

Über die Stieltjès'schen Integrale.

Autor(en): **Nef, Walter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Commentarii Mathematici Helvetici**

Band (Jahr): **16 (1943-1944)**

PDF erstellt am: **29.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-15545>

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.

Über die Stieltjès'schen Integrale

Herrn Professor Carathéodory zum siebzigsten Geburtstage gewidmet!

Von WALTER NEF, Zürich

Im Gebiete der in einem reellen Intervall $\langle a, b \rangle$ stetigen Funktionen $f(x)$ sei ein lineares Funktional $A(f(x))$ gegeben, d. h. ein Funktional, welches den beiden Bedingungen genügt:

- I. Es ist $A(f_1(x) + f_2(x)) = A(f_1(x)) + A(f_2(x))$ für zwei beliebige in $\langle a, b \rangle$ stetige Funktionen $f_1(x)$ und $f_2(x)$.
- II. Es existiert eine von $f(x)$ unabhängige Konstante M , so daß

$$|A(f(x))| \leq M \cdot F$$

ist, wo F das Maximum des Betrages von $f(x)$ in $\langle a, b \rangle$ bedeutet.

F. Riesz hat bewiesen¹⁾, daß es dann immer eine Funktion $\alpha(x)$ gibt, die in $\langle a, b \rangle$ definiert und daselbst von beschränkter Schwankung ist, so daß der Funktionalwert für jede in $\langle a, b \rangle$ stetige Funktion $f(x)$ gleich dem Stieltjès'schen Integral

$$A(f(x)) = \int_a^b f(x) d[\alpha(x)] \quad (1)$$

ist. Umgekehrt ist es klar, daß jede Funktion $\alpha(x)$, die in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung ist, im Gebiete aller in $\langle a, b \rangle$ stetigen Funktionen ein lineares Funktional gemäß (1) definiert. Denn daß Eigenschaft I erfüllt ist, ist offensichtlich, und die totale Variation von $\alpha(x)$ in $\langle a, b \rangle$ hat die von der Konstanten M verlangte Eigenschaft.

In dieser Arbeit stellen wir die Frage nach den Bedingungen dafür, daß zwei Funktionen $\alpha_1(x)$ und $\alpha_2(x)$, die beide in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung sind, im Gebiet aller in $\langle a, b \rangle$ stetigen Funktionen dasselbe Funktional erzeugen.

1. $\alpha(x)$ sei in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung. Wir stellen zuerst fest, daß der rechts- bzw. linksseitige Grenzwert

$$\alpha(x \pm 0)$$

¹⁾ Démonstration nouvelle d'un théorème concernant les opérations fonctionnelles linéaires. Ann. de l'Ecole Norm. 31. (1914) p. 9.

für alle Werte von x aus dem offenen Intervall (a, b) existiert²⁾. Im folgenden verstehen wir unter $\tilde{\alpha}(x \pm 0)$ die im abgeschlossenen Intervall $\langle a, b \rangle$ definierte Funktion:

$$\tilde{\alpha}(x \pm 0) = \begin{cases} \alpha(a) & \text{für } x = a \\ \alpha(x \pm 0) & \text{für } x \in (a, b) \\ \alpha(b) & \text{für } x = b. \end{cases} \quad (2)$$

$\tilde{\alpha}(x \pm 0)$ ist in $\langle a, b \rangle$ wieder von beschränkter Schwankung³⁾.

Lemma 1. $\alpha(x)$ sei in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung. Dann ist

$$\int_a^b f(x) d[\alpha(x)] = \int_a^b f(x) d[\tilde{\alpha}(x + 0)] = \int_a^b f(x) d[\tilde{\alpha}(x - 0)]$$

für jede in $\langle a, b \rangle$ stetige Funktion $f(x)$.

Beweis: Wir betrachten die Differenz:

$$\int_a^b f(x) d[\alpha(x)] - \int_a^b f(x) d[\tilde{\alpha}(x \pm 0)] = \int_a^b f(x) d[\alpha(x) - \tilde{\alpha}(x \pm 0)],$$

von der wir beweisen müssen, daß sie gleich null ist. Da $\alpha(x)$ als Funktion von beschränkter Schwankung höchstens abzählbar viele Unstetigkeitsstellen hat⁴⁾, sind $\alpha(x)$ und $\tilde{\alpha}(x \pm 0)$ höchstens in einer abzählbaren Menge von x -Werten voneinander verschieden. Es ist also:

$$\alpha(x) - \tilde{\alpha}(x \pm 0) = 0 \quad (3)$$

für alle x in (a, b) mit Ausnahme einer höchstens abzählbaren Menge. Für die Werte $x = a$ und $x = b$ ist (3) erfüllt nach der Definition (2) der Funktion $\tilde{\alpha}(x \pm 0)$. Daraus folgt die Behauptung ohne weiteres, wenn wir an die Definition des Stieltjes'schen Integrals denken⁵⁾, da wir die für die Bildung desselben notwendigen Unterteilungen des Intervalls $\langle a, b \rangle$ stets so wählen können, daß die Unterteilungspunkte der nach dem Vorhergehenden in $\langle a, b \rangle$ überall dichten Menge der Stetigkeitspunkte von $\alpha(x)$ angehören.

²⁾ Carathéodory, S. 186 (1).

³⁾ Carathéodory, S. 187, Satz 8.

⁴⁾ Carathéodory, S. 188, Satz 10.

⁵⁾ Lebesgue, S. 253.

Satz 2. $\alpha(x)$ sei in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung und es sei

$$\bar{\alpha}(x \pm 0) \equiv \alpha(a) = \alpha(b) = \text{const.}$$

Dann ist

$$\int_a^b f(x) d[\alpha(x)] = 0$$

für alle in $\langle a, b \rangle$ stetigen Funktionen $f(x)$.

Beweis: Nach Lemma 1 ist

$$\int_a^b f(x) d[\alpha(x)] = \int_a^b f(x) d[\bar{\alpha}(x \pm 0)].$$

Aus der Voraussetzung folgt aber unmittelbar, daß das letztere Integral gleich null ist.

Satz 3. Es sei

$$\int_a^b f(x) d[\alpha(x)] = 0$$

für jede in $\langle a, b \rangle$ stetige Funktion $f(x)$. Dann ist

$$\bar{\alpha}(x \pm 0) \equiv \text{const. in } \langle a, b \rangle.$$

Beweis: Wir beweisen den Satz für die Funktion $\bar{\alpha}(x + 0)$. Der Beweis für $\bar{\alpha}(x - 0)$ geht analog. Es sei $a \leq x < b$. Wir bilden folgende Schar von in $\langle a, b \rangle$ stetigen Funktionen:

$$s_\varepsilon(\xi, x) = \begin{cases} 1 & \text{für } a \leq \xi \leq x \\ \text{linear} & \text{für } x \leq \xi \leq x + \varepsilon \\ 0 & \text{für } x + \varepsilon \leq \xi \leq b. \end{cases}$$

Wir behaupten, daß

$$\bar{\alpha}(x + 0) - \alpha(a) = \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} \int_a^b s_\varepsilon(\xi, x) d[\alpha(\xi)] \quad (4)$$

ist. Es ist nämlich:

$$\bar{\alpha}(x + 0) - \alpha(a) = \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} \alpha(x + \varepsilon) - \alpha(a) = \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} \int_a^{x+\varepsilon} d[\alpha(\xi)].$$

Nun folgt aus der Definition von $s_\varepsilon(\xi, x)$:

$$\int_a^x d[\alpha(\xi)] = \int_a^x s_\varepsilon(\xi, x) d[\alpha(\xi)] \quad \text{und} \quad \int_{x+\varepsilon}^b s_\varepsilon(\xi, x) d[\alpha(\xi)] = 0.$$

Wir haben also, um (4) zu beweisen, nur zu zeigen, daß

$$\lim_{s \rightarrow +0} \int_x^{x+s} d[\alpha(\xi)] = \lim_{s \rightarrow +0} \int_x^{x+s} s_s(\xi, x) d[\alpha(\xi)],$$

oder daß

$$\lim_{s \rightarrow +0} \int_x^{x+s} (1 - s_s(\xi, x)) d[\alpha(\xi)] = 0 \quad (5)$$

ist. Nun definieren wir in $\langle x, x + \varepsilon \rangle$ eine Funktion $u(\xi)$:

$$u(\xi) = \begin{cases} \alpha(x + 0) - \alpha(x) & \text{für } \xi = x, \\ 0 & \text{für } \xi > x. \end{cases} \quad (6)$$

Wegen

$$\alpha(\xi) = (\alpha(\xi) + u(\xi)) - u(\xi)$$

ist dann:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow +0} \int_x^{x+s} (1 - s_s(\xi, x)) d[\alpha(\xi)] &= \lim_{s \rightarrow +0} \int_x^{x+s} (1 - s_s(\xi, x)) d[\alpha(\xi) + u(\xi)] \\ &\quad - \lim_{s \rightarrow +0} \int_x^{x+s} (1 - s_s(\xi, x)) d[u(\xi)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Wir betrachten das erste der beiden letzten Integrale. Aus der Definition von $u(\xi)$ folgt, daß die Funktion $\alpha(\xi) + u(\xi)$ für $\xi = x$ gleich ihrem rechtsseitigen Grenzwert ist:

$$\alpha(x) + u(x) = \alpha(x + 0) + u(x + 0). \quad (8)$$

Nun bedeute $t(x, x + \varepsilon)$ die totale Variation der Funktion $\alpha(\xi) + u(\xi)$ in $\langle x, x + \varepsilon \rangle$. Wir behaupten, daß

$$\lim_{s \rightarrow +0} t(x, x + \varepsilon) = 0 \quad (9)$$

ist. Dazu genügt es wegen (8) zu zeigen, daß

$$\lim_{s \rightarrow +0} t(x, x + \varepsilon) = \alpha(x + 0) + u(x + 0) - \alpha(x) - u(x) \quad (10)$$

ist. Da $\alpha(\xi) + u(\xi)$ mit $\alpha(\xi)$ von beschränkter Schwankung ist, gibt es zwei monoton wachsende Funktionen $p(\xi)$ und $n(\xi)$, so daß in $\langle x, x + \varepsilon \rangle$:

$$\alpha(\xi) + u(\xi) = p(\xi) - n(\xi)$$

ist ⁶⁾.

⁶⁾ Carathéodory, S. 184, Satz 1.

Nun bedeute $p(v, w)$ bzw. $n(v, w)$ die totale Variation von $p(\xi)$ bzw. $n(\xi)$ in $\langle v, w \rangle$. Da $p(\xi)$ und $n(\xi)$ monoton wachsende Funktionen sind, ist:

$$\begin{aligned} p(x, x + \varepsilon) &= p(x + \varepsilon) - p(x) \\ n(x, x + \varepsilon) &= n(x + \varepsilon) - n(x), \end{aligned}$$

also auch:

$$\begin{aligned} \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} p(x, x + \varepsilon) &= p(x + 0) - p(x) \\ \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} n(x, x + \varepsilon) &= n(x + 0) - n(x). \end{aligned} \tag{11}$$

Von den beiden rechts stehenden Werten ist stets mindestens einer gleich null ⁷⁾. Wir nehmen an, es sei etwa

$$n(x + 0) - n(x) = 0.$$

(Im Falle $p(x + 0) - p(x) = 0$ geht man genau gleich vor.)

Da

$$t(x, x + \varepsilon) = p(x, x + \varepsilon) + n(x, x + \varepsilon)$$

ist ⁸⁾, so wird wegen (11):

$$\begin{aligned} \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} t(x, x + \varepsilon) &= p(x + 0) - p(x) = \\ &= p(x + 0) - n(x + 0) - p(x) + n(x). \end{aligned}$$

Damit ist (10) und infolgedessen (9) bewiesen.

Nun ist das erste der beiden Integrale auf der rechten Seite von (7)

$$\left| \int_x^{x+\varepsilon} (1 - s_\varepsilon(\xi)) d[\alpha(\xi) + u(\xi)] \right| \leq t(x, x + \varepsilon),$$

da

$$|1 - s_\varepsilon(\xi, x)| \leq 1$$

ist ⁹⁾. Also ist:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow +0} \int_x^{x+\varepsilon} (1 - s_\varepsilon(\xi, x)) d[\alpha(\xi) + u(\xi)] = 0.$$

Für das zweite Integral folgt aus der Definition (6) der Funktion $u(\xi)$:

$$\int_x^{x+\varepsilon} (1 - s_\varepsilon(\xi, x)) d[u(\xi)] = (1 - s_\varepsilon(x, x)) \cdot [\alpha(x) - \alpha(x + 0)].$$

⁷⁾ Carathéodory, S. 187 (2).

⁸⁾ Carathéodory, S. 183 (2).

⁹⁾ Lebesgue, S. 254.

Wegen $s_s(x, x) = 1$ ist dieser letzte Ausdruck gleich 0. Damit ist (5) mittels (7) und infolgedessen auch (4) bewiesen. Da aber $s_s(\xi, x)$ in $\langle a, b \rangle$ stetig ist, folgt aus (4) und der Voraussetzung des Satzes:

$$\tilde{\alpha}(x + 0) - \alpha(a) = 0 ,$$

womit der Satz für $a \leq x < b$ bewiesen ist. Wäre nun $\alpha(b) \neq \alpha(a)$, so wäre

$$\int_a^b 1 \cdot d[\alpha(x)] = \alpha(b) - \alpha(a) \neq 0 ,$$

was gegen die Voraussetzung des Satzes ist.

Hauptsatz 4. $\alpha_1(x)$ und $\alpha_2(x)$ seien in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung. Dann und nur dann ist

$$\int_a^b f(x) d[\alpha_1(x)] = \int_a^b f(x) d[\alpha_2(x)]$$

für jede in $\langle a, b \rangle$ stetige Funktion $f(x)$, wenn

$$\tilde{\alpha}_1(x \pm 0) - \tilde{\alpha}_2(x \pm 0) = \text{const.} \quad (12)$$

ist, wo

$$\tilde{\alpha}_v(x \pm 0) = \left\{ \begin{array}{ll} \alpha_v(a) & \text{für } x = a \\ \alpha_v(x \pm 0) & \text{für } a < x < b \\ \alpha_v(b) & \text{für } x = b \end{array} \right\} v = 1, 2 \text{ ist.}$$

Dabei erhalten wir zwei richtige Sätze, je nachdem wir beidemal das obere Vorzeichen oder beidemal das untere nehmen.

Beweis: a) (12) sei erfüllt. Dann ist nach Satz 2:

$$\int_a^b f(x) d[\alpha_1(x)] - \int_a^b f(x) d[\alpha_2(x)] = \int_a^b f(x) d[\alpha_1(x) - \alpha_2(x)] = 0 .$$

b) Es sei

$$\int_a^b f(x) d[\alpha_1(x)] = \int_a^b f(x) d[\alpha_2(x)]$$

für jede in $\langle a, b \rangle$ stetige Funktion $f(x)$. Dann ist:

$$\int_a^b f(x) d[\alpha_1(x) - \alpha_2(x)] = 0 ,$$

also nach Satz 3:

$$\tilde{\alpha}_1(x \pm 0) - \tilde{\alpha}_2(x \pm 0) = \text{const.}$$

Korollar 5. $\alpha_1(x)$ und $\alpha_2(x)$ seien in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung, und es sei

$$\bar{\alpha}_1(x+0) - \bar{\alpha}_2(x+0) = \text{const.}$$

Dann ist auch

$$\bar{\alpha}_1(x-0) - \bar{\alpha}_2(x-0) = \text{const.}$$

und umgekehrt.

2. Man kann offenbar die Gesamtheit aller Funktionen, die in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung sind, in Klassen einteilen durch die Forderung, daß zwei Funktionen $\alpha(x)$ und $\beta(x)$ dann und nur dann zur selben Klasse gehören, wenn ihre rechts- (links-) seitigen Limesfunktionen $\bar{\alpha}(x+0)$ und $\bar{\beta}(x+0)$ ($\bar{\alpha}(x-0)$ und $\bar{\beta}(x-0)$) sich höchstens um eine additive Konstante unterscheiden (betreffend der Definition von $\bar{\alpha}(x \pm 0)$, $\bar{\beta}(x \pm 0)$ vergleiche (2)). Hauptsatz 4 sagt dann aus, daß die Menge der linearen Funktionalen im Gebiet der in $\langle a, b \rangle$ stetigen Funktionen $f(x)$ umkehrbar eindeutig auf die Menge aller Klassen abgebildet ist, wenn wir als Bild einer Klasse das durch ihre Funktionen $\alpha(x)$ vermöge des Stieltjes'schen Integrals

$$A(f(x)) = \int_a^b f(x) d[\alpha(x)]$$

dargestellte eindeutig bestimmte lineare Funktional auffassen. Statt der Klasse nehmen wir jetzt eine der rechts-(links-)seitigen Limesfunktionen $\bar{\alpha}(x+0)$ ($\bar{\alpha}(x-0)$) ihrer Elemente (die sich alle nur um eine additive Konstante unterscheiden), und bezeichnen diese mit $\alpha^*(x)$. Dann erhalten wir nach Lemma 1 wieder jedes lineare Funktional genau einmal in der Form

$$A(f(x)) = \int_a^b f(x) d[\alpha^*(x)].$$

Hauptsatz 6. *Das Stieltjes'sche Integral*

$$\int_a^b f(x) d[\alpha(x)]$$

erzeugt jedes lineare Funktional im Gebiete der in $\langle a, b \rangle$ stetigen Funktionen $f(x)$ genau einmal, wenn $\alpha(x)$ alle Funktionen durchläuft, die in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung und im Innern (a, b) rechts-(links-)seitig stetig sind. Dabei sind solche Funktionen $\alpha(x)$, die sich nur um eine additive Konstante unterscheiden, als nicht verschieden zu betrachten.

Dieser Satz ist nach dem Vorhergehenden bewiesen, wenn wir die Richtigkeit der folgenden beiden Hilfssätze gezeigt haben:

Hilfssatz 7. $\alpha(x)$ sei in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung. Dann ist $\alpha(x \pm 0)$ in (a, b) rechts- bzw. linksseitig stetig.

Hilfssatz 8. $\alpha(x)$ sei in $\langle a, b \rangle$ von beschränkter Schwankung und in (a, b) rechts- bzw. linksseitig stetig. Dann existiert in $\langle a, b \rangle$ eine Funktion $\beta(x)$, die daselbst von beschränkter Schwankung ist, und so, daß

$$\alpha(x) = \tilde{\beta}(x + 0) \quad \text{bzw.} \quad \alpha(x) = \tilde{\beta}(x - 0) \quad \text{ist.}$$

Beweis von Hilfssatz 7: Man hat zu beweisen, daß

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow +0} (\lim_{\eta \rightarrow +0} \alpha(x \pm \varepsilon \pm \eta)) = \lim_{\eta \rightarrow +0} \alpha(x \pm \eta)$$

ist. Das ist aber richtig, sobald $\tilde{\alpha}(x \pm 0)$ existiert¹⁰⁾, was in unserem Fall erfüllt ist.

Beweis von Hilfssatz 8: Es ist nämlich:

$$\alpha(x) = \tilde{\alpha}(x + 0) \quad \text{bzw.} \quad \alpha(x) = \tilde{\alpha}(x - 0) .$$

(Eingegangen den 3. März 1943.)

L I T E R A T U R :

- O. Carathéodory, Vorlesungen über reelle Funktionen, Leipzig 1927 (zitiert als „Carathéodory“).
H. Lebesgue, Leçons sur l'intégration et la recherche des fonctions primitives, Paris 1928 (zitiert als „Lebesgue“).

¹⁰⁾ Enzyklopädie der math. Wiss. Leipzig, Teubner, 1899—1916, Bd. III, 1. Hälfte, S. 50, Alinea 1.