

Zeitschrift: Elemente der Mathematik
Herausgeber: Schweizerische Mathematische Gesellschaft
Band: 3 (1948)
Heft: 1

Artikel: Das Horner'sche Schema für komplexe Funktionswerte
Autor: Buchner, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-13569>

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: 12.01.2026

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

mit (3) $P(t)$ als Stützfunktion einer Kurve E^* auf und erhalten als Koordinaten des allgemeinen Punktes von E^*

$$\begin{aligned}x &= P(t) \cos t - P'(t) \sin t = x_S, \\y &= P(t) \sin t + P'(t) \cos t = y_S,\end{aligned}$$

das heißt E^* ist mit E' identisch. Die Normale in S hat somit den Richtungswinkel $\varphi + \beta/2$, w. z. b. w.

Ähnlich wie oben findet man mit (2)

$$P''\left(\varphi + \frac{\beta}{2}\right)\left(1 + \frac{\beta'}{2}\right) = \frac{P'(\varphi + \beta) - P'(\varphi)}{2 \sin \beta/2} \left(1 + \frac{\beta'}{2}\right) + \frac{\beta'}{2} \cdot \frac{d(\varphi + \beta) - d(\varphi)}{2 \sin \beta/2}.$$

Hieraus ergibt sich mit (2) und (4) ein stetiger Krümmungsradius für E^* :

$$\rho^* = P(t) + P''(t) = \frac{1}{\sin \beta/2} \cdot \frac{2 d(\varphi) d(\varphi + \beta)}{d(\varphi) + d(\varphi + \beta)} > 0.$$

E^* ist also eine Eilinie. Schreibt man diesen Ausdruck in der Form

$$\frac{1}{\rho^*} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{d(\varphi)} + \frac{1}{d(\varphi + \beta)} \right\} \cos \frac{\alpha}{2},$$

wo $\alpha = 180^\circ - \beta$ der Winkel zwischen den Berührungsstrecken $d(\varphi)$ und $d(\varphi + \beta)$ ist, so erhält man folgende geometrische Deutung: Die in den Berührungspunkten mit E auf $d(\varphi)$ und $d(\varphi + \beta)$ errichteten Lote schneiden auf der Normalen in S zwei Stücke SA und SB heraus, deren harmonisches Mittel der Krümmungsradius ρ^* ist, das heißt, der Krümmungsmittelpunkt ist der vierte harmonische Punkt zu S und A , B . Für die Ellipse ($d(\varphi) + d(\varphi + \beta) = r_1 + r_2 = 2a$) ist dieser Satz sowie auch die Formel für ρ^* längst bekannt¹⁾. Macht man von dieser Tatsache Gebrauch, so kann man natürlich die oben durch Rechnung gefundene Verallgemeinerung auch «elementar» ableiten. Man lege zu diesem Zweck den Faden um ein konkaves Polygon. Vom Stift wird offenbar eine aus Ellipsenbögen zusammengesetzte Kurve beschrieben. Die Tangente ist stetig in den Übergangsstellen, die Krümmung hingegen nicht. Diese Unstetigkeit verschwindet, wenn man das Polygon in eine glatte Kurve ohne geradlinige Stücke übergehen lässt.

ERNST TROST, Zürich.

Das Hornersche Schema für komplexe Funktionswerte

Zur Berechnung der Funktionswerte ganzer rationaler Funktionen mit reellen Koeffizienten wird wohl stets das ungemein praktische Hornersche Schema²⁾ verwendet. Weniger bekannt scheint zu sein, daß L. COLLATZ³⁾ gezeigt hat, daß sich dieses Schema für die Berechnung der Funktionswerte solcher Funktionen an einer komplexen Stelle $x_0 = u + v i$ abändern läßt. Es sei

$$f(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + a_2 x^{n-2} + \cdots + a_{n-1} x + a_n; \quad (a_k \text{ reell})$$

¹⁾ Vgl. DINGELDEY, I. c., S. 73.

²⁾ W. G. HORNER, Transaction, London 1819.

³⁾ Das Hornersche Schema für komplexe Wurzeln. Z. angew. Math. Mech., 20, Nr. 4 (1940).

Um $f(u+vi)$ zu berechnen, bestimmen wir zunächst

$$\begin{aligned} x_0^2 &= u^2 + 2uv i - v^2 = 2u(u+vi) - (u^2 + v^2) \\ &= 2ux_0 - (u^2 + v^2) = px_0 + q. \end{aligned}$$

Jetzt dividieren wir das Polynom $f(x)$ durch $x^2 - px - q$. Es ist

$$\begin{array}{rcl} (a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_2 x^{n-2} + a_3 x^{n-3} + \dots + a_{n-2} x^2 + a_{n-1} x + a_n) : (x^2 - px - q) & = & a_0 x^{n-2} \\ \hline a_0 x^n - p a_0 x^{n-1} - q a_0 x^{n-2} & & + a'_1 x^{n-3} \\ \hline (a_1 + p a_0) x^{n-1} + (a_2 + q a_0) x^{n-2} & & + a'_2 x^{n-4} \\ \hline a'_1 x^{n-1} - p a'_1 x^{n-2} - q a'_1 x^{n-3} & & + a'_3 x^{n-5} \\ \hline (a_2 + p a'_1 + q a_0) x^{n-2} + (a_3 + q a'_1) x^{n-3} & & \dots \dots \dots \\ \hline a'_2 x^{n-2} - p a'_2 x^{n-3} - q a'_2 x^{n-4} & & + a'_{n-2} \\ \hline (a_3 + p a'_2 + q a'_1) x^{n-3} + (a_4 + q a'_2) x^{n-4} & & \\ \hline a'_3 x^{n-3} & & \\ \hline \dots \dots \dots & & \\ \hline (a_{n-2} + p a'_{n-3} + q a'_{n-4}) x^2 + (a_{n-1} + q a'_{n-3}) x & & \\ \hline a'_{n-2} x^2 - p a'_{n-2} x - q a'_{n-2} & & \\ \hline (a_{n-1} + p a'_{n-2} + q a'_{n-3}) x + (a_n + q a'_{n-2}) & & \\ \hline a'_{n-1} & & a'_n \end{array}$$

Hieraus entnimmt man für die Koeffizienten des Quotienten

$$f_2(x) = a'_0 x^{n-2} + a'_1 x^{n-3} + a'_2 x^{n-4} + \dots + a'_{n-3} x + a'_{n-2}$$

das folgende Bildungsgesetz

$$\begin{aligned} a'_0 &= a_0, \quad a'_1 = a_1 + p a_0, \quad a'_k = a_k + p a'_{k-1} + q a'_{k-2} \quad (k = 2, 3, \dots, n-1) \\ a'_n &= a_n + q a'_{n-2}. \end{aligned}$$

Somit gilt

$$f(x) = (x^2 - px - q) f_2(x) + a'_{n-1} x + a'_n,$$

und daraus folgt für $x = x_0$ der gesuchte Funktionswert

$$f(x_0) = a'_{n-1} x_0 + a'_n = (a'_{n-1} u + a'_n) + a'_{n-1} v i. \quad (1)$$

Das Schema von COLLATZ hat daher die einfache Form

$$\begin{array}{ccccccccc} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ p & | & p a_0 & p a'_1 & p a'_2 & \dots & p a'_{n-3} & p a'_{n-2} \\ q & | & q a_0 & q a'_1 & \dots & q a'_{n-4} & q a'_{n-3} & q a'_{n-2} \\ \hline a_0 = a'_0 & a'_1 & a'_2 & a'_3 & \dots & a'_{n-2} & a'_{n-1} & a'_n \end{array}$$

Zur Berechnung von $f(x_0)$ sind nach (1) nur die Koeffizienten a'_{n-1} und a'_n notwendig.

Beispiel. Es sollen die komplexen Wurzeln der Gleichung

$$f(x) = x^4 - 4x^3 + 5,94x^2 - 4x + 1 = 0 \quad (2)$$

berechnet werden. Diese Gleichung hat nur wenig verschiedene Koeffizienten von jenen der Gleichung

$$g(x) = x^4 - 4x^3 + 6x^2 - 4x + 1 = (x-1)^4 = 0$$

mit der vierfachen Wurzel $x=1$. In dieser neuen Gleichung ist nur ein Koeffizient um 1% geändert gegenüber der gegebenen Gleichung, daher ist zu erwarten, daß die Wurzeln der Gleichungen nur wenig voneinander verschieden sein werden.

Wir setzen als ersten Näherungswert für eine komplexe Wurzel der Gleichung (2)

$$x_0 = 0,9 + 0,5i.$$

Dann ist

$$x_0^2 = 1,8x_0 - (0,81 + 0,25) = 1,8x_0 - 1,06 = p x + q.$$

Wir berechnen den Funktionswert $f(0,9 + 0,5i)$ nach dem Schema von COLLATZ:

$$\begin{array}{r} & 1 & -4 & 5,94 & -4 & \dots & 1 \\ \begin{array}{c|ccccc} 1,8 & & 1,8 & -3,96 & 1,656 & - \\ -1,06 & & - & -1,06 & 2,332 & -0,9752 \\ \hline & 1 & -2,2 & 0,92 & -0,012 & 0,0248 \end{array} \end{array}$$

Daher wird

$$f(x_0) = -0,012(0,9 + 0,5i) + 0,0248 = \underline{\underline{0,014 - 0,006i}}.$$

Wir verbessern den Wurzelwert x_0 nach dem Newtonschen Verfahren, das auch im Bereich der komplexen Zahlen gültig bleibt. Danach ist

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

ein besserer Näherungswert. $f'(x_0)$ wird wiederum nach dem Schema von COLLATZ berechnet:

$$\begin{array}{r} & 4 & -12 & 11,88 & -4 \\ \begin{array}{c|ccccc} 1,8 & & 7,2 & -8,64 & \\ -1,06 & & & -4,24 & 5,088 \\ \hline & 4 & -4,8 & -1 & 1,088 \end{array} \end{array}$$

$$f'(x_0) = -1 \cdot (0,9 + 0,5i) + 1,088 = \underline{\underline{0,188 - 0,5i}}.$$

Der verbesserte Wurzelwert ergibt sich zu

$$x_1 = 0,9 + 0,5i - \frac{0,014 - 0,006i}{0,188 - 0,5i} \approx \underline{\underline{0,880 + 0,479i}}.$$

Wir wiederholen das Verfahren mit dem einfacheren Näherungswert $x_1 = 0,88 + 0,48i$,

dann wird $x_1^2 = 1,76 x_1 - 1,0048$. Bei der Berechnung beschränken wir uns auf 5 Dezimalen.

$$\begin{array}{r} 1 \quad -4 \quad 5,94 \quad -4 \quad 1 \\ 1,76 \quad | \quad 1,76 \quad -3,9424 \quad 1,74733 \\ -1,0048 \quad | \quad \quad \quad -1,0048 \quad 2,25075 \quad -0,99757 \\ \hline 1 \quad -2,24 \quad 0,9928 \quad -0,00192 \quad 0,00243 \end{array}$$

$$f(x_1) \approx -0,00192(0,88 + 0,48i) + 0,00243 \approx \underline{0,00074 - 0,00092i}.$$

Für die Ableitung ergibt sich

$$\begin{array}{r} 4 \quad -12 \quad 11,88 \quad -4 \\ 1,76 \quad | \quad 7,04 \quad -8,7296 \\ -1,0048 \quad | \quad \quad \quad -4,0192 \quad 4,98381 \\ \hline 4 \quad -4,96 \quad -0,8688 \quad 0,98381 \end{array}$$

$$f'(x_1) \approx -0,8688(0,88 + 0,48i) + 0,98381 \approx \underline{0,21927 - 0,41702i}.$$

Damit erhalten wir den Wurzelwert abermals verbessert:

$$x_2 \approx 0,88 + 0,48i - \frac{0,00074 - 0,00092i}{0,21927 - 0,41702i} \approx \underline{0,87754 + 0,47952i}.$$

Bemerkung. Wir haben dieses Beispiel gewählt, obwohl die Konvergenz des Newtonschen Verfahrens in der Nachbarschaft einer vierfachen Nullstelle der Vergleichsfunktion als ungünstig zu erwarten war, weil eine reziproke Gleichung auch direkt auf quadratische Gleichungen zurückführbar ist. Dividieren wir die gegebene Gleichung durch x^2 und setzen

$$u = x + \frac{1}{x},$$

dann wird

$$u^2 - 4u + 3,94 = 0 \quad \text{und} \quad u = 2 \pm \sqrt{0,06}.$$

Somit wird

$$x^2 - x(2 \pm \sqrt{0,06}) + 1 = 0,$$

und wir erhalten die vier Lösungen

$$x_1 = 0,61262, \quad x_2 = 1,63232, \quad x_{3,4} = 0,87753 \pm 0,47953i.$$

Wird in der Gleichung $(x-1)^4=0$ lediglich der Koeffizient 6 um 1% geändert, so ändern die Wurzeln ihren Wert bis zu 60%. Unseres Wissens hat zuerst A. OSTROWSKI auf diesen Zusammenhang hingewiesen. P. BUCHNER, Basel.