

Zeitschrift: Elemente der Mathematik
Herausgeber: Schweizerische Mathematische Gesellschaft
Band: 32 (1977)
Heft: 5

Artikel: Ein ebenes Extremalproblem
Autor: Wegner, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-32160>

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: 11.04.2026

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

Ein ebenes Extremalproblem

Bei verschiedenen Extremalproblemen erweist sich das reguläre n -Eck in einer gegebenen Polygonklasse als die optimale Lösung. So hat etwa das reguläre n -Eck unter allen, dem Einheitskreis einbeschriebenen konvexen n -Ecken maximalen Flächeninhalt und auch maximalen Umfang, und unter allen n -Ecken mit gegebenem Umfang (isoperimetrisches Problem) maximalen Flächeninhalt (vgl. hierzu L. FEJES TÓTH [2]). Dagegen führen Extremalprobleme, bei denen die Dicke eine Rolle spielt, nicht selten zu unerwartet irregulären Extremalkonfigurationen. Die Dicke einer konvexen Menge K in der Ebene ist wie folgt definiert. Ist \mathbf{u} ein Einheitsvektor, so wird der Abstand $b(K, \mathbf{u})$ der beiden, zu \mathbf{u} orthogonalen Stützgeraden von K die *Breite* von K in Richtung \mathbf{u} genannt, und das über alle Richtungen erstreckte Infimum $d(K) := \inf b(K, \mathbf{u})$ heisst die *Dicke* von K .

Wir wollen das folgende elementare Problem untersuchen, auf welches man übrigens bei der Betrachtung von Transversalenproblemen stösst (siehe J. ECKHOFF [1]):

Welche n -Ecke haben unter allen, dem Einheitskreis einbeschriebenen n -Ecken die grösstmögliche Dicke?

Wir gestatten dabei, dass Ecken zusammenfallen, d. h. wir lassen auch die k -Ecke mit $k < n$ zur Konkurrenz zu. Somit ist das gesuchte Extremum

$$d_n := \sup d(K),$$

erstreckt über alle dem Einheitskreis einbeschriebenen k -Ecke K mit $k \leq n$, jedenfalls eine monoton nichtfallende Funktion von n .

Für ungerades n ist genau das reguläre n -Eck extremal, und damit ist in diesen Fällen $d_n = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{n}\right)$; dies bemerkte schon J. ECKHOFF [1] (und es folgt übrigens auch unmittelbar aus dem nachfolgenden Lemma 1). Für gerades n ist dagegen das reguläre n -Eck bereits im Falle $n=4$ nicht mehr extremal, was schon daraus zu ersehen ist, dass die Dicke des Quadrats mit Kantenlänge $\sqrt{2}$ kleiner ist als die Dicke $\frac{3}{2}$ des gleichseitigen Dreiecks. Es zeigt sich, dass es überdies für gerades n eine ganze Schar von Extremalkonfigurationen gibt.

Satz. Sei $n > 2$ gerade und ψ_n die eindeutig bestimmte Lösung der Gleichung

$$\sin\left(\frac{\pi}{n-1} - \psi\right) - (n-1) \sin(n-1) \psi = 0$$

mit $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2(n-1)}$. Die maximale Dicke der dem Einheitskreis einbeschriebenen n -Ecke wird gegeben durch

$$d_n = \cos\left(\frac{\pi}{n-1} - \psi_n\right) + \cos(n-1) \psi_n$$

und sie wird angenommen von allen n -Ecken, die $n-2$ aufeinanderfolgende Seiten mit dem Zentrumswinkel $\beta_n = \frac{2\pi}{(n-1)} - 2\psi_n$ besitzen und deren übrige beiden Seiten (ebenfalls durch den Zentrumswinkel ausgedrückt) zwischen $2(n-1)\psi_n$ und $\frac{2\pi}{(n-1)} - 2\psi_n$ liegen.

Hält man also die $n-1$ Ecken der $n-2$ Maximalseiten fest, so kann die letzte Ecke an beliebiger Stelle eines Kreisbogens B der Länge $\frac{2\pi}{(n-1)} - 2n\psi_n$ placiert werden. Abb. 1 zeigt einige Vierecke und Sechsecke maximaler Dicke, und die nachfolgende Tabelle gibt d_n für $3 \leq n \leq 10$ näherungsweise wieder.¹⁾

n	3	4	5	6	7	8	9	10
d_n	1,5	1,53960	1,80901	1,81571	1,90096	1,90285	1,93969	1,94040

Es fällt auf, dass $d_{2m} - d_{2m-1}$ sehr viel kleiner ausfällt als $d_{2m+1} - d_{2m}$. In der Tat kann man zeigen (was wir hier abe. nicht durchführen), dass

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{d_{2m} - d_{2m-1}}{d_{2m+1} - d_{2m}} = 0 \tag{1}$$

ist.

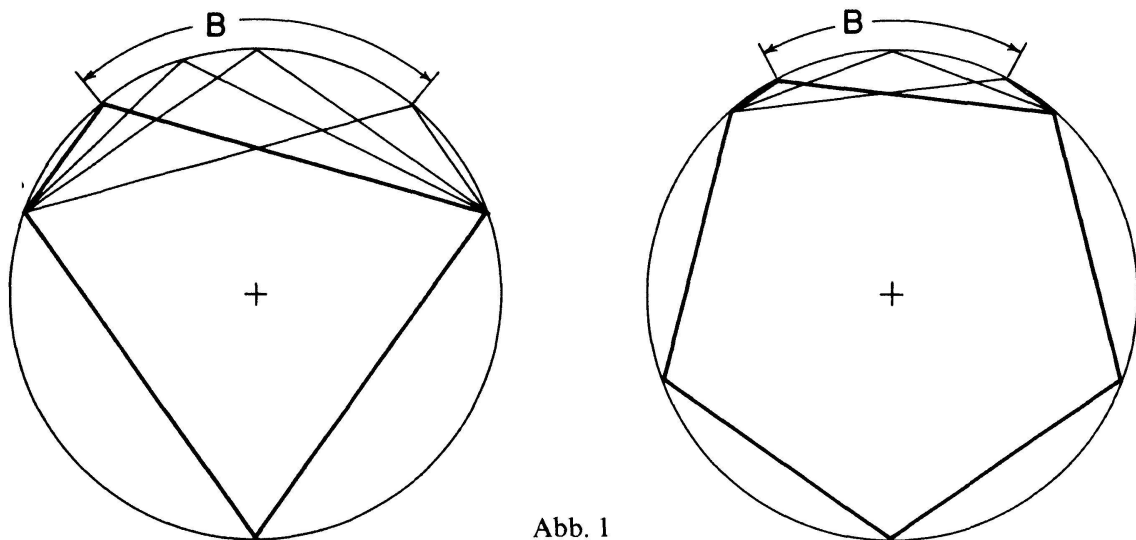


Abb. 1

Den Beweis des Satzes erbringen wir über einige Hilfsaussagen. Seiten der einbeschriebenen Polygone werden dabei stets durch den zugehörigen Zentrumswinkel gemessen, insbesondere sei a_n die Seitenlänge des regulären n -Ecks, also

$$a_n = \frac{2\pi}{n}.$$

¹⁾ Es ist übrigens $d_4 = \frac{8}{3\sqrt{3}}$ und $d_6 = \frac{1}{10} \sqrt{190 + 58\sqrt{\frac{29}{5}}}$.

Lemma 1. *Ist wenigstens eine Seite eines Polygons P grösser als a_{2m-1} , so ist seine Dicke d kleiner als d_{2m-1} .*

Denn ist s irgendeine Seite von P mit der Länge $\sigma > a_{2m-1}$ und $b(s)$ die Breite von P in der zu s orthogonalen Richtung, so gilt

$$d \leq b(s) \leq 1 + \cos \frac{\sigma}{2} < 1 + \cos \frac{\pi}{2m-1} = d_{2m-1},$$

womit die Behauptung folgt.

Unter einer *Sehnenkette* S wollen wir eine Folge von m Kreissehnen s_1, \dots, s_m verstehen derart, dass s_i und s_{i+1} ($i = 1, \dots, m-1$) einen Endpunkt gemeinsam haben und für die Längen σ_i

$$\sigma_i \leq \sigma_1 \leq a_{2m-1} \text{ für } i = 2, \dots, m \quad (2)$$

gilt. Unter der *Breite* $b(S)$ von S wollen wir die Breite orthogonal zu s_1 verstehen (vgl. Abb. 2).

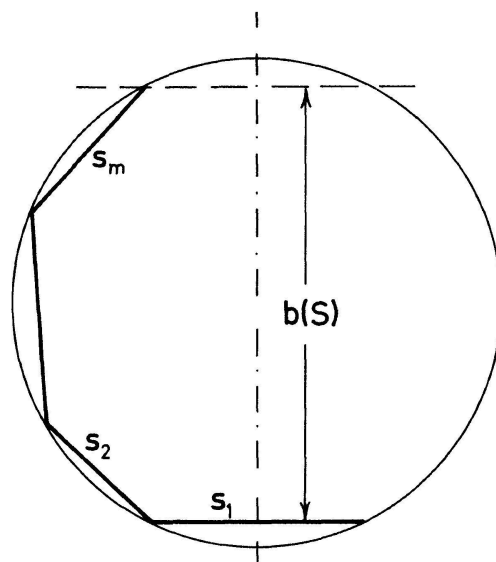


Abb. 2

Auf Grund der Nebenbedingungen (2) liegen alle Seiten s_2, \dots, s_m ganz auf einer Seite der Mittelsenkrechten zu s_1 und danach ist die folgende Aussage unmittelbar ersichtlich:

Lemma 2. *Bei gegebenem $\sigma_1 = a_{2m-1} - 2\psi$ ist $b(S)$ genau dann maximal, wenn $\sigma_1 = \sigma_i$ für alle i gilt, und $b(S)$ wird dann gegeben durch*

$$b_{2m}(\psi) := \cos\left(\frac{\pi}{2m-1} - \psi\right) + \cos(2m-1)\psi.$$

Wegen $0 \leq \sigma_1 \leq a_{2m-1}$ darf ψ in dem Bereich $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2m-1}$ variieren und über das Maximum von $b_{2m}(\psi)$ in diesem Bereich gibt das folgende Lemma Aufschluss.

Lemma 3. $b_{2m}(\psi)$ hat in $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2m-1}$ eine eindeutig bestimmte Maximalstelle ψ_{2m} und zwar gilt

$$0 < \psi_{2m} < \frac{\pi}{2m(2m-1)}.$$

Da jedenfalls $b_{2m}(\psi) \leq 1 < b_{2m}(0) = d_{2m-1}$ für $\frac{\pi}{2(2m-1)} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2m-1}$ gilt, liegt die gesuchte Maximalstelle im Intervall $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2(2m-1)}$. In diesem Intervall ist aber $b'_{2m}(\psi)$ streng monoton fallend sowie $b'_{2m}(0) > 0$ und $b'_{2m}\left(\frac{\pi}{2m(2m-1)}\right) < 0$, woraus die Behauptung folgt.

Bemerkung. Mit etwas mehr Mühe erhält man $\psi_{2m} < \frac{\pi}{(2m-1)^3}$, womit sich (1) beweisen lässt.

Nunmehr können wir den behaupteten Satz beweisen. Es ist klar, dass die Dicke eines Polygons realisiert wird durch die Breite orthogonal zu einer seiner Seiten. Daher steht auf Grund der obigen Lemmata zunächst einmal fest, dass die im Satz angegebenen Polygone wirklich die Dicke d_{2m} besitzen, denn für diese ist die Breite orthogonal zu den $n-2$ Maximalseiten gleich d_{2m} und die Breite orthogonal zu den übrigen beiden Seiten höchstens grösser als d_{2m} . Es bleibt zu zeigen, dass die Dicke eines beliebigen, dem Einheitskreis einbeschriebenen Polygons mit höchstens $2m$ Ecken nicht grösser als d_{2m} sein kann. Sei σ die maximale Seitenlänge von P . Ist $\sigma > a_{2m-1}$, so ist die Dicke von P nach Lemma 1 kleiner als d_{2m-1} (und damit kleiner als d_{2m}). Sei also $\sigma \leq a_{2m-1}$ und s_1 eine Maximalseite von P . Nach Lemmata 2 und 3 ist dann die Breite von P orthogonal zu s_1 kleiner als d_{2m} , wenn nicht $\sigma = \beta_{2m}$ ist und wenigstens eine der beiden, aus den Seiten von P gebildeten Sehnenketten mit Anfangsglied s_1 aus lauter Maximalseiten besteht. Also bleibt der Fall zu betrachten, dass $\sigma = \beta_{2m}$ und jede maximale Seite das Anfangsglied einer Kette von m maximalen Seiten ist. Hierdurch werden aber gerade die oben betrachteten Polygone maximaler Dicke charakterisiert: Eine Kette aus Maximalseiten, die von Seiten kleinerer Länge begrenzt wird, besteht dann nämlich aus mindestens $2m-2$ Mitgliedern, andernfalls enthielte sie wenigstens eine Seite, die nicht Anfangsglied einer Kette von m Maximalseiten ist. Da eine solche Kette höchstens zwei Seiten übriglässt, hängen die Maximalseiten alle zusammen, und die Längen der verbleibenden Seiten genügen den im Satz genannten Ungleichungen, da keine von ihnen grösser als σ sein kann. Damit ist der Satz bewiesen.

Dietrich Kramer und Gerd Wegner, Universität Dortmund

LITERATURVERZEICHNIS

- 1 J. ECKHOFF, *Transversalenprobleme vom Gallaischen Typ*, Diss., Göttingen 1969.
- 2 L. FEJES TÓTH, *Lagerungen in der Ebene, auf der Kugel und im Raum*, Berlin 1972 (2. Aufl.).