** Über die dichteste Kreislagerung und dünnste Kreisüberdeckung.  
**Autor:** Tóth, László Fejes  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-19769>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Über dichteste Kreislagerung und dünnste Kreisüberdeckung

Von LÁSZLÓ FEJES TÓTH, Budapest

Es bezeichne  $a(r)$  die Maximalzahl der Kreise vom Halbmesser  $r$ , die in ein vorgegebenes konvexes Gebiet  $T$  (ohne einander zu überdecken) eingelagert werden können,  $A(r)$  die Mindestzahl der Kreise vom Halbmesser  $r$ , die  $T$  überdecken. Bekanntlich gelten für die Lagerungsdichte<sup>1)</sup>  $d(r) = \pi r^2 a(r)/T$  bzw. Überdeckungsdichte  $D(r) = \pi r^2 A(r)/T$  die Relationen<sup>2)</sup>

$$\lim_{r \rightarrow 0} d(r) = \sqrt{3} \pi / 6 = 0 \cdot 906 \dots \quad (1)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} D(r) = 2 \sqrt{3} \pi / 9 = 1 \cdot 209 \dots \quad (2)$$

Die Gleichheit (1) wurde im Jahre 1892 von *A. Thue*, die Gleichheit (2) im Jahre 1939 von *R. Kershner* bewiesen. Neulich wurden durch mehrere Autoren verschiedenartige Vereinfachungen der Beweise sowie mannigfaltige Verschärfungen und Verallgemeinerungen erzielt.

Wir beweisen hier folgende zwei einander dual gegenüberstehende Sätze:

*Sind in einem konvexen Gebiet  $T$  wenigstens zwei kongruente Kreise eingelagert, so ist ihre Inhalts-*

$$s < \frac{\sqrt{3} \pi}{6} T. \quad (1 a)$$

*Wird ein konvexes Gebiet  $T$  von wenigstens zwei kongruenten Kreisen bedeckt, so ist ihre Inhalts-*

$$S > \frac{2 \sqrt{3} \pi}{9} T. \quad (2 a)$$

<sup>1)</sup> Im folgenden bezeichnen wir ein Gebiet und seinen Flächeninhalt mit demselben Symbol. Sind  $u$  und  $v$  zwei Gebiete, so soll  $uv$  als Größe den Flächeninhalt des Durchschnittes  $uv$  bedeuten.

<sup>2)</sup> Die Gleichheiten (1) und (2) gelten natürlich unter viel allgemeineren Voraussetzungen bezüglich des Gebietes  $T$ . Siehe z. B. das in unserem Schriftenverzeichnis zitierte Übersichtsreferat: *H. Hadwiger* [3]. — Es sei hier noch bemerkt, daß sowohl bei der dichtesten ebenen Kreislagerung als auch bei der dünnsten Bedeckung der Ebene durch Kreise die Kreismittelpunkte ein gleichseitiges Dreiecksgitter bilden, dieweil die räumlichen Analoga der beiden entsprechenden Extremalaufgaben zu verschiedenartigen Punktanordnungen führen.

Aus diesen Sätzen folgt als

**Korollarium.** Zwischen den Anzahlen  $A$  und  $a$  der kongruenten Kreise, die ein beliebig vorgegebenes konvexes Gebiet überdecken bzw. ins Gebiet eingelagert werden können, besteht die Ungleichung  $A/a > 4/3$ . Es sei denn, daß das Gebiet selbst eine Kreisscheibe ist und  $A = a = 1$  ausfällt.

*Beweis von (1a).* Wir können ohne Beschränkung der Allgemeinheit voraussetzen, daß die Kreise  $k_1, k_2, \dots, k_a$  den Halbmesser 1 besitzen. Der Abstand von je zwei Kreismittelpunkten ist dann  $\geq 2$ . Weiterhin genügt es offenbar, statt  $T$  die kleinste konvexe Hülle  $H$  der Kreise in Betracht zu ziehen.

Wir greifen einen Kreis  $k_i$  heraus und zeichnen die Potenzlinien von  $k_i$  und den übrigen  $a - 1$  Kreisen, fassen von den beiden Halbebenen, die durch je eine Potenzlinie bestimmt werden, diejenige ins Auge, die  $k_i$  enthält, und betrachten den gemeinsamen Teil  $t_i$  dieser Halbebenen und der konvexen Hülle  $H$ . Das Gebiet  $H$  wird von den so konstruierten konvexen Gebieten  $t_1, t_2, \dots, t_a$  schicht und lückenlos bedeckt.

Wir reihen nun die Gebiete  $t_i$  in zwei Gruppen ein je nachdem  $t_i$  erstens nur von gradlinigen Strecken oder zweitens teilweise auch von einem Kreisbogen berandet ist. Wir zeigen, daß im ersten Fall

$$t_i \geq 2\sqrt{3} ,$$

im zweiten

$$t_i \geq 2 + \pi/2 > 2\sqrt{3}$$

ausfällt.

*Fall 1.* Wir betrachten ein konvexes Vieleck, das den Einheitskreis enthält und die Eigenschaft besitzt, daß die Fußpunkte der vom Kreismittelpunkt auf die Seiten gefällten Lote voneinander einen Abstand  $\geq 1$  besitzen. Es handelt sich um eine leicht einzusehende Tatsache, daß unter diesen Vielecken das umbeschriebene reguläre Sechseck den kleinst möglichen Inhalt besitzt<sup>3)</sup>.

*Fall 2.* Wir schreiten von einem gemeinsamen Randpunkt von  $k_i$  und  $H$  ausgehend am Rand von  $t_i$  in den beiden entgegengesetzten Richtungen fort, bis wir auf je einen Eckpunkt  $E_1$  bzw.  $E_2$  stoßen. Die Ungleichung  $t_i \geq 2 + \pi/2$  ergibt sich aus der Tatsache, daß  $t_i$  einen Kappenbereich von  $k_i$  enthält bzw. selbst ein Kappenbereich von  $k_i$  ist, dessen Innenwinkel bei den Eckpunkten  $E_1$  und  $E_2$  nicht stumpf sein können.

---

<sup>3)</sup> Ein Beweis dieser Tatsache befindet sich z. B. in meinem Aufsatz [6].





den von den Kreisen  $k_\lambda, k_\mu, k_\nu$  wenigstens zweifach bedeckten Teil der Ebene,  $\lambda\mu\nu$  ein Indextripel für den  $t_\lambda, t_\mu$  und  $t_\nu$  in einem Eckpunkt von  $N$  zusammenstoßen, und die Summation ist über sämtliche  $\gamma$  Ecken von  $N$  zu erstrecken mit der Vereinbarung, daß bei den etwa  $\varrho$  zu  $R$  gehörigen Eckpunkten der dritte, fehlende Kreis stets durch das zu  $T$  komplementäre Gebiet  $k_0$  der Ebene zu ersetzen ist.

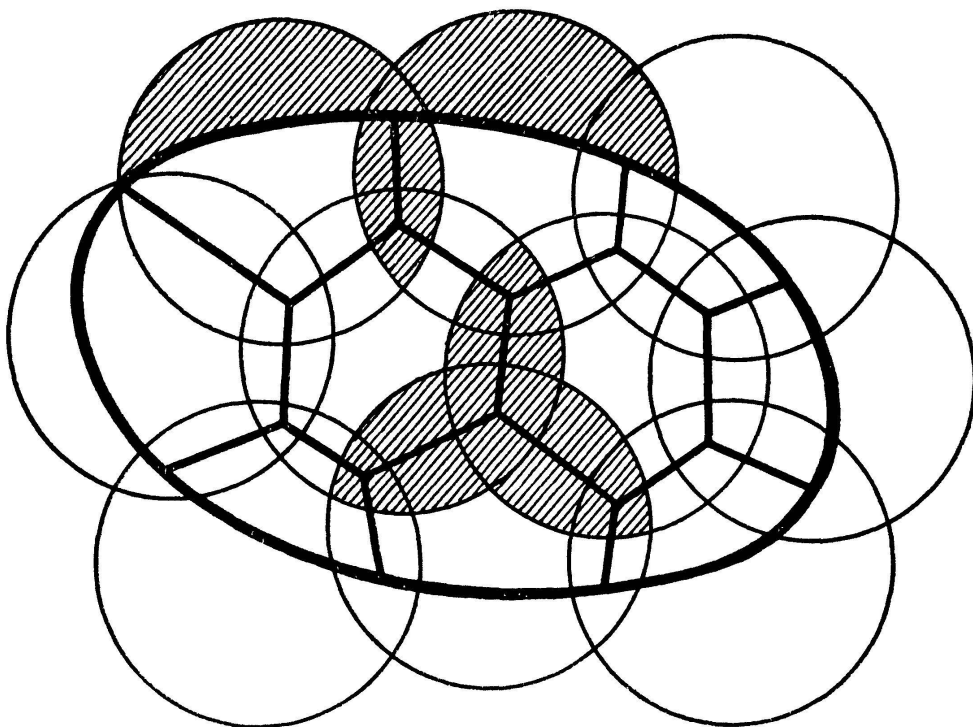


Fig. 2

Es handelt sich nun um die Frage, wann der Flächeninhalt desjenigen Gebietes, das von drei Kreisen  $k_\lambda, k_\mu, k_\nu$  bzw. von zwei Kreisen  $k_\lambda, k_\mu$  und durch das Äußere  $k_0$  eines konvexen Gebiets wenigstens zweifach bedeckt ist, sein Minimum erreicht. Dabei sollen in beiden Fällen die drei Gebiete einen gemeinsamen Punkt besitzen und im zweiten Fall sei auch noch  $k_0$  ganz frei veränderlich.

Es ist leicht einzusehen, daß im ersten Fall das extremale Gebiet sich aus sechs, im zweiten aus vier kongruenten Kreisabschnitten zusammensetzt. Dies bedeutet, daß für einen inneren bzw. zum Rand gehörigen Eckpunkt von  $N$

$$S_{\lambda\mu\nu} \geq \pi - 3\sqrt{3}/2 \quad \text{bzw.} \quad S_{\lambda\mu 0} \geq \pi - 2$$

gilt. Daher haben wir mit Rücksicht auf  $\gamma = 2A - 2$

$$T \leq \pi A - \frac{1}{2} \left( \pi - \frac{3\sqrt{3}}{2} \right) (2A - 2 - \varrho) - \frac{1}{2} (\pi - 2) \varrho,$$

d. h.

$$\frac{3\sqrt{3}}{2} A \geq T + \frac{3\sqrt{3}-4}{4} \varrho - \pi + \frac{3\sqrt{3}}{2} \approx T + 0.3\varrho - 0.54,$$

womit wegen  $\varrho \geq 2$  die Ungleichung (2a) bewiesen ist <sup>4)</sup>.

Wir wenden uns nun einer Verallgemeinerung von (1) und (2) in einer anderen Richtung zu, wobei einerseits eine Zusammenfassung von (1) und (2) in eine einzige Ungleichung, andererseits eine Ausdehnung auf die sphärische Geometrie erzielt wird.

Erwähnen wir zunächst folgende Ergebnisse <sup>5)</sup>:

Betrachten wir  $n \geq 3$  kongruente Kugelkalotten einer Kugel­fläche  $T$ , die einander nicht überdecken, so ist ihre Inhaltssumme

$$s \leq \frac{n}{2} \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{cosec} \frac{n}{n-2} \frac{\pi}{6} \right) T < \frac{\sqrt{3}\pi}{6} T. \quad (1b)$$

Betrachten wir  $n \geq 3$  kongruente Kugelkalotten, welche die Kugel­fläche  $T$  überdecken, so ist ihre Inhaltssumme

$$S \geq \frac{n}{2} \left( 1 - \frac{\sqrt{3}}{3} \operatorname{ctg} \frac{n}{n-2} \frac{\pi}{6} \right) T > \frac{2\sqrt{3}\pi}{9} T. \quad (2b)$$

Wir fassen nun (1b) und (2b) in einem allgemeinen Satz zusammen. Um uns aber bequemer ausdrücken zu können, führen wir zunächst die Dichte  $d$  und das Deckungsmaß  $\delta$  eines Bereichsystems bezüglich einem Gebiet  $G$  ein. Bezeichnen wir die Inhaltssumme der in  $G$  liegenden Teile der Bereiche mit  $\Sigma$ , den von den Bereichen überdeckten Teil von  $G$  mit  $\sigma$ , so erklären wir  $d$  und  $\delta$  durch die Quotienten  $d = \Sigma/G$  und  $\delta = \sigma/G$ .

<sup>4)</sup> Ist die Gestalt des Gebiets  $T$  vorgegeben, so ist für große Werte des Inhalts  $T$  offenbar  $\varrho > L/2 + O(1)$ , wobei  $L$  den Umfang von  $T$  bedeutet. Daher gilt für die Mindestzahl  $A$  der Einheitskreise, die ein großes Gebiet vorgegebener Gestalt überdecken  $A > 2\sqrt{3} T/9 + 0.076 L + O(1)$ . Dies gilt auch — unter gewissen Regularitätsannahmen bezüglich der Begrenzungskurve — auch für nicht konvexe Gebiete. Dabei läßt sich der Faktor von  $L$  durch etwas feinere Überlegungen noch vergrößern. Andererseits befindet sich in der Abhandlung [1] von *H. Hadwiger* die Abschätzung  $A < 2\sqrt{3} T/9 + 0.368 L + 1$ .

<sup>5)</sup> Siehe die Aufsätze [3] bzw. [4] des Verfassers. Wir bemerken, daß in (1b) und (2b) nur für  $n = 3, 4, 6$  und  $12$  Gleichheit erreicht werden kann, und zwar falls die Höhenpunkte der Kugelkappen Eckpunkte eines einem Großkreis einbeschriebenen regulären Dreiecks, eines regulären Tetraeders, eines Oktaeders oder eines Ikosaeders sind.

Der angedeutete Satz lautet nun :

*Betrachten wir auf der Einheitskugel ein System von  $n \geq 4$  kongruenten Kugelkalotten von der Dichte  $d$  und dem Deckungsmaß  $\delta$ . Zeichnen wir ein gleichseitiges sphärisches Dreieck  $\Delta$  vom Inhalt  $\Delta = 2\pi/(n - 2)$  und legen um jeden Eckpunkt je eine zu den Kalotten des Systems kongruente Kugelkalotte  $k_1, k_2, k_3$ . Dann besitzt das System  $\{k_i\}$  bezüglich  $\Delta$  die Dichte  $d$  und ein Deckungsmaß  $\Delta_n(d)$ , für das*

$$\delta \leq \Delta_n(d) \tag{3}$$

ausfällt.

Haben je zwei Kugelkalotten keinen gemeinsamen inneren Punkt, so ist  $\delta = d$ . In diesem Fall kann der sphärische Halbmesser der Kalotten nicht größer sein als die halbe Seitenlänge des Dreiecks  $\Delta$ , da im entgegengesetzten Fall  $\Delta_n(d) < d$  wäre, woraus wegen (3)  $\delta < d$  folgen würde. Das ist aber gerade der wesentliche Inhalt der Ungleichung (1 b).

Wird dagegen die Kugel­fläche von den Kugelkalotten völlig überdeckt, so ist  $\delta = 1$ . In diesem Fall kann der Halbmesser der Kalotten nicht kleiner sein als der sphärische Halbmesser des Umkreises von  $\Delta$ , da sonst  $\Delta_n(d) < 1$  und daher mit Rücksicht auf (3)  $\delta < 1$  wäre. Dies ist aber mit der Ungleichung (2 b) äquivalent.

Es sei noch auf die Ungleichung

$$\Delta_n(d) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_n(d) = \Delta(d) ; \quad d > 0, \quad n = 4, 5, \dots$$

hingewiesen, welche die — von der Kugelkalottenanzahl unabhängige — genaue Abschätzung  $\delta \leq \Delta(d)$  der Deckungszahl  $\delta$  ermöglicht.

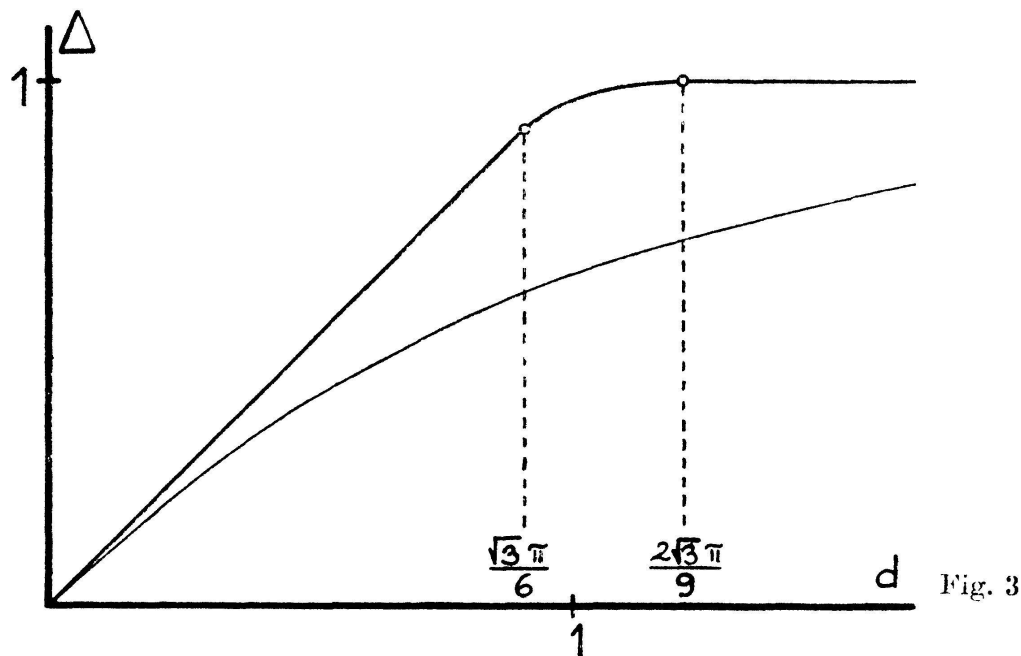
Mit Hilfe eines naheliegenden Grenzüberganges kann man die Dichte und das Deckungsmaß eines Bereichs­systems auch bezüglich der Ebene definieren.  $\Delta(d)$  bedeutet dann das Deckungsmaß desjenigen ebenen Kreissystems von der Dichte  $d$ , bei dem die Kreismittelpunkte ein gleichseitiges Dreiecksgitter bilden.

Wir wollen unser Ergebnis bezüglich der Ebene noch ein wenig anders formulieren. Wir stellen uns die Aufgabe, etwa das Einheitsquadrat mit einer großen Anzahl von kleinen kongruenten Kreisen vorgegebener Inhaltssumme  $d$  möglichst gut zu bedecken, d. h. so, daß der Inhalt  $J$  des überdeckten Teiles des Quadrats möglichst groß sei. Dann ist der Näherungswert des gesuchten Maximums von  $J$  gleich  $\Delta(d)$ .

Die beiliegende Figur stellt die Funktion  $\Delta(d)$  dar, im Vergleich zu dem Mittelwert  $\bar{\Delta}(d) = 1 - e^{-d}$  von  $J$  für eine große Anzahl von Experi-

menten, wobei die kleinen Kreise aufs Geratewohl auf das Quadrat zerstreut werden <sup>6)</sup>.

Zum Beweis unseres Satzes bemerken wir nun zunächst, daß die Tatsache, daß  $\{k_i\}$  bezüglich  $\Delta$  die Dichte  $d$  besitzt, trivial ist. Bezeichnen wir nämlich die Winkelsumme von  $\Delta$  mit  $\alpha$ , so ist mit Rücksicht auf  $\alpha - \pi = \Delta = 2\pi/(n - 2)$  die gesuchte Dichte  $(\alpha k_i/2\pi) : \Delta = n k_i/4\pi = d$ .



Das Wesentliche im Satz, d. h. die Ungleichung (3), ist dagegen eine unmittelbare Folgerung einer allgemeineren Ungleichung, auf die Verfasser von einem ganz anderen Problemkreis ausgehend geführt worden ist <sup>7)</sup>. Dieselbe lautet :

Es seien auf der Oberfläche  $\Omega$  der Einheitskugel  $n \geq 4$  Punkte  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , sowie eine für  $0 \leq \varrho \leq \pi$  erklärte, nirgends zunehmende Funktion  $\varphi(\varrho)$  vorgegeben. Es sei  $P$  ein weiterer variabler Punkt von  $\Omega$  und  $\varrho_P = \min (PP_1, PP_2, \dots, PP_n)$  der kürzeste unter den sphärischen Abständen  $PP_i$ . Dann gilt für das Oberflächenintegral der für jeden Punkt  $P$  von  $\Omega$  erklärten Funktion  $\varphi(\varrho_P)$

$$\int_{\Omega} \varphi(\varrho_P) d\omega \leq (2n - 4) \int_{\Delta} \varphi(\bar{\varrho}_P) d\omega ,$$

<sup>6)</sup> Allgemeiner ist der „integralgeometrische“ Mittelwert des Inhaltes des genau  $k$ -fach ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) bedeckten Teiles des Quadrats angenähert gleich  $d^k/(k! e^d)$ , und die Abweichung von dieser Konstanten wird desto kleiner, je kleiner die Kreise sind. Dabei können statt Kreisen auch beliebige kleine Bereiche in Betracht gezogen werden, die nicht einmal kongruent zu sein brauchen. Dies steht in Zusammenhang mit einer wohlbekannten Formel von *Poisson*.

<sup>7)</sup> Siehe die Abhandlung [9].

wobei  $\Delta \equiv \bar{P}_1\bar{P}_2\bar{P}_3$  ein gleichseitiges sphärisches Dreieck vom Inhalt  $\Delta = 2\pi/(n-2)$  und  $\bar{\varrho}_P = \min(P\bar{P}_1, P\bar{P}_2, P\bar{P}_3)$  den kürzesten sphärischen Abstand zwischen  $P$  und den Ecken von  $\Delta$  bedeutet.

Für die Funktion

$$\varphi(\varrho) = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 \leq \varrho \leq r \\ 0 & \text{für } r < \varrho \leq \pi \end{cases}$$

ergibt nun die linke Seite der obigen Ungleichung den Oberflächeninhalt des von denjenigen Kugelkalotten bedeckten Teiles von  $\Omega$ , die um die Punkte  $P_1, P_2, \dots, P_n$  mit dem sphärischen Halbmesser  $r$  geschlagen sind. Ähnliche Bedeutung hat das Integral auf der rechten Seite. Dividiert man durch  $4\pi$ , so ergibt sich die gewünschte Ungleichung (3).

(Eingegangen den 2. März 1949.)

#### SCHRIFTENVERZEICHNIS

*L. Fejes Tóth*: [1] Über einen geometrischen Satz, *Math. Zeitschrift* 46 (1940), 83—85; [2] Über die dichteste Kugellagerung, *Math. Zeitschrift* 48 (1943), 676—684; [3] Über eine Abschätzung des kürzesten Abstandes zweier Punkte eines auf einer Kugeloberfläche liegenden Punktsystems, *Jahresbericht der D.M.V.* 53 (1943), 66—68; [4] Über die Bedeckung einer Kugeloberfläche durch kongruente Kugelkalotten (ungarisch mit deutschem Auszug), *Mat. Fiz. Lapok* 50 (1943), 40—46; [5] Extremale Punktsysteme in der Ebene, auf der Kugeloberfläche und im Raum (ungarisch), *Acta Sci. Math. et Nat.* 23 (1944, Kolozsvár), IV+54; [6] Einige Bemerkungen über die dichteste Lagerung inkongruenter Kreise, *Comm. Math. Helv.* 17 (1944—1945), 256—261; [7] An inequality concerning polyhedra, *Bulletin Amer. Math. Soc.* 54 (1948), 139—146; [8] Approximation by polygons and polyhedra, *Bulletin Amer. Math. Soc.* 54 (1948), 431—438; [9] The isoperimetric problem for  $n$ -hedra, *Amer. J. Math.* 70 (1948), 174—180.

*H. Hadwiger*: [1] Überdeckungen ebener Bereiche durch Kreise und Quadrate, *Comm. Math. Helv.* 13 (1940—1941), 195—200; [2] Über extremale Punktverteilungen in ebenen Gebieten, *Math. Zeitschrift* 49 (1944), 370—373; [3] Lagerungen und Überdeckungen in der Ebene, *Experientia* 4 (1948).

*R. Kershner*: The number of circles covering a set, *Amer. J. Math.* 61 (1939), 665—671.

*B. Segre — K. Mahler*: On the densest packing of circles, *Amer. Math. Monthly* 51 (1944), 261—270.

*A. Thue*: [1] Om nogle geometriske talteoretiske Theoremer, *Naturforsker-møde* (1892), 352—353; [2] Über die dichteste Zusammenstellung von kongruenten Kreisen in einer Ebene, *Christiania Vid.-Selsk. Skr.* 1 (1910), 9.