

Ein kombinatorisches Analogon zum Satz von Gauss-Bonnet

Autor(en): **Schneider, Rolf**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Elemente der Mathematik**

Band (Jahr): **32 (1977)**

Heft 5

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-32159>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

ELEMENTE DER MATHEMATIK

Revue de mathématiques élémentaires – Rivista di matematica elementare

*Zeitschrift zur Pflege der Mathematik
und zur Förderung des mathematisch-physikalischen Unterrichts*

El. Math.

Band 32

Heft 5

Seiten 105–136

10. September 1977

Ein kombinatorisches Analogon zum Satz von Gauss-Bonnet

Kürzlich hat H. Walser [7] für ebene n -Eck-Netze eine kombinatorische Formel angegeben, die eine formale Analogie zum Satz von Gauss-Bonnet aufweist. Wir wollen dieses elementare Gegenstück zur Gauss-Bonnetschen Formel im folgenden in allgemeinerer Form herleiten.

Hierzu betrachten wir einen endlichen (geometrischen) Zellkomplex $\mathfrak{Z}$, also eine endliche Menge von konvexen Polytopen des d -dimensionalen reellen affinen Raumes, den «Zellen» von $\mathfrak{Z}$, mit der Eigenschaft, dass alle Seiten einer Zelle ebenfalls zu $\mathfrak{Z}$ gehören und dass der Durchschnitt je zweier Zellen entweder leer oder eine gemeinsame Seite beider Zellen ist. Die Menge aller k -dimensionalen Zellen von $\mathfrak{Z}$ sei mit $\mathcal{A}^k$, deren Anzahl mit f_k bezeichnet ($k=0, \dots, d$). Unter χ sei die Eulersche Charakteristik des Zellkomplexes $\mathfrak{Z}$ verstanden. Für das Folgende genügt die Kenntnis, dass sie sich durch die einfache Formel

$$\chi = \sum_{k=0}^d (-1)^k f_k \quad (1)$$

berechnen lässt. Auf die Bedeutung der Charakteristik in allgemeineren Zusammenhängen und ihre Eigenschaften (z. B., dass sie nur vom topologischen Typ der Punktmenge $\bigcup \{Z \mid Z \in \mathcal{A}^k, k=0, \dots, d\}$ abhängt) brauchen wir daher hier nicht einzugehen (der Leser sei jedoch einerseits auf Lehrbücher der Topologie, andererseits auf die Artikel von Hadwiger [3], Klee [4], insbesondere Theorem 2.3, und Rota [5] verwiesen).

Für jede Ecke E (nulldimensionale Zelle) des Zellkomplexes erklären wir die «Krümmung» in E durch

$$K(E) = \sum_{k=0}^d (-1)^k \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{A}^k} \frac{1}{f_0(Z)}, \quad (2)$$

wo $f_0(Z)$ die Eckenzahl der Zelle Z bezeichnet. Dann gilt in Analogie zum Gauss-Bonnetschen Satz, dass die totale Krümmung gleich der Eulerschen Charakteristik ist:

$$\sum_{E \in \mathcal{A}^0} K(E) = \chi. \quad (3)$$

Zum Beweis setzen wir für beliebige Ecken E und Zellen Z von $\mathfrak{Z}$

$$\varphi(E, Z) = \begin{cases} 1/f_0(Z), & \text{wenn } E \subseteq Z, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dann ergibt sich

$$\begin{aligned} \sum_{E \in \mathcal{A}^0} \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{A}^k} \frac{1}{f_0(Z)} &= \sum_{E \in \mathcal{A}^0} \sum_{Z \in \mathcal{A}^k} \varphi(E, Z) = \sum_{Z \in \mathcal{A}^k} \sum_{E \in \mathcal{A}^0} \varphi(E, Z) \\ &= \sum_{Z \in \mathcal{A}^k} \frac{1}{f_0(Z)} \sum_{E \subseteq Z} 1 = \sum_{Z \in \mathcal{A}^k} 1 = f_k \end{aligned}$$

für $k = 0, \dots, d$, also unter Verwendung von (2) und (1)

$$\sum_{E \in \mathcal{A}^0} K(E) = \sum_{k=0}^d (-1)^k \sum_{E \in \mathcal{A}^0} \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{A}^k} \frac{1}{f_0(Z)} = \sum_{k=0}^d (-1)^k f_k = \chi,$$

womit (3) schon bewiesen ist.

Die (zwecks grösserer Anschaulichkeit getroffene) Voraussetzung, dass ein geometrischer Zellkomplex zugrundeliege, ist offenbar nur teilweise ausgenutzt worden. Da es sich um rein kombinatorische Begriffe und Schlüsse handelt, überträgt sich alles sofort auf allgemeinere Situationen, wie topologische Zellkomplexe oder abstrakte Zellkomplexe im Sinne von Grünbaum ([2], S. 206). Man könnte auch, noch allgemeiner, an einen verbandstheoretischen Rahmen denken, in dem die Eulersche Charakteristik ihren natürlichen Platz hat (vgl. Klee [4], Rota [5]). Anstatt jedoch hierauf weiter einzugehen, wollen wir lieber zeigen, in welcher Weise in (3) die von Walser [7] angegebene Formel als Spezialfall enthalten ist. Dies ist vielleicht nicht unmittelbar ersichtlich, da in (7) eine «Randkurve» und ein als «geodätische Krümmung» interpretierter Term auftreten.

Wir betrachten also jetzt wie in (7) ein ebenes Netz N und in der Ebene eine geschlossene Jordankurve b , die keinen Knoten von N enthält und jede Kante oder zweidimensionale Zelle von N höchstens einmal schneidet. G sei der von b berandete kompakte Bereich. Wir betrachten dann folgenden (topologischen) Zellkomplex $\mathfrak{Z}$: Seine zweidimensionalen Zellen seien alle Durchschnitte von Zellen des Netzes N mit G , seine Kanten seien alle Durchschnitte von Kanten von N mit G sowie die Durchschnitte der Kurve b mit Zellen von N , seine Ecken seien alle Ecken von N in G sowie alle Durchschnitte von b mit Kanten von N . Die Menge der auf die letztgenannte Weise entstehenden Ecken bezeichnen wir mit $\mathcal{A}_1^0$. Die Menge der 2-Zellen von N , die von b getroffen werden, sei mit B bezeichnet; für $Z \in B$ sei $r(Z)$ die Anzahl der in G liegenden Ecken von Z , und $\mathcal{A}_2^0$ sei die Menge aller Ecken in G , die zu Zellen aus B gehören. Schliesslich sei $\mathcal{A}_3^0$ die Menge aller nicht zu $\mathcal{A}_1^0 \cup \mathcal{A}_2^0$ gehörenden Ecken in G .

Ist $E \in \mathcal{A}_2^0 \cup \mathcal{A}_3^0$, so ist E in gleich vielen Kanten wie 2-Zellen von $\mathcal{Z}$ enthalten, daher ist

$$K(E) = 1 - \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{A}^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{f_0(Z)} \right).$$

Unsere kombinatorische Krümmungsdefinition stimmt also (bis auf den Faktor 2) überein mit der von Stone [6], S. 12, benutzten.

Wir wollen nun mit Walser [7] die Voraussetzung treffen, dass sämtliche Zellen des Netzes N n -seitig sind. Für alle $E \in \mathcal{A}_3^0$ ist dann

$$K(E) = 1 - i(E) \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n} \right) =: K_w(E),$$

was mit der von Walser benutzten Krümmungsdefinition zusammenfällt; hier ist $i(E)$ die Ordnung der Ecke E . Für $E \in \mathcal{A}_2^0$ gilt

$$K(E) = 1 - \frac{i(E)}{2} + \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{A}^2} \frac{1}{f_0(Z)} = K_w(E) + \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{B}} \left(\frac{1}{r(Z)+2} - \frac{1}{n} \right),$$

und für $E \in \mathcal{A}_1^0$ ist $i(E) = 3$, also

$$K(E) = -\frac{1}{2} + \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{B}} \frac{1}{r(Z)+2}.$$

Somit erhalten wir aus (3) unter Beachtung der im vorliegenden Fall gültigen Eulerschen Formel $\chi = 1$

$$\begin{aligned} 1 = \sum_{E \in \mathcal{A}^0} K(E) &= \sum_{E \in \mathcal{A}_2^0 \cup \mathcal{A}_3^0} K_w(E) + \sum_{E \in \mathcal{A}_2^0} \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{B}} \left(\frac{1}{r(Z)+2} - \frac{1}{n} \right) \\ &+ \sum_{E \in \mathcal{A}_1^0} \left(-\frac{1}{2} + \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{B}} \frac{1}{r(Z)+2} \right). \end{aligned}$$

Nun ist

$$\sum_{E \in \mathcal{A}_2^0 \cup \mathcal{A}_1^0} \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{B}} \frac{1}{r(Z)+2} = \sum_{Z \in \mathcal{B}} 1,$$

denn in der Doppelsumme tritt jede Zelle $Z \in \mathcal{B}$ so oft auf, wie ihr Durchschnitt mit G Ecken besitzt, also $r(Z) + 2$ mal. Analog ist

$$\sum_{E \in \mathcal{A}_2^0} \sum_{E \subseteq Z \in \mathcal{B}} \left(-\frac{1}{n} \right) = \sum_{Z \in \mathcal{B}} \left(-\frac{r(Z)}{n} \right)$$

und offenbar

$$\sum_{E \in \mathcal{A}_1^0} \left(-\frac{1}{2}\right) = \sum_{Z \in B} \left(-\frac{1}{2}\right).$$

Insgesamt ergibt sich

$$\sum_{E \in \mathcal{A}_2^0 \cup \mathcal{A}_3^0} K_w(E) + \sum_{Z \in B} \left(\frac{1}{2} - \frac{r(Z)}{n}\right) = 1,$$

was mit Formel (13) von Walser [7] übereinstimmt.

Abschliessend sei noch darauf hingewiesen, dass der Zusammenhang zwischen der Formel (3) und der Gauss-Bonnetschen Formel nicht nur in einer rein formalen Analogie zu sehen ist. Betrachten wir etwa einen endlichen Zellkomplex, der als Zellzerlegung einer zweidimensionalen Mannigfaltigkeit M mit Rand erscheint. Wir können dann, wie man unschwer einsieht, auf M eine Metrik einführen derart, dass jede 2-Zelle des Zellkomplexes isometrisch wird zu einem regulären Polygon. Der für Mannigfaltigkeiten mit polyedrischer Metrik gültige Satz vom Gauss-Bonnetschen Typ (siehe z. B. Gluck, Krigelman und Singer [1], S. 605) reduziert sich in unserem Fall gerade auf die Formel (3) für $d=2$.

Rolf Schneider, Freiburg i. Br.

LITERATURVERZEICHNIS

- 1 H. Gluck, K. Krigelman und D. Singer: The converse to the Gauss-Bonnet theorem in PL. J. Differential Geometry 9, 601–616 (1974).
- 2 B. Grünbaum: Convex polytopes. London et al. 1967.
- 3 H. Hadwiger: Eulers Charakteristik und kombinatorische Geometrie. J. reine angew. Math. 194, 101–110 (1955).
- 4 V. Klee: The Euler characteristic in combinatorial geometry. Amer. Math. Monthly 70, 119–127 (1963).
- 5 G.-C. Rota: On the combinatorics of the Euler characteristic. In: Studies in Pure Mathematics (presented to Richard Rado), 221–233, London 1971.
- 6 D.A. Stone: A combinatorial analogue of a theorem of Myers. Illinois J. Math. 20, 12–21 (1976). Correction: *ibid.*, 551–554.
- 7 H. Walser: Eine Übertragung der Formel von Gauss-Bonnet auf ebene Netze. Elem. Math. 31, 59–64 (1976).