

<b>Zeitschrift:</b>	Mitteilungen / Vereinigung Schweizerischer Versicherungsmathematiker = Bulletin / Association des Actuaires Suisses = Bulletin / Association of Swiss Actuaries
<b>Herausgeber:</b>	Vereinigung Schweizerischer Versicherungsmathematiker
<b>Band:</b>	53 (1953)
<b>Artikel:</b>	Die Taylorsche Reihe der generalisierten Poukkaschen Funktion und ihre Anwendung
<b>Autor:</b>	Lah, Ivo
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-550960">https://doi.org/10.5169/seals-550960</a>

### 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:** 19.02.2026

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

## Die Taylorsche Reihe der generalisierten Poukkaschen Funktion und ihre Anwendung

Von *Ivo Lah*, Ljubljana

Die generalisierte Poukkasche Funktion definieren wir

$$\frac{S_{x+1}^{(n+1)} S_{x+1}^{(n-1)}}{[S_{x+1}^{(n)}]^2} = k_n(x+1, i) = k_n, \quad (1)$$

wo  $S_{x+1}^{(n)}$  die  $n$ -te Summe der diskontierten Zahlen  $D_x$  bedeutet, nämlich

$$S_{x+1}^{(n)} = \sum_{t=1}^{\omega-x} \binom{n-1+t}{n} D_{x+t}. \quad (2)$$

Speziell haben wir:

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_{x+1} D_{x+1}}{N_{x+1}^2} &= k_0(x+1, i) = k_0 \\ \frac{S_{x+1}^{(2)} N_{x+1}}{S_{x+1}^{(2)}} &= k_1(x+1, i) = k_1 \\ \frac{S_{x+1}^{(3)} S_{x+1}}{[S_{x+1}^{(2)}]^2} &= k_2(x+1, i) = k_2 \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Aus der generalisierten Poukkaschen Funktion (1) lassen sich bekanntlich die meisten und darunter die besten Näherungsformeln des Zinsfussproblems herleiten. Bei allen diesen Herleitungen wurde bis jetzt die Grösse  $k_n$  als Konstante angenommen. Es stellt sich die Frage, wie sich die Formeln des Zinsfussproblems ändern, wenn man  $k_n$  nicht mehr als Konstante, sondern als Funktion des Zinsfusses  $i$  betrachtet. Diese Aufgabe können wir nur so lösen, dass wir die generalisierte Poukkasche Funktion  $k_n$  in die Taylorsche Reihe in bezug auf den Zinsfuss  $i$  entwickeln. Zu diesem Zwecke führen wir zwei Hilfsfunktionen ein, und zwar:

$$h_n = \frac{n+1}{n} k_n, \quad (4)$$

$$M_n = (-1)^n n! \frac{S_{x+1}^{(n)}}{D_x}. \quad (5)$$

Die Grenzwerte von  $h_n$  sind <sup>1)</sup>

$$1 < h_n \leq \frac{n+1}{n}. \quad (6)$$

Die Summen der diskontierten Zahlen  $S_{x+1}^{(n)}$  in (1) ersetzen wir durch die Hilfsfunktion  $M_n$  aus (5). Wir bekommen so:

$$h_n = \frac{M_{n+1} M_{n-1}}{M_n^2} = \frac{M_{n+1} v^{n+1} M_{n-1} v^{n-1}}{(M_n v^n)^2} = \frac{d^{n+1} a}{d i^{n+1}} \cdot \frac{d^{n-1} a}{d i^{n-1}} : \left( \frac{d^n a}{d i^n} \right)^2. \quad (7)$$

wo  $v$  den Diskontfaktor und  $a = a_x(i)$  den Barwert der konstanten nachschüssigen lebenslänglichen Leibrente bedeutet.

Die Funktion  $M_n v^n$  hat die merkwürdige Eigenschaft, dass ihre Ableitungen und Integrale nach  $i$  einfach durch Änderung von  $n$  gebildet werden <sup>1)</sup>. Es ist

$$\frac{d^\nu (M_n v^n)}{d i^\nu} = M_{n+\nu} v^{n+\nu}. \quad (8)$$

Infolgedessen können die Ableitungen von  $h_n$  (7) leicht berechnet werden. Man findet:

$$\left. \begin{aligned} h'_n &= \frac{M_{n+1} v}{M_n} (h_{n+1} h_n - 2h_n + 1) \\ h''_n &= \left( \frac{M_{n+1} v}{M_n} \right)^2 (h_{n+2} h_{n+1}^2 h_n - 6h_{n+1} h_n + 2h_{n+1} + 6h_n - 3) \\ h'''_n &= \left( \frac{M_{n+1} v}{M_n} \right)^3 (h_{n+3} h_{n+2}^2 h_{n+1}^3 h_n - 8h_{n+2} h_{n+1}^2 h_n + 3h_{n+2} h_{n+1}^2 - \\ &\quad - 6h_{n+1}^2 h_n + 36h_{n+1} h_n - 14h_{n+1} - 24h_n + 12) \\ h''''_n &= \left( \frac{M_{n+1} v}{M_n} \right)^4 (h_{n+4} h_{n+3}^2 h_{n+2}^3 h_{n+1}^4 h_n - 10h_{n+3} h_{n+2}^2 h_{n+1}^3 h_n + \\ &\quad + 4h_{n+3} h_{n+2}^2 h_{n+1}^3 - 20h_{n+2} h_{n+1}^3 h_n + 60h_{n+2} h_{n+1}^2 h_n - 25h_{n+2} h_{n+1}^2 + \\ &\quad + 90h_{n+1}^2 h_n - 20h_{n+1}^2 - 240h_{n+1} h_n + 100h_{n+1} + 120h_n - 60) \\ &\dots \end{aligned} \right\} (9)$$

<sup>1)</sup> «Eine neue Funktion der Versicherungsmathematik und ihre Anwendung», Mitteilungen der Vereinigung schweizerischer Versicherungsmathematiker, 51. Band, Heft 2, 15. Oktober 1951, Seite 191–210.

Die Grösse  $\frac{M_{n+1} v}{M_n}$  kann am besten nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$\frac{M_{n+1} v}{M_n} = -h_n h_{n-1} h_{n-2} \dots h_2 h_1 k_0 \frac{M_0}{p_x} \quad (10)$$

in welcher  $M_0 = a = a_x(i)$  und  $p_x$  die einjährige Erlebenswahrscheinlichkeit bedeutet.

Insofern wir eine Tafel von  $h_n$ -Werten für  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ , welche zum Zinsfusse  $i_0$  berechnet sind, zur Verfügung haben, können wir die Funktion  $h_n$  mittels der Formeln (9) in die Taylorsche Reihe

$$h_n = {}^0 h_n + \Delta {}^0 h'_n + \frac{1}{2!} \Delta^2 {}^0 h''_n + \frac{1}{3!} \Delta^3 {}^0 h'''_n + \dots \quad (11)$$

entwickeln, in welcher  $\Delta = i - i_0$ . Durch Multiplikation der Reihe (11) mit  $\frac{n}{n+1}$  gemäss (4) bekommen wir die Taylorsche Reihe der generalisierten Poukkaschen Funktion (1):

$$k_n = {}^0 k_n + \Delta {}^0 k'_n + \frac{1}{2!} \Delta^2 {}^0 k''_n + \frac{1}{3!} \Delta^3 {}^0 k'''_n + \dots \quad (12)$$

An der unteren und an der oberen Grenze (6) ist  $h_n$  unabhängig von  $i$ . Die Ableitungen von  $h_n$  müssen daher an beiden Grenzen gleich Null sein, d. h. für

$$h_n = 1 \quad \text{und} \quad h_n = \frac{n+1}{n} \quad (13)$$

müssen die Polynome in (9) verschwinden, was als Kontrolle der Rechnung dienen kann.

Je kleiner die Variabilität von  $k_n$  ist, desto rascher konvergiert die Reihe (12). In den höheren Altern haben wir eine raschere Konvergenz als in den niederen. Desgleichen konvergiert die Reihe von  $k_{n+1}$  rascher als die Reihe von  $k_n$ . Anhand der slowenischen Volkssterbtafel, männliches Geschlecht, Beobachtungsperiode 1931–1933, welche wir im folgenden mit STM bezeichnen wollen, haben wir für das Alter  $x+1 = 40$  und für den Grundzinsfuss  $i_0 = 3\%$  folgende Taylorsche Reihe gefunden:

$$k_1(40, i) = 0.80288 + 2.0656 \Delta - 4.4850 \Delta^2 - 46.961 \Delta^3 + 250.72 \Delta^4 + \dots \quad (14)$$

In der Tabelle 1 sind die exakten Werte von  $k_1(40, i)$  für die Zinsfusse  $i = 0\%, 1\%, 2\%, 4\%, 5\%, 6\%$ , 6 und die entsprechenden Fehler  $F_\nu$  für  $\nu = 1, 2, 3, 4$  gegeben. Der Fehler  $F_\nu$  bedeutet die Differenz zwischen dem Näherungswerte, wenn die Reihe (14) beim  $\nu$ -ten Gliede abgebrochen wird, und dem exakten Werte.

Tabelle 1

Zinsfuss $i$	Exakter Wert $k_1(40, i)$	Fehler			
		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
0 %	0.73831	+ 0.00260	— 0.00144	— 0.00017	+ 0.00003
1 %	0.76018	+ 0.00139	— 0.00040	— 0.00002	+ 0.00002
2 %	0.78182	+ 0.00040	— 0.00005	0.00000	0.00000
4 %	0.82305	+ 0.00049	+ 0.00004	— 0.00001	0.00000
5 %	0.84207	+ 0.00212	+ 0.00033	— 0.00005	— 0.00001
6 %	0.85977	+ 0.00508	+ 0.00104	— 0.00023	— 0.00003

Die Abweichungen in der fünften Dezimale stammen wenigstens zum Teil von den vernachlässigten Dezimalen der Grundwerte.

Aus der Reihe

$$h_n = \alpha_0 + \alpha_1 A + \alpha_2 A^2 + \alpha_3 A^3 + \dots \quad (15)$$

können wir unmittelbar, d. h. ohne Formeln (9) die Reihe

$$h_{n+1} = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 A^2 + \beta_3 A^3 + \dots \quad (16)$$

herleiten und umgekehrt. Diesbezügliche Rekursionsformeln ergeben sich aus dem vollständigen Integral der Differentialgleichung (7), welches lautet <sup>1)</sup>:

$$a = \sum_{\nu=0}^{n-2} C_\nu A^\nu + B_n \int \int \dots \int e^{\int \frac{dA}{A - A_n - \int h_n dA}} dA^{n-1}. \quad (17)$$

Wir setzen in (17)  $n = 1$ ,  $n = 2$  und bilden die Gleichung

$$B_1 e^{\int \frac{dA}{A - A_1 - \int h_1 dA}} = C_2 + B_2 \int e^{\int \frac{dA}{A - A_2 - \int h_2 dA}} dA. \quad (18)$$

<sup>1)</sup> «Das Zinsfussproblem», Mitteilungen der Vereinigung schweizerischer Versicherungsmathematiker, 47. Band, Heft 1, 30. April 1947, Seite 242.

Mittels Differentiation eliminieren wir aus (18) die Integrationskonstanten  $B_1$ ,  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  und gelangen so zur folgenden Rekursionsformel

$$h_2 = \frac{1}{h_1^2} [2h_1^2 - h_1 + h'_1(\Delta - A_1 - \int h_1 d\Delta)], \quad (19)$$

welche eine Differenzen-, Differential- und Integralgleichung zugleich darstellt. Auf ähnliche Art und Weise finden wir allgemein

$$h_{n+1} = \frac{1}{h_n^2} [2h_n^2 - h_n + h'_n(\Delta - A_n - \int h_n d\Delta)]. \quad (20)$$

Die Richtigkeit von (20) kann mittels Einsetzung des Wertes von  $h_n$  aus (7) leicht bewiesen werden.

Aus der Anfangsbedingung  $\Delta = 0$  bestimmen wir zunächst die Integrationskonstante  $A_n$  in (20).

Unter Beachtung von (9) und (10) finden wir: (21)

$$A_n = -\frac{{}^0h_n}{{}^0h'_n} ({}^0h_{n+1} {}^0h_n - 2 {}^0h_n + 1) = -\frac{{}^0M_{n-1}}{{}^0M_n v_0} = \frac{p_x}{{}^0h_{n-1} {}^0h_{n-2} \dots {}^0h_1 k_0}.$$

Nachher setzen wir die Reihen von  $h_n$  und  $h_{n+1}$  aus (15) und (16) in (20) ein und entwickeln die rechte Seite von (20) in eine Potenzreihe von  $\Delta$ . Durch Vergleichung der Koeffizienten derselben Potenz  $\Delta^n$  bekommen wir

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= \frac{2\alpha_0 - 1}{\alpha_0} - A_n \frac{\alpha_1}{\alpha_0^2} \\ \beta_1 &= \frac{\alpha_1(2 - \alpha_0)}{\alpha_0^2} - 2A_n \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_0^2} - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_0^3} \right) \\ \beta_2 &= \frac{2\alpha_0\alpha_2(3 - 2\alpha_0) + 3\alpha_1^2(\alpha_0 - 2)}{2\alpha_0^3} - 3A_n \left( \frac{\alpha_3}{\alpha_0^2} - \frac{2\alpha_1\alpha_2}{\alpha_0^3} + \frac{\alpha_1^3}{\alpha_0^4} \right) \\ \beta_3 &= \frac{2\alpha_0\alpha_1\alpha_2(7\alpha_0 - 12) + 3\alpha_0^2\alpha_3(4 - 3\alpha_0) + 6\alpha_1^3(2 - \alpha_0)}{3\alpha_0^4} - \\ &\quad - 4A_n \left( \frac{\alpha_4}{\alpha_0^2} - \frac{2\alpha_1\alpha_3 + \alpha_2^2}{\alpha_0^3} + \frac{3\alpha_1^2\alpha_2}{\alpha_0^4} - \frac{\alpha_1^4}{\alpha_0^5} \right) \\ &\quad \dots \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Alle  $\beta$ -Koeffizienten können somit als Funktionen von  $\alpha$ -Koeffizienten dargestellt werden. Zu beachten ist, dass  $\beta_n$  auch von  $\alpha_{n+1}$  abhängt. Daraus schliessen wir, dass  $(n+1)$  Glieder der Reihe von  $h_n$  etwa dieselbe Präzision ergeben wie  $n$  Glieder der Reihe von  $h_{n+1}$ . Aus den Gleichungen (22) ist ersichtlich, dass man mit Ausnahme von  $\alpha_0$  auch umgekehrt die  $\alpha$ -Koeffizienten als Funktionen von  $\beta$ -Koeffizienten ausdrücken kann.

Obige Ausführungen beziehen sich auf die Taylorsche Reihenentwicklung von  $k_1, k_2, k_3, \dots$ . Die Taylorsche Reihe von  $k_0$  muss dagegen gesondert berechnet werden. Aus (3) und (5) folgt

$$k_0 = -\frac{M_1 v}{M_0^2} p_x. \quad (23)$$

Unter Beachtung von (8) können auch die Ableitungen von  $k_0$  leicht berechnet werden. Es ist:

$$\left. \begin{aligned} k'_0 &= k_0 \left( \frac{k_0 M_0}{p_x} \right) [2 - h_1] \\ k''_0 &= k_0 \left( \frac{k_0 M_0}{p_x} \right)^2 [6 - 6h_1 + h_1^2 h_2] \\ k'''_0 &= k_0 \left( \frac{k_0 M_0}{p_x} \right)^3 [24 - 36h_1 + (6h_1^2 + 8h_1^2 h_2) - h_1^3 h_2^2 h_3] \\ k''''_0 &= k_0 \left( \frac{k_0 M_0}{p_x} \right)^4 [120 - 240h_1 + (90h_1^2 + 60h_1^2 h_2) - \\ &\quad - (20h_1^3 h_2 + 10h_1^3 h_2^2 h_3) + h_1^4 h_2^3 h_3^2 h_4] \\ k''''''_0 &= k_0 \left( \frac{k_0 M_0}{p_x} \right)^5 [720 - 1800h_1 + (1080h_1^2 + 480h_1^2 h_2) - \\ &\quad - (90h_1^3 + 360h_1^3 h_2 + 90h_1^3 h_2^2 h_3) + \\ &\quad + (20h_1^4 h_2^2 + 30h_1^4 h_2^2 h_3 + 12h_1^4 h_2^3 h_3^2 h_4) - h_1^5 h_2^4 h_3^2 h_4^2 h_5] \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

An den beiden Grenzen, d. i. für  $k_0 = 0$  und  $k_0 = k_n = 1$  werden die Ableitungen von  $k_0$  — ähnlich wie die Ableitungen von  $h_n$  — gleich Null, wie man sich durch Einsetzung von  $h_n = \frac{n+1}{n}$  in (24) überzeugen kann. Damit können die Formeln (24) kontrolliert werden.

Nebenbei bemerken wir, dass die Koeffizienten bzw. die Summen der Koeffizienten in runden Klammern () in (24) die Produkte der Stirlingschen Zahlen  $\mathfrak{S}_n^v$  und der Faktoriellen  $v!$  darstellen. Weil:

$$\sum_{v=1}^n (-1)^v v! \mathfrak{S}_n^v = (-1)^n \quad (25)$$

muss die Summe der Koeffizienten in jedem Polynome (24) gleich 1 sein, was ebenfalls als Kontrolle der Rechnung dienen kann.

Infolge der grösseren Variabilität von  $k_0$  konvergiert die Reihe

$$k_0 = {}^0k_0 + \Delta {}^0k'_0 + \frac{1}{2!} \Delta^2 {}^0k''_0 + \frac{1}{3!} \Delta^3 {}^0k'''_0 + \dots \quad (26)$$

nicht so rasch wie die Reihe von  $k_1$ . Anhand der STM haben wir für  $x+1 = 40$  und  $i_0 = 3\%$  folgende Reihe bekommen: (27)

$$k_0(40, i) = 0.75216 + 4.0731 \Delta - 27.257 \Delta^2 + 17.358 \Delta^3 + 1099.3 \Delta^4 - 7440.3 \Delta^5 + \dots$$

Die exakten Werte von  $k_0(40, i)$  für  $i = 0\%, 1\%, 2\%, 4\%, 5\%, 6\%$  als auch die entsprechenden Fehler  $F_v$ , wenn die Reihe (27) beim  $v$ -ten Gliede abgebrochen wird, sind in der Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2

Zinsfuss $i$	Exakter Wert $k_0(40, i)$	Fehler				
		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
0%	0.60603	+ 0.02394	- 0.00059	- 0.00106	- 0.00017	+ 0.00001
1%	0.65987	+ 0.01083	- 0.00007	- 0.00021	- 0.00003	- 0.00001
2%	0.70871	+ 0.00272	- 0.00001	- 0.00003	- 0.00002	- 0.00002
4%	0.79023	+ 0.00266	- 0.00007	- 0.00005	- 0.00004	- 0.00004
5%	0.82303	+ 0.01059	- 0.00031	- 0.00017	+ 0.00001	- 0.00001
6%	0.85103	+ 0.02332	- 0.00121	- 0.00074	+ 0.00015	- 0.00003

Die Reihen von  $k_0$  konvergieren nicht immer monoton. Durch Hinzufügung eines neuen Gliedes kann der Näherungswert von  $k_0$  vorübergehend auch verschlechtert werden.

\* \* \*

Wir wollen nun an den einfachsten Beispielen zeigen, wie sich die Näherungsformeln des Zinsfussproblems ändern, wenn man die Annahme  $k_n = \text{Konstante}$  fallen lässt. Für  $n = 1$  bekommen wir aus (17)

$$a = M_0 = B e^{\int \frac{d\Delta}{\Delta - A_1 - \int h_1 d\Delta}} \quad (28)$$

wo  $a$  den exakten Barwert der konstanten nachschüssigen lebenslänglichen Leibrente darstellt. Durch logarithmische Differentiation nach  $\Delta$  bekommen wir aus (28)

$$\frac{M_1 v}{M_0} = \frac{1}{\Delta - A_1 - \int h_1 d\Delta} \quad (29)$$

oder

$$A_1 = \Delta - \frac{M_0}{M_1 v} - \int h_1 d\Delta. \quad (30)$$

Aus der Anfangsbedingung  $\Delta = 0$  folgt im Einklange mit (21)

$$A_1 = -\frac{^0 M_0}{^0 M_1 v_0}. \quad (31)$$

Wenn wir in (28)  $h_1 = {}^0 h_1$  setzen, dann bekommen wir

$$a_{(1)} = B \left[ \frac{{}^0 M_0}{{}^0 M_1 v_0} + \Delta (1 - {}^0 h_1) \right]^{\frac{1}{1-{}^0 h_1}} \quad (32)$$

wo  $a_{(1)}$  den Näherungswert von  $a$  darstellt. Die Integrationskonstante  $B$  in (32) bestimmen wir so, dass im Falle  $\Delta = 0$ ,  $a_{(1)} = {}^0 a = {}^0 M_0$  wird.

Also

$$B = {}^0 a \left( \frac{{}^0 M_1 v_0}{{}^0 M_0} \right)^{\frac{1}{1-{}^0 h_1}}. \quad (33)$$

Nach Einsetzung des Wertes von  $B$  aus (33) in (32) bekommen wir die wohlbekannte Güttingersche Näherungsformel<sup>1)</sup>:

$$a_{(1)} = {}^0 a \left[ 1 + \frac{(1 - {}^0 h_1) v_0 \Delta {}^0 M_1}{{}^0 M_0} \right]^{\frac{1}{1-{}^0 h_1}}. \quad (34)$$

Nun setzen wir  $h_1 = {}^0 h_1 + \Delta {}^0 h'_1$ . (35)

So verbesserten Näherungswert von  $a$  bezeichnen wir mit  $a_{(2)}$ .

<sup>1)</sup> Güttinger, Paul: «Zwei Beiträge zum Zinsfussproblem», Mitteilungen der Vereinigung schweizerischer Versicherungsmathematiker, 30. Heft, Oktober 1935.

Aus (28), (31) und (35) folgt

$$a_{(2)} = B e^{- \int -\frac{^0 M_0}{^0 M_1 v_0} + (^0 h_1 - 1) \Delta + 0.5 ^0 h'_1 \Delta^2}. \quad (36)$$

Das im Exponent der Formel (36) auftretende Integral nimmt drei verschiedene Formen an, je nachdem die Diskriminante

$$D = (^0 h_1 - 1)^2 - 4 \left( -\frac{^0 M_0}{^0 M_1 v_0} \right) 0.5 ^0 h'_1 = 1 + ^0 h_1^2 (2 ^0 h_2 - 3) \geq 0. \quad (37)$$

Dementsprechend bekommen wir aus (36) folgende drei Formen der verbesserten Güttingerschen Näherungsformel:

$$\left. \begin{aligned} a_{(2,1)} &= {}^0 a \left( \frac{\Delta {}^0 h'_1 + {}^0 h_1 - 1 + \sqrt{D}}{\Delta {}^0 h'_1 + {}^0 h_1 - 1 - \sqrt{D}} \frac{{}^0 h_1 - 1 - \sqrt{D}}{{}^0 h_1 - 1 + \sqrt{D}} \right)^{\frac{1}{\sqrt{D}}} \\ a_{(2,2)} &= {}^0 a e^{-\frac{2 \Delta {}^0 h'_1}{\Delta {}^0 h'_1 (^0 h_1 - 1) + (^0 h_1 - 1)^2}} \\ a_{(2,3)} &= {}^0 a e^{-\frac{2}{\sqrt{-D}} \operatorname{arctg} \frac{\Delta {}^0 h'_1 \sqrt{-D}}{\Delta {}^0 h'_1 (^0 h_1 - 1) + (^0 h_1 - 1)^2 - D}} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Für  $x+1 = 40$  und  $i_0 = 3\%$  haben wir anhand der STM folgende Näherungsformel gefunden:

$$\left. \begin{aligned} a_{(2,3)} &= {}^0 a e^{-4.12945 \operatorname{arctg} \frac{2.00081 \Delta}{2.50247 \Delta + 0.60152}} \\ {}^0 a &= a_{39}(3\%) = 18.116 \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Die Tabelle 3 enthält die exakten Werte von  $a_{39}(i)$  für  $i = 0\%, 1\%, 2\%, 4\%, 5\%, 6\%$  als auch die entsprechenden Fehler der Güttingerschen Formel (34) und der verbesserten Näherungsformel (39).

Tabelle 3

Zinsfuss $i$	Exakter Wert $a_{39}(i)$	Fehler von	
		$a_{(1)}$	$a_{(2,3)}$
0 %	28.948	-0.157	+ 0.003
1 %	24.433	-0.033	0.000
2 %	20.907	-0.002	-0.001
4 %	15.879	+ 0.002	-0.001
5 %	14.062	+ 0.011	0.000
6 %	12.570	+ 0.030	+ 0.001

Die Näherungswerte  $a_{(2,3)}$  sind also bedeutend besser als  $a_{(1)}$ .

Setzen wir weiter

$$h_1 = {}^0 h_1 + \Delta {}^0 h'_1 + \frac{1}{2} \Delta^2 {}^0 h''_1. \quad (40)$$

Den zum zweiten Male verbesserten Näherungswert von  $a$  bezeichnen wir mit  $a_{(3)}$ . Aus (28) und (40) folgt

$$a_{(3)} = B e^{- \int -\frac{d\Delta}{-\frac{{}^0 M_0}{{}^0 M_1 v_0} + ({}^0 h_1 - 1)\Delta + 0.5 {}^0 h'_1 \Delta^2 + \frac{1}{6} {}^0 h''_1 \Delta^3}}. \quad (41)$$

Der Polynom unter dem Integralzeichen in (41) kann haben:

1. drei reelle verschiedene Wurzeln  $\alpha, \beta, \gamma$ ;
2. drei reelle gleiche Wurzeln  $\alpha, \alpha, \alpha$ ;
3. drei reelle Wurzeln, von denen zwei gleich sind  $\alpha, \alpha, \beta$ ;
4. eine reelle und zwei komplexe oder imaginäre Wurzeln  $\alpha, \mu + \nu i, \mu - \nu i$ , wobei  $-2\mu = \beta$  und  $\mu^2 + \nu^2 = \gamma$ .

Dementsprechend bekommen wir aus (41) folgende vier Formen der zum zweiten Male verbesserten Göttingerschen Näherungsformel

$$\left. \begin{aligned} a_{(3,1)} &= {}^0 a \left[ \left( 1 - \frac{\Delta}{\alpha} \right)^{\frac{1}{(\alpha-\beta)(\alpha-\gamma)}} \left( 1 - \frac{\Delta}{\beta} \right)^{\frac{1}{(\beta-\alpha)(\beta-\gamma)}} \left( 1 - \frac{\Delta}{\gamma} \right)^{\frac{1}{(\gamma-\alpha)(\gamma-\beta)}} \right]^{-\frac{6}{{}^0 h''_1}} \\ a_{(3,2)} &= {}^0 a e^{\frac{3}{{}^0 h''_1} \left[ \frac{1}{(\Delta-\alpha)^2} - \frac{1}{\alpha^2} \right]} \\ a_{(3,3)} &= {}^0 a \left[ \frac{\Delta-\alpha}{\Delta-\beta} \frac{\beta}{\alpha} \right]^{\frac{6}{{}^0 h''_1 (\alpha-\beta)^2}} e^{\frac{6\Delta}{(\Delta-\alpha)(\alpha-\beta){}^0 h''_1}} \\ a_{(3,4)} &= {}^0 a \left[ \frac{\sqrt{\Delta^2 + \Delta\beta + \gamma}}{\alpha - \Delta} \frac{\alpha}{\sqrt{\gamma}} \right]^{\frac{6}{(\alpha^2 + \alpha\beta + \gamma){}^0 h''_1}} e^{\frac{12\alpha + 6\beta}{{}^0 h''_1 (\alpha^2 + \alpha\beta + \gamma)\sqrt{4\gamma - \beta^2}}} \operatorname{arctg} \frac{\Delta\sqrt{4\gamma - \beta^2}}{\Delta\beta + 2\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Wir können weiter setzen

$$h_1 = {}^0 h_1 + \Delta {}^0 h'_1 + \frac{1}{2} \Delta^2 {}^0 h''_1 + \frac{1}{6} \Delta^3 {}^0 h'''_1 \quad (43)$$

und so die Göttingersche Formel (34) zum dritten Male verbessern. Wir sehen jedoch davon ab. Die Formeln sind kompliziert und weisen ausserdem nichts wesentlich Neues oder Interessantes auf. Für die Bedürfnisse der Versicherungspraxis reichen schon die Formeln (38) vollkommen aus. Wir bemerken nur, dass aus (43) neun Formen der verbesserten Näherungsformel  $a_{(4,1)}, a_{(4,2)}, a_{(4,3)}, \dots, a_{(4,9)}$  resultieren, je nachdem die Wurzeln des zu integrierenden Polynoms reell, komplex, gleich, verschieden usw. sind.

Für  $n = 2$  bekommen wir aus (17)

$$a = C + B \int e^{\int \frac{d\Delta}{\Delta - A_2 - \int h_2 d\Delta}} d\Delta. \quad (44)$$

Die erste Ableitung von (44) nach  $\Delta$  lautet

$$-Iv = M_1 v = B e^{\int \frac{d\Delta}{\Delta - A_2 - \int h_2 d\Delta}}. \quad (45)$$

Die Grösse  $I = (Ia)_x$  bedeutet den Barwert der steigenden nachschüssigen lebenslänglichen Leibrente. Die Gleichung (45) bekommen wir aus (28)

einfach so, dass wir  ${}^0a = M_0$  mit  $-Iv = M_1 v$ ,  $A_1 = -\frac{{}^0M_0}{{}^0M_1 v_0}$  mit  $A_2 = -\frac{{}^0M_1}{{}^0M_2 v_0}$  und  $h_1$  mit  $h_2$  vertauschen. Infolgedessen können wir die verschiedenen Näherungsformeln der steigenden Rente  $I$  gleich niederschreiben.

Wenn wir  $h_2 = {}^0h_2$  setzen, bekommen wir analog (34)

$$I_{(1)} = {}^0I \frac{v_0}{v} \left[ 1 + \frac{(1 - {}^0h_2) v_0 \Delta {}^0M_2}{{}^0M_1} \right]^{\frac{1}{1 - {}^0h_2}}. \quad (46)$$

Wenn wir  $h_2 = {}^0h_2 + \Delta {}^0h'_2$  setzen, bekommen wir analog den Formeln (37) und (38)

$$D = 1 + {}^0h_2^2 (2 {}^0h_3 - 3) \equiv 0. \quad (47)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{(2,1)} &= {}^0I \frac{v_0}{v} \left( \frac{\Delta {}^0h'_2 + {}^0h_2 - 1 + \sqrt{D}}{\Delta {}^0h'_2 + {}^0h_2 - 1 - \sqrt{D}} \frac{{}^0h_2 - 1 - \sqrt{D}}{{}^0h_2 - 1 + \sqrt{D}} \right)^{\frac{1}{\sqrt{D}}} \\ I_{(2,2)} &= {}^0I \frac{v_0}{v} e^{-\frac{2 \Delta {}^0h'_2}{\Delta {}^0h'_2 ({}^0h_2 - 1) + ({}^0h_2 - 1)^2}} \\ I_{(2,3)} &= {}^0I \frac{v_0}{v} e^{-\frac{2}{\sqrt{-D}} \operatorname{arctg} \frac{\Delta {}^0h'_2 \sqrt{-D}}{\Delta {}^0h'_2 ({}^0h_2 - 1) + ({}^0h_2 - 1)^2 - D}} \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Für  $x + 1 = 40$  und  $i_0 = 3\%$  haben wir anhand der STM folgende Näherungsformel gefunden:

$$\left. \begin{aligned} I_{(2,3)} &= {}^0I \frac{v_0}{v} e^{-6.67706 \operatorname{arctg} \frac{0.520684 \Delta}{0.453006 \Delta + 0.15763}} \\ {}^0I &= (Ia)_{39,3\%} = 256.32 \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

Die Tabelle 4 enthält die exakten Werte von  $I = (Ia)_{39}$  für  $i = 0\%, 1\%, 2\%, 4\%, 5\%, 6\%$  und die Fehler der Näherungsformeln (46) und (49).

Tabelle 4

Zinsfuss $i$	Exakter Wert $(Ia)_{39}$	Fehler von	
		$I_{(1)}$	$I_{(2,3)}$
0 %	511·94	+ 2·54	— 0·03
1 %	401·05	+ 0·54	— 0·01
2 %	318·52	+ 0·05	— 0·01
4 %	208·88	— 0·03	0·00
5 %	172·26	— 0·16	+ 0·01
6 %	143·68	— 0·42	+ 0·01

\* \* \*

Die Taylorschen Reihen der Poukkaschen Funktionen  $k_1, k_2, k_3, \dots$  ermöglichen die Verbesserung der Näherungsformeln des Zinsfussproblems bis zur beliebig hohen Präzision. Die Schattenseite solcher Verbesserungen bildet die verhältnismässig grosse Rechenarbeit, welche man dabei zu bewältigen hat. Es gibt jedoch gewisse Gebiete des Zinsfussproblems, in welchen sich die Anwendung der Taylorschen Reihen von  $k_n$  sehr einfach gestaltet. Zwei solche Beispiele geben wir im folgenden.

I. Gegeben sind zwei Rentenbarwerte  ${}^0a = a_x(i_0)$  und  ${}^1a = a_x(i_1)$ , aus welchen man mit verschiedenen Inter- und Extrapolationsmethoden mehr oder weniger genaue Näherungswerte von  $a = a_x(i)$  berechnen kann. Bezeichnen wir mit  $m_1$  und  $m_2$  zwei solche Interpolations- bzw. Extrapolationswerte von  ${}^0a$  und  ${}^1a$ . Die lineare Kombination

$$m_1 f_1 + m_2 (1 - f_1) = m_{1,2} \quad (50)$$

wo  $f_1$  eine rationale Funktion von  $k_1 = k_1(x + 1, i)$  bedeutet, stellt einen verbesserten Näherungswert von  $a$  dar<sup>1)</sup>. Dieses Verfahren kann unbegrenzt fortgesetzt werden. Die lineare Kombination

$$m_{1,2} f_2 + m_{3,4} (1 - f_2) = m_{1,2-3,4} \quad (51)$$

<sup>1)</sup> «Noch einige praktische Interpolationsformeln des Zinsfussproblems von hoher Präzision», Mitteilungen der Vereinigung schweizerischer Versicherungsmathematiker, 52. Band, Heft 2, 15. Oktober 1952, Seite 161–172.

wo  $f_2$  eine rationale Funktion von  $k_1$  und  $k_2$  bedeutet, stellt einen weiter verbesserten Näherungswert von  $a$  dar. Die Funktionen  $f_1$  und  $f_2$  sind meistens sehr einfach. Bei der arithmetischen und harmonischen Inter- bzw. Extrapolation ist z. B.  $f_1 = k_1$  usw. Ähnliche ebenfalls sehr einfache Formeln haben wir auch bei den Verbesserungen der Inter- und Extrapolationswerte der steigenden Rente bzw.  ${}^0 I v_0$  und  ${}^1 I v_1$ . In diesem Gebiete des Zinsfussproblems haben also die Taylor-schen Reihen von  $k_n$  nicht nur einen theoretischen, sondern auch einen bedeutenden praktischen Wert.

II. Das vollständige Integral der Differentialgleichung (23) lautet

$$\frac{1}{a} = c + \frac{1}{p_x} \int k_0 d\Delta \quad (52)$$

oder nach Bestimmung der Integrationskonstante  $c$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{a} &= \frac{1}{{}^0 a} + \frac{1}{p_x} \int k_0 d\Delta \\ &= \frac{1}{{}^0 a} + \frac{1}{p_x} (\Delta {}^0 k_0 + \frac{1}{2} \Delta^2 {}^0 k'_0 + \frac{1}{6} \Delta^3 {}^0 k''_0 + \dots) \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

Anhand der STM haben wir für  $x+1 = 40$  und  $i_0 = 3\%$  folgende Reihe gefunden:

$$\frac{1}{a_{39}(i)} = 0.0551998 + 0.75821 \Delta + 2.0529 \Delta^2 - 9.1587 \Delta^3 + \dots \quad (54)$$

Die exakten Werte von  $a_{39}(i)$  als auch die entsprechenden Fehler  $F_\nu$ , wenn die Reihe (54) beim  $\nu$ -ten Gliede abgebrochen wird, sind in der Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5

Zinsfuss $i$	Exakter Wert $a_{39}(i)$	Fehler		
		$F_1$	$F_2$	$F_3$
0 %	28.948	+ 1.865	+ 0.206	- 0.003
1 %	24.433	+ 0.545	+ 0.043	- 0.001
2 %	20.907	+ 0.094	+ 0.003	- 0.001
4 %	15.879	+ 0.049	- 0.003	0.000
5 %	14.062	+ 0.150	- 0.014	0.000
6 %	12.570	+ 0.259	- 0.038	+ 0.001

Mit Hilfe der Taylorschen Reihe von  $k_0$  können also die Näherungswerte von  $a$  bis zur beliebig hohen Präzision ohne viel Rechenarbeit berechnet werden. Aus dem Näherungswerte von  $a$  kann weiter auch der Barwert der steigenden Rente näherungsweise leicht berechnet werden, und zwar nach der Formel

$$I = \frac{k_0 a^2}{v p_x}. \quad (55)$$

Die Taylorsche Reihe von  $k_0$  hat also im allgemeinen einen bedeutenden praktischen Wert.