

**Zeitschrift:** L'Enseignement Mathématique  
**Band:** 38 (1992)  
**Heft:** 3-4: L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE

**Artikel:** KREISPACKUNGEN UND TRIANGULIERUNGEN  
**Kapitel:** 3. Die funktion L: W R  
**Autor:** Brägger, Walter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-59490>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 07.10.2024

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

Wir haben in  $\mathbf{R}^S$  nun drei Mengen  $W \supset W_{\text{Koh}} \supset W_{\text{Geo}}$  definiert. Die Menge  $W_{\text{Geo}}$  sitzt als Teilmenge kompliziert in  $W_{\text{Koh}}$ . Wir kennen für  $W_{\text{Geo}}$  keine direkte Beschreibung. Im nächsten Paragraphen definieren wir auf  $W$  eine Funktion  $L$ . Es zeigt sich, dass die Einschränkung von  $L$  auf  $W_{\text{Koh}}$  genau einen kritischen Punkt in  $\overset{\circ}{W}_{\text{Koh}}$  hat. Dieser liegt auch in  $W_{\text{Geo}}$  und das 1-Skelett seiner geometrischen Realisierung entspricht dem Graphen einer Kreispackung.

### 3. DIE FUNKTION $L: W \rightarrow \mathbf{R}$

3.1. Wir definieren für  $\psi \in W$

$$(4) \quad L(\psi) = -2 \sum_{s \in S} \left( \int_0^{\psi(s)/2} \log \tan \vartheta \, d\vartheta \right).$$

Die so definierte Funktion  $L: W \rightarrow \mathbf{R}$  ist auf  $W$  stetig und auf  $\overset{\circ}{W}$  analytisch. Es sei bemerkt, dass sich das Integral

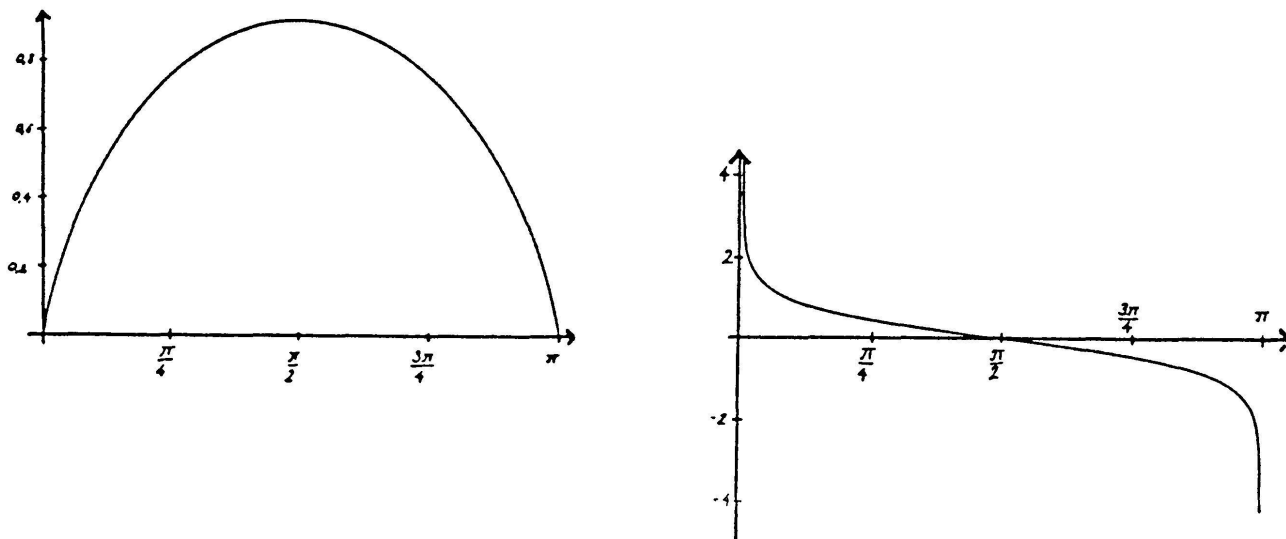
$$I(\alpha) := - \int_0^{\alpha/2} \log \tan \vartheta \, d\vartheta \quad \alpha \in [0, \pi]$$

mit der Lobatchevsky-Funktion  $\mathcal{L}: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$  ausdrücken lässt. Sei  $\mathcal{L}(\delta) :=$

$$- \int_0^{\delta} \log |2 \sin \vartheta| \, d\vartheta, \text{ dann gilt}$$

$$I(\delta) = \mathcal{L}\left(\frac{\delta}{2}\right) + \mathcal{L}\left(\frac{\pi - \delta}{2}\right).$$

Mit der Lobatchevsky-Funktion kann man das Volumen hyperbolischer 3-Simplices aus deren Keilwinkel bestimmen. Darum hat auch  $I(\delta)$  und  $L|_{W_{\text{Koh}}}$  eine geometrische Bedeutung im hyperbolischen 3-Raum  $\mathbf{H}^3$ . In 3.2. ordnen wir jedem Winkelsystem  $\psi \in W_{\text{Koh}}$  eine Figur in  $\mathbf{H}^3$  so zu, dass  $L(\psi)$  dem Volumen dieser Figur entspricht. Diese geometrische Interpretation von  $L|_{W_{\text{Koh}}}$  wird zum nackten Beweis des Satzes von Andreev jedoch nicht verwendet.



FIGUR 4

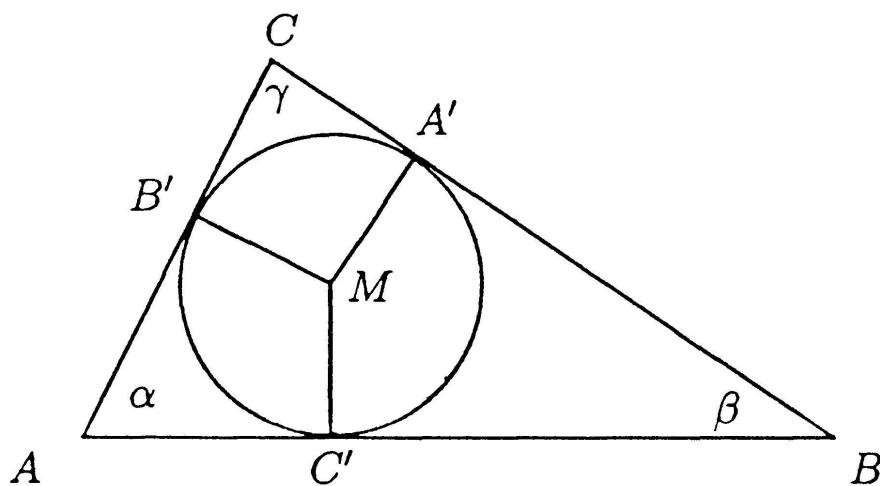
Die Funktionen  $I: [0, \pi] \mapsto \mathbf{R}$  und  $\frac{d}{d\alpha} I(\alpha): (0, \pi) \mapsto \mathbf{R}$

3.2. Sei  $\Omega_\delta$ ,  $\delta \in (0, \pi)$  ein idealer 3-Simplex im hyperbolischen 3-Raum mit den Keilwinkeln  $\delta/2$ ,  $(\pi - \delta)/2$  und  $\pi/2$ . Dann gilt (vgl. hierzu [Mi]):

$$\text{Vol}_{\text{Hyp}}(\Omega_\delta) = \mathcal{L}\left(\frac{\delta}{2}\right) + \mathcal{L}\left(\frac{\pi - \delta}{2}\right) = I(\delta).$$

Für ein euklidisches Dreieck  $d$  mit den Winkeln  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  konstruieren wir in  $\mathbf{H}^3$  eine Figur  $\lambda(d)$  folgendermassen:

Wir wählen für  $\mathbf{H}^3$  das Model  $\mathbf{C} \times \mathbf{R}_+$  und schreiben  $\partial\mathbf{H}^3 = \mathbf{C} \cup \{\infty\}$ . Seien  $A, B, C$  die Eckpunkte von  $d \subset \mathbf{C}$ ,  $M$  der Mittelpunkt des Inkreises und  $A', B', C'$  die Fusspunkte der Lote von  $M$  auf die Seiten von  $d$  (siehe Figur 5).



FIGUR 5

Zerlegung eines Dreiecks

Die Menge  $\lambda(d)$  ist die konvexe Hülle in  $\mathbf{H}^3$  der Punkte  $A, B, C, M, A', B', C', \infty$ . Sie zerlegt sich in 6 Simplices und zwar je zwei Kopien  $\Omega_\alpha, \Omega_\beta, \Omega_\gamma$ . Somit gilt für  $\psi \in \overset{\circ}{W}_{\text{Koh}}$

$$L(\psi) = \sum_{d \in \Delta} \text{Vol}_{\text{Hyp}}(\lambda(d_\psi)) ,$$

wobei  $d_\psi \subset \mathbf{C}$  eine Realisierung von  $d$  ist, deren Winkel  $\psi$  entsprechen. Für  $\psi \in W$  nicht in  $\overset{\circ}{W}_{\text{Koh}}$  kennen wir keine geometrische Bedeutung für  $L(\psi)$ .

3.3. Seien  $\varphi$  und  $\psi$  zwei verschiedene Randpunkte von  $W$ , dann sei

$$[\varphi, \psi] := \{t\psi + (1-t)\varphi\}_{t \in [0,1]} \subset W .$$

Wir nennen  $[\varphi, \psi]$  **maximal**, wenn  $\{t\psi + (1-t)\varphi\}_{t \in \mathbf{R}} \cap W = [\varphi, \psi]$ .

3.4. LEMMA. Seien  $\varphi$  und  $\psi$  zwei verschiedene Randpunkte von  $W$ , so dass  $[\varphi, \psi]$  maximal ist. Dann bildet die Funktion

$$t \mapsto \frac{d}{dt} L(t\varphi + (1-t)\psi)$$

das Intervall  $(0, 1)$  homöomorph auf  $\mathbf{R}$  ab.

*Beweis.* Betrachten wir nochmals die Funktion  $I: [0, \pi] \mapsto \mathbf{R}$ . Für  $\alpha \in (0, \pi)$  gilt

$$\frac{d}{d\alpha} I(\alpha) = -\frac{1}{2} \log \left( \tan \frac{\alpha}{2} \right) \quad \text{und} \quad \frac{d^2}{d\alpha^2} I(\alpha) = -\frac{1}{2 \sin \alpha} .$$

Sei nun  $\gamma: [0, 1] \mapsto W$  mit  $\gamma(t) := t\varphi + (1-t)\psi$ . Dann gilt für  $t \in (0, 1)$ :

$$(5) \quad \frac{d}{dt} L \circ \gamma = - \sum_{s \in S'} \log \left( \tan \frac{\gamma(t)(s)}{2} \right) ((\varphi - \psi)(s))$$

$$(6) \quad \frac{d^2}{dt^2} L \circ \gamma = - \sum_{s \in S'} \frac{(\varphi - \psi)^2(s)}{\sin(\gamma(t)(s))} < 0 ,$$

wobei  $S' = \{s \in S \mid \varphi(s) \neq \psi(s)\}$  ist. Nach (5) gilt:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \left( \frac{d}{dt} (L \circ \gamma)(t) \right) = +\infty \quad \text{und} \quad \lim_{t \rightarrow 1} \left( \frac{d}{dt} (L \circ \gamma)(t) \right) = -\infty .$$

Somit ist  $\frac{d}{dt} (L \circ \gamma)$  surjektiv und wegen (6) streng monoton.  $\square$

Für  $t = 0$  und  $t = 1$  ist  $\frac{d}{dt}(L \circ \gamma)$  in  $\mathbf{R}$  nicht definiert. Wegen (7)

definieren wir aber

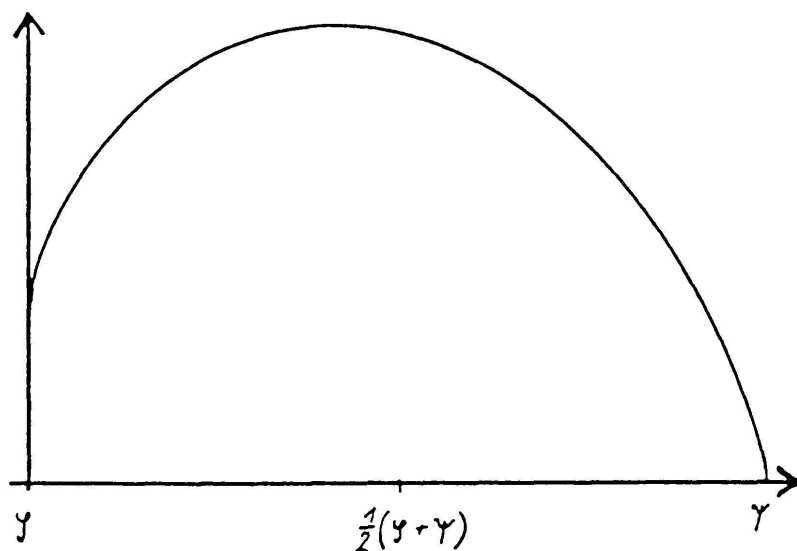
$$\frac{d}{dt}(L \circ \gamma)|_{t=0} = +\infty \quad \text{und} \quad \frac{d}{dt}(L \circ \gamma)|_{t=1} = -\infty.$$

Nach Lemma 3.4. ist die Funktion  $L|_{[\varphi, \psi]}: [\varphi, \psi] \mapsto \mathbf{R}$  konkav und nimmt in den Randpunkten  $\varphi$  und  $\psi$  kein Maximum an. Wir erhalten somit:

3.5. PROPOSITION. *Die Funktion  $L: W \mapsto \mathbf{R}$  ist auf  $W$  streng konkav.*

Sei im Folgenden  $L_{\text{Koh}}$  die Einschränkung von  $L$  auf  $W_{\text{Koh}}$ .

3.6. SATZ. *Die Funktion  $L_{\text{Koh}}: W_{\text{Koh}} \rightarrow \mathbf{R}$  nimmt auf der kompakten Menge  $W_{\text{Koh}}$  genau ein Maximum an. Dieses Maximum liegt in  $\overset{\circ}{W}_{\text{Koh}}$  und ist dort der einzige kritische Punkt.*



FIGUR 6

Die Einschränkung von  $L$  auf das Intervall  $[\varphi, \psi]$

*Beweis.* Die Teilmenge  $W_{\text{Koh}}$  von  $W$  ist selbst wieder konvex und die Randpunkte von  $W_{\text{Koh}}$  sind auch Randpunkte von  $W$ . Die Behauptung folgt nun nach Lemma 3.4.  $\square$