

Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Classe

der

k. b. Akademie der Wissenschaften

zu München.

Band XXVI. Jahrgang 1896.

München.

Verlag der K. Akademie.

1897.

In Commission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth).

Ueber die sogenannte Grenze und die Grenzgebiete zwischen Convergenz und Divergenz.

Von Alfred Pringsheim.

(Eingelaufen 12. Dezember.)

§ 1. Ueber die Du Bois-Reymond'sche Function $\tau(\alpha)$ als Grenze zwischen Convergenz und Divergenz.

In seinen „Untersuchungen über die Convergenz und Divergenz der Fourier'schen Darstellungsformeln“¹⁾ hat Du Bois-Reymond eine Function $\tau(\alpha)$ eingeführt,²⁾ welche für $\alpha = 0$ ohne Maxima und Minima verschwindet und „die Grenze der Convergenz und Divergenz des Integrals:

$$\int_0^a d\alpha \cdot \frac{\tau(\alpha)}{\alpha}$$

bildet“. Dazu bemerkt er zunächst in einer erläuternden Fussnote: „Die Einführung dieser Function $\tau(\alpha)$ kann als Widerspruch mit dem Schluss angesehen werden, dass es keine Function gibt, welche die Grenze zwischen Convergenz und Divergenz bildet. **Ein Widerspruch ist indessen hier nicht vorhanden.** Die genauere Erörterung dieser etwas subtilen Frage werde ich demnächst an anderem Orte geben.“³⁾ Hier nur in Kürze die Andeutung, dass die Function τ zu den von der

¹⁾ Abh. d. bayer. Akad. d. W., Cl. II, Bd. XII (1876).

²⁾ A. a. O. Einleitung, p. XV.

³⁾ Dies ist, so viel ich weiss, leider nicht geschehen.

Seite der Divergenz wie von der Seite der Convergenz her sich ihr nähernden Functionen in ähnlicher Beziehung steht, wie der Kreis zu den ihm umschriebenen und eingeschriebenen Linien“

Dies mag auf den ersten Blick ganz plausibel erscheinen, auch wenn man davon absieht, dass das zur Erläuterung herangezogene Beispiel des Kreises als Grenze der umschriebenen und eingeschriebenen Polygone durchaus unpassend gewählt ist. Denn der Kreis kann unabhängig von jenem Grenz-Process reingeometrisch oder analytisch vollständig definirt werden: derselbe erscheint also bei dem fraglichen Grenz-Process als ein **a priori** schon vorhandenes Object, welches lediglich zu einer unendlichen Folge von umschriebenen oder eingeschriebenen Polygonen in eine gewisse Beziehung gesetzt wird, genau so, wie z. B. die **rationale** Grenze eines unbegrenzten periodischen Decimalbruches zu der betreffenden Folge von endlichen Decimalbrüchen.

Im übrigen führt gerade diese letzte Bemerkung unmittelbar auf ein völlig zutreffendes Analogon, nämlich die Einführung der Irrationalzahlen auf Grund der Cantor'schen Definitions-Methode.¹⁾ Hier wird einer passend gewählten unbegrenzten Folge von rationalen Zahlen (z. B. einem nicht-periodischen unbegrenzt fortsetzbaren Decimalbruche) ein neues Zahlzeichen und damit eine neue Zahl zugeordnet und als Grenze jener Folge von Rationalzahlen **bezeichnet**. Dieser neuen Zahl können dann bestimmte **Eigenschaften** nur in der Weise beigelegt werden, dass dieselben durch entsprechende Eigen-

¹⁾ Du Bois-Reymond verwirft freilich in seiner „Allgemeinen Functionen-Theorie“ (Tübingen 1882) jene „rein formale“ Auffassungsweise des Zahlbegriffes (a. a. O. p. 55), ohne aber etwas besseres oder überhaupt nur brauchbares an deren Stelle zu setzen. Weder der Du Bois-Reymond'sche „Idealist“, noch sein „Empirist“ gelangen zu einer arithmetisch-strengen Definition des allgemeinen Zahlbegriffes. Was im übrigen bei dieser angeblich „philosophischen“, schwerlich aber „mathematischen“ Betrachtungsweise herauskommt, davon liefert die genauere Untersuchung der in Rede stehenden Function $\tau(a)$ ein be-
redtes Beispiel.

schaften der beteiligten rationalen Zahlen definirt werden. So gilt z. B. jene neue Zahl (Irrationalzahl) als positiv, wenn alle Terme der definirenden Zahlenfolge von irgend einem bestimmten ab über einer gewissen positiven Zahl liegen; sie heisst grösser als irgend eine rationale Zahl a , wenn alle Terme von irgend einem bestimmten ab $\geq a + \varepsilon$ sind (wo $\varepsilon > 0$), u. s. f.

In analoger Weise kann man einer passend gewählten unbegrenzten Functionen-Folge ein neues Functions-Zeichen zuordnen und gelangt damit zur Einführung einer neuen, etwa als Grenz-Function jener Folge zu bezeichnenden Function, sobald es gelingt, für jenes neue Functions-Zeichen bestimmte Eigenschaften, Grössen-Beziehungen, Rechnungs-Operationen durch diejenigen zu definiren, welche den einzelnen Individuen der betreffenden Functionen-Folge zukommen. In diesem Sinne kann man z. B. e^x als Grenz-Function der Folge:

$$\left(1 + \frac{x}{1}\right)^1, \left(1 + \frac{x}{2}\right)^2, \dots, \left(1 + \frac{x}{v}\right)^v, \dots$$

oder $\lg x$ als Grenz-Function der Folge:

$$1 \cdot (\sqrt[1]{x} - 1), 2 \cdot (\sqrt[2]{x} - 1), \dots, v \cdot (\sqrt[v]{x} - 1), \dots$$

einführen.

Von einem Versuche, die fragliche Function $\tau(\alpha)$ in solcher Weise wirklich zu definiren, ist nun freilich bei Du Bois-Reymond mit keinem Worte die Rede. Er sagt darüber lediglich Folgendes:¹⁾

„Wenn man die Grenze zwischen Convergenz und Divergenz auch nicht wirklich darstellen kann, so hindert dies nicht, in den Calcul eine ideale Function $\tau(\alpha)$ einzuführen, von solcher Beschaffenheit, dass das Integral

¹⁾ A. a. O. p. 45.

$$\int_0^a d\alpha \cdot \frac{\tau(\alpha)}{\alpha}$$

convergiert, dass aber jedes Integral

$$\int_0^a d\alpha \cdot \frac{\varphi(\alpha)}{\alpha}$$

divergiert, in welchem $\varphi(\alpha) > \tau(\alpha)$ gedacht sind.“

Ich muss bekennen, dass ich von einer solchen „idealen“ Function keine rechte Vorstellung habe. Angenommen aber, sie liesse sich in dem oben bezeichneten Sinne wirklich definiren, so kann man nach einer bekannten Methode sofort auch Functionen $\tau_1(\alpha) > \tau(\alpha)$ (und sogar: $\tau_1(\alpha) > \tau(\alpha)$) herstellen, für welche das Integral:

$$\int_0^a d\alpha \cdot \frac{\tau_1(\alpha)}{\alpha}$$

ebenfalls noch convergirt: alsdann stellt aber $\tau(\alpha)$ nicht die praetendirte Grenze zwischen Convergenz und Divergenz dar.

Hiernach erscheint die Einführung einer solchen Function $\tau(\alpha)$ unzulässig, nicht deshalb, weil sie durch bekannte Functionen nicht dargestellt werden kann, sondern weil die blosse Annahme ihrer Existenz auf einen logischen Widerspruch führt.

Man könnte nun etwa zur Rettung dieser Function $\tau(\alpha)$ auf die Riemann'schen Flächen hinweisen, deren sich gegenseitig durchsetzende Blätter zwar nicht mit unseren Denkgesetzen, aber, genau genommen, mit unserem¹⁾ geometrischen Vorstellungs-Vermögen im Widerspruche stehen. Man tolerirt aber diesen Widerspruch lediglich wegen des praktischen Nutzens, welchen die fragliche Fiction der Functionentheorie thatsächlich gestiftet hat. Ein solcher ist ihr jedoch aus der Einführung der Function $\tau(\alpha)$ bisher nicht

¹⁾ Vielleicht auch nur mit dem meinigen?

erwachsen¹⁾ und steht auch kaum zu erhoffen: in Folge dessen liegt auch keinerlei Grund vor, die so wunderbar vollkommene und präzise Sprache der Analysis durch dergleichen „ideale“ Zuthaten zu verunzieren.

§ 2. Ueber Grenzgebiete zwischen Convergenz und Divergenz.

Während sich die Annahme einer Grenze zwischen der Convergenz und Divergenz des Integrals

$$\int_0^a d\alpha \cdot \frac{f(\alpha)}{\alpha}$$

als unzulässig erwiesen hat, kann man in gewissem Sinne von Grenzgebieten zwischen der Convergenz und Divergenz eines solchen Integrales reden. Der Sinn und die Tragweite dieses Begriffes soll jetzt einer genaueren Untersuchung unterworfen werden und zwar will ich dieselbe, um sie möglichst elementar zu gestalten, zunächst nicht für ein bestimmtes Integral, sondern für eine unendliche Reihe führen. Dabei kann es sich selbstverständlich lediglich um Reihen mit lauter gleichbezeichneten (etwa positiven) und monoton gegen Null abnehmenden Gliedern handeln, da für andere Reihen (geradeso wie für bestimmte Integrale von Functionen mit unendlich vielen Maximis und Minimis) die Möglichkeit derartiger Betrachtungen a priori ausgeschlossen erscheint.

Es seien nun c_r, d_r ($r = 0, 1, 2, \dots$) zwei monoton gegen Null abnehmende Folgen positiver Zahlen von der Beschaffenheit, dass $\sum c_r$ convergirt, $\sum d_r$ divergirt und dass $d_r > c_r$

¹⁾ Du Bois-Reymond sagt hierüber — am Schlusse der oben citirten Fussnote — selbst Folgendes: „Praktisch braucht man übrigens unter τ nicht die Grenze der Convergenz und Divergenz selbst sich vorzustellen, sondern es genügt, darunter eine Function sich zu denken, die der Grenze näher liegt, als alle anderen in den gerade vorgelegten Calcul eingehenden.“

für jedes endliche ν , $\lim_{\nu=\infty} \frac{d_\nu}{c_\nu} = \infty$. Nach bekannten Sätzen aus der Reihenlehre¹⁾ können hierbei die c_ν und d_ν als „beliebig nahe“ an einander liegend angenommen werden, d. h. so, dass der Quotient $\frac{d_\nu}{c_\nu}$ mit unbegrenzt wachsenden Werthen von ν beliebig langsam ins Unendliche wächst.

Bedeutet jetzt a_ν ($\nu = 0, 1, 2, \dots$) eine andere positive, monotone Zahlenfolge, so convergirt die Reihe Σa_ν , wenn für alle Werthe von ν , zum mindesten von einem bestimmten Werthe $\nu = n$ ab:

$$(A) \quad a_\nu \leq c_\nu;$$

sie divergirt, wenn für $\nu \geq n$:

$$(B) \quad a_\nu \geq d_\nu.$$

Ist dagegen, wie gross auch ν werden mag:

$$(C) \quad c_\nu \leq a_\nu \leq d_\nu,$$

(wobei man die Gleichheitszeichen so zu verstehen hat, dass die schon unter (A) und (B) erledigten Fälle: $a_\nu = c_\nu$, bzw. $a_\nu = d_\nu$ für $\nu \geq n$, wegfallen), so kann die Reihe Σa_ν noch convergiren oder divergiren. Wir wollen alsdann sagen, sie gehöre demjenigen Grenzgebiete zwischen Convergenz und Divergenz an, welches durch die Schranken (c_ν) , (d_ν) definirt wird.

Nun darf man aber ja nicht glauben — und dieser Irrthum ist thatsächlich von Du Bois Reymond und anderen Reihen-Theoretikern begangen worden — dass bei irgend einer Wahl dieser Schranken alle überhaupt möglichen Reihen mit positiven, monoton abnehmenden Gliedern in drei wohlgesonderte Classen vom Charakter (A), (B), (C) zerlegt werden könnten. Vielmehr gilt der folgende Satz:

Wie man auch die monotonen Zahlenfolgen (c_ν) , (d_ν) annehmen mag, so giebt es stets unendlich viele mo-

¹⁾ S. z. B. meine „Allgemeine Theorie der Divergenz und Convergenz etc.“, Math. Ann., Bd. 35.

notone Zahlenfolgen (a'_ν) , welche **keiner** der drei Classen (A), (B), (C) angehören; nämlich solche, welche **eine** der beiden Schranken (c_ν) , (d_ν) oder auch **beide** unendlich oft durchsetzen, also durch eins der folgenden drei Ungleichungs-Paare charakterisirt werden:

$$(A') \quad a_\lambda < c_\lambda \quad c_\mu \leq a_\mu \leq d_\mu$$

$$(B') \quad a_\lambda > d_\lambda \quad c_\mu \leq a_\mu \leq d_\mu$$

$$(C') \quad a_\lambda < c_\lambda \quad a_\mu > d_\mu$$

(Dabei bedeuten die λ und μ von einander verschiedene Zahlen, von denen beide Kategorien in unbegrenzter Anzahl vorkommen und die in den Fällen (A'), (B') die Reihe der ganzen Zahlen ν , zum mindestens für $\nu \geq n$, vollständig erschöpfen).

Beweis. Es bedeute p_ν ($\nu = 0, 1, 2, \dots$) eine ganz willkürlich anzunehmende Folge beliebiger positiver Zahlen, m_0 eine positive ganze Zahl oder auch die Null. Man bestimme sodann eine ganze Zahl $m_1 > m_0$ und weiter eine unbegrenzte Folge wachsender ganzer Zahlen $m_2, m_3, \dots$ in der Weise, dass:

$$p_1 \cdot d_{m_1} < p_0 \cdot c_{m_0}, \quad p_2 \cdot c_{m_2} < p_1 \cdot d_{m_1}, \quad p_3 \cdot d_{m_3} < p_2 \cdot c_{m_2}, \quad \text{u. s. f.,}$$

was offenbar stets (auf unendlich viele Arten) möglich ist, da sowohl die c_ν , als die d_ν mit wachsenden Werthen von ν monoton gegen Null abnehmen. Man erhält durch dieses Verfahren eine unbegrenzte monoton abnehmende Folge von der Form:

$$p_0 \cdot c_{m_0}, p_1 \cdot d_{m_1}, \dots p_{2k} \cdot c_{m_{2k}}, p_{2k+1} \cdot d_{m_{2k+1}}, \dots$$

Setzt man jetzt:

$$(1) \quad p_{2k} \cdot c_{m_{2k}} = a'_{m_{2k}}, \quad p_{2k+1} \cdot d_{m_{2k+1}} = a'_{m_{2k+1}} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

und bestimmt im übrigen a'_ν für alle ganzzahligen Werthe von ν , die zwischen m_λ und $m_{\lambda+1}$ ($\lambda = 0, 1, 2, \dots$) liegen, in der Weise, dass a'_ν für $\nu = m_\lambda, m_\lambda + 1, \dots, m_{\lambda+1}$ monoton von a'_{m_λ} zu $a'_{m_{\lambda+1}}$ abnimmt, so bilden die a'_ν für $\nu = 0, 1, 2, \dots$ eine

unbegrenzte monoton abnehmende Folge, welche unendlich viele Terme von der Form (1) enthält.

Durch passende Wahl der bisher noch willkürlich gelassenen Zahlen p_r kann man schliesslich erreichen, dass die Zahlenfolge (a'_r) einer der drei Classen (A'), (B'), (C') angehört. Nimmt man z. B. $p_{2k} < 1$, $p_{2k+1} > 1$, so wird nach Gl. (1):

$$a'_{m_{2k}} < c_{m_{2k}}, \quad a'_{m_{2k+1}} > d_{m_{2k+1}}^{1)}$$

so dass also die Folge (a'_r) der Classe (C') angehört.

Berücksichtigt man ferner, dass (zum mindesten von einer bestimmten Stelle $r = n$ ab) $d_r > p \cdot c_r$ sein muss, wenn p beliebig > 1 angenommen wird, so folgt für $p_{2k} < 1$,

$$p_{2k+1} \left\{ \begin{array}{l} < 1 \\ \geq \frac{1}{p} \end{array} \right\} :$$

$$a'_{m_{2k}} < c_{m_{2k}}, \quad a'_{m_{2k+1}} = p_{2k+1} \cdot d_{m_{2k+1}} \left\{ \begin{array}{l} < d_{m_{2k+1}} \\ > c_{m_{2k+1}} \end{array} \right.$$

d. h. die Folge (a'_r) gehört in diesem Falle der Classe (A') an.

Analog wird für $p_{2k} \left\{ \begin{array}{l} > 1 \\ \leq p \end{array} \right\}$, $p_{2k+1} > 1$:

$$a'_{m_{2k}} = p_{2k} \cdot c_{m_{2k}} \left\{ \begin{array}{l} > c_{m_{2k}} \\ < d_{m_{2k}} \end{array} \right., \quad a'_{m_{2k+1}} > d_{m_{2k+1}},$$

so dass die Folge (a'_r) zur Classe (B') gehört. —

Aus dem eben bewiesenen Satze ergibt sich nun unmittelbar das folgende Resultat:

Wie man auch die monotonen Zahlenfolgen (c_r) , (d_r) wählen mag, so giebt es stets unendlich viele monoton

¹⁾ Man hat sogar:

$$a'_{m_{2k}} \rightarrow c_{m_{2k}}, \quad a'_{m_{2k+1}} \rightarrow c_{m_{2k+1}},$$

wenn man:

$$\lim_{k=\infty} p_{2k} = 0, \quad \lim_{k=\infty} p_{2k+1} = \infty$$

annimmt.

abnehmende Reihen $\Sigma a'_r$, welche **nicht** dem von den Schranken (c_r) , (d_r) eingeschlossenen **Grenzgebiete** angehören, und deren Convergenz oder Divergenz **dennoch nicht** durch Vergleichung von a'_r mit c'_r oder d'_r entschieden werden kann.

Versteht man insbesondere unter (a'_r) eine monotone Zahlenfolge, welche beide Schranken (c_r) , (d_r) unendlich oft durchsetzt (d. h. den Ungleichungen (C') genügt) und setzt man:

$c_r = \frac{1}{C_r}$, $d_r = \frac{1}{D_r}$, so hat man für unendlich viele Werthe von r :

$$(2) \quad \text{theils: } a'_r < \frac{1}{C_r}, \quad \text{theils: } a'_r > \frac{1}{D_r},$$

also:

$$\text{theils: } D_r \cdot a'_r < \frac{D_r}{C_r}, \quad \text{theils: } C_r \cdot a'_r > \frac{C_r}{D_r},$$

d. h. schliesslich:¹⁾

$$\liminf_{r=\infty} D_r \cdot a'_r = 0, \quad \limsup_{r=\infty} C_r \cdot a'_r = \infty$$

$$\left(\text{wegen: } \lim_{r=\infty} \frac{C_r}{D_r} = \lim_{r=\infty} \frac{d_r}{c_r} = \infty \right),$$

in Worten: Das mit Hülfe der C_r , D_r herstellbare Kriterien-Paar für Convergenz und Divergenz versagt in diesem Falle.

Das gleiche gilt dann offenbar auch von jedem durch weitere Verschärfung²⁾ aus C_r , D_r abzuleitenden Kriterien-Paare. Denn nimmt man $C'_r \prec C_r$, $D'_r \succ D_r$, wo wiederum:

¹⁾ Ich bezeichne als unteren bzw. oberen Limes ($\liminf$ bzw. $\limsup$) das nämliche, was Cauchy als „la plus petite bzw. la plus grande des limites“ zu bezeichnen pflegt. Die nach dem Vorgehen von Du Bois-Reymond neuerdings fast allgemein üblich gewordene, nicht gerade sehr bequeme Bezeichnung: „Untere bzw. obere Unbestimmtheitsgrenze“ ist lediglich ein neuer Name für jenen schon Cauchy vollständig geläufigen Begriff.

²⁾ S. meine oben citirte Convergenz-Theorie, a. a. O. p. 302.

$\lim_{r=\infty} \frac{C_r}{D_r} = \infty$, so bestehen die Ungleichungen (2) a fortiori, auch wenn man C_r , D_r durch C'_r , D'_r ersetzt, und folglich hat man immer wieder:

$$\liminf_{r=\infty} D'_r \cdot a'_r = 0, \quad \limsup_{r=\infty} C'_r \cdot a'_r = \infty.$$

§ 3. Die wahre Schranke für die Convergenz einer unendlichen Reihe.

Aus den Betrachtungen des vorigen Paragraphen geht hervor, dass es in keinem Falle **gleichzeitig** eine allgemein gültige Schranke für die Convergenz und eine solche für die Divergenz in dem Sinne geben kann, dass die Terme aller convergenten Reihen (mit monotonen Gliedern) von irgend einem bestimmten Stellenzeiger ab durchweg unterhalb der einen (oberen) Schranke, die aller divergenten Reihen oberhalb der anderen (unteren) Schranke liegen. Dagegen lässt sich zeigen, dass eine solche Schranke für die Convergenz allein existirt, dass dieselbe aber merklich höher liegt, als von früheren Reihen-Theoretikern angenommen wurde.¹⁾ Es gilt nämlich der folgende Satz:

¹⁾ Hierauf habe ich bereits in der citirten Abhandlung hingewiesen (a. a. O. p. 347 ff.), woselbst auch der hier folgende Satz bereits aufgestellt und bewiesen wird. Ich reproducire denselben hier nochmals, theils wegen seines unmittelbaren Zusammenhanges mit den vorangehenden und noch folgenden Betrachtungen, theils auch, weil der hier gegebene Beweis seines wesentlicheren (zweiten) Theiles mir vollkommener erscheint, als der a. a. O. und Math. Ann., Bd. 37, p. 601 mitgetheilte. Was übrigens den (sehr leicht zu beweisenden) ersten Theil jenes Satzes betrifft, so hat man dessen Richtigkeit wohl seit lange als selbstverständlich angesehen. Bewiesen wurde aber immer nur, dass $\sum a_r$ divergirt, wenn $\lim_{r=\infty} r \cdot a_r > 0$, und daraus folgt nur soviel, dass im Falle der Convergenz von $\sum a_r$ stets $\lim_{r=\infty} r \cdot a_r = 0$ sein muss, falls dieser Grenzwert überhaupt existirt. Gerade diesen Existenz-Beweis liefert aber der erste Theil des fraglichen Satzes.

Bei einer **convergenten** Reihe mit niemals zunehmenden Gliedern hat man allemal:

$$a_r \prec \frac{1}{r} \quad \text{d. h.} \quad \lim_{r=\infty} r \cdot a_r = 0.$$

Bedeutet dagegen (m_r) eine mit r **beliebig langsam** in's Unendliche wachsende monotone Zahlenfolge, so giebt es stets **convergente** Reihen Σa_r mit monotonen Gliedern, für welche:

$$\limsup_{r=\infty} r \cdot m_r \cdot a_r = \infty,$$

d. h. die Reihe Σa_r enthält unendlich viele Terme, welche **infinitär grösser** sind, als die **entsprechenden** der **divergenten** Reihe $\Sigma \frac{1}{r \cdot m_r}$.

Oder anders ausgesprochen:

Für Reihen mit monotonen Termen a_r bildet zwar die Beziehung:

$$\lim_{r=\infty} r \cdot a_r = 0$$

eine **nothwendige Convergenz-Bedingung**, nicht aber irgend eine Beziehung von der Form:

$$\lim_{r=\infty} r \cdot m_r \cdot a_r = 0,$$

wie **langsam** auch m_r mit r in's Unendliche wachsen möge.

Beweis. In Folge der vorausgesetzten Convergenz von Σa_r lässt sich nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Zahl ε eine ganze Zahl m so fixiren, dass für $\mu \geq m$ und jede noch so grosse ganze Zahl ϱ :

$$a_{\mu+1} + a_{\mu+2} + \dots + a_{\mu+\varrho} < \varepsilon.$$

Setzt man hier speciell einmal $\varrho = \mu$, das andere Mal $\varrho = \mu + 1$, und beachtet, dass allgemein $a_r \leq a_{r+1}$, so folgt:

$$\left. \begin{aligned} \mu \cdot a_{2\mu} &\leq a_{\mu+1} + a_{\mu+2} + \dots + a_{2\mu} \\ (\mu+1) \cdot a_{2\mu+1} &\leq a_{\mu+1} + a_{\mu+2} + \dots + a_{2\mu+1} \end{aligned} \right\} < \varepsilon \quad (\mu \geq m)$$

und daher:

$$\begin{aligned} 2\mu \cdot a_{2\mu} &< 2\varepsilon \\ (2\mu+1) \cdot a_{2\mu+1} &< 2(\mu+1) \cdot a_{2\mu+1} < 2\varepsilon \end{aligned}$$

also schliesslich:

$$\nu \cdot a_\nu < 2\varepsilon \quad (\nu \geq 2m)$$

d. h.:

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \nu \cdot a_\nu = 0.$$

Um den zweiten Theil des ausgesprochenen Satzes zu beweisen, wähle man eine für jeden Werth von x , der eine gewisse Zahl x_0 übersteigt, stetige und positive, mit x monoton in's Unendliche wachsende Function $f(x)$ von der Beschaffenheit, dass

$$(1) \quad f(x+1) - f(x) < 1$$

$$(2) \quad f(\nu) < m_\nu.$$

Vermöge der ersten Festsetzungen besitzt die Gleichung:

$$(3) \quad y = f(x) \quad (x > x_0)$$

eine Auflösung von der Form:

$$(4) \quad x = \varphi(y) \quad (\text{also: } \varphi(f(x)) = x = f(\varphi(x))),$$

wo $\varphi(y)$ eine für $y > y_0 = f(x_0)$ eindeutig definirte, positive und mit y monoton in's Unendliche wachsende Function bedeutet.

Alsdann folgt aus Ungl. (1) und Gl. (3):

$$f(x+1) < y+1$$

und daher:

$$\varphi(f(x+1)) = x+1 < \varphi(y+1),$$

also mit Benützung von Gl. (4):

$$(5) \quad \varphi(y+1) - \varphi(y) > 1.$$

Bedeutet jetzt $\sum \frac{1}{C_\lambda}$ eine beliebig anzunehmende convergente Reihe, deren Glieder durchweg der Bedingung genügen:

$$C_\lambda - C_{\lambda-1} \geq 1 \quad (\lambda = 1, 2, 3, \dots),$$

so hat man nach Ungl. (5) auch:

$$(6) \quad \varphi(C_\lambda) - \varphi(C_{\lambda-1}) > 1,$$

so dass also zwischen $\varphi(C_{\lambda-1})$ und $\varphi(C_\lambda)$ stets mindestens eine ganze Zahl liegen muss.

Nun nehme man noch eine Folge positiver, mit wachsendem ν monoton abnehmender Zahlen k_ν so an, dass $\lim_{\nu \rightarrow \infty} k_\nu = k$ von Null verschieden ausfällt (z. B. $k_\nu = k + \frac{1}{\nu}$, $k_\nu = k \cdot e^{\frac{1}{\nu}}$ etc.) und setze:

$$(7) \quad a_\nu = \frac{k_\nu}{C_{\lambda-1} \cdot \varphi(C_\lambda)}$$

für alle ganzzahligen Werthe ν , welche durch die Bedingung definirt sind:

$$(8) \quad \varphi(C_{\lambda-1}) \leq \nu < \varphi(C_\lambda).$$

Die so definirten Terme a_ν nehmen dann offenbar mit wachsendem ν monoton ab.

Ausserdem lässt sich zeigen, dass $\limsup_{\nu \rightarrow \infty} \nu \cdot m_\nu \cdot a_\nu = \infty$ und die Reihe $\sum a_\nu$ convergent ist.

Bezeichnet man nämlich mit p_λ die grösste ganze Zahl, die kleiner als $\varphi(C_\lambda)$ ist, also diejenige ganze Zahl, welche durch die Bedingung definirt wird:

$$(9) \quad \varphi(C_\lambda) - 1 \leq p_\lambda < \varphi(C_\lambda),$$

so kann man zunächst die Ungleichungen (8) durch die folgenden ersetzen:

$$(10) \quad p_{\lambda-1} < \nu \leq p_\lambda$$

und man hat sodann:

$$\begin{aligned}
p_i \cdot f(p_i) \cdot a_{p_i} &= k_{p_i} \cdot \frac{f(p_i)}{C_{i-1}} \cdot \frac{p_i}{\varphi(C_i)} \\
&> k_{p_i} \cdot \frac{f(\varphi(C_{i-1}))}{C_{i-1}} \cdot \frac{\varphi(C_i) - 1}{\varphi(C_i)} \quad (\text{wegen: } p_i \geq \varphi(C_i) - 1 > \varphi(C_{i-1})) \\
&= k_{p_i} \cdot \frac{\varphi(C_i) - 1}{\varphi(C_i)}
\end{aligned}$$

also :

$$\lim_{i=\infty} p_i \cdot f(p_i) \cdot a_{p_i} \geq k,$$

d. h.

$$(11) \quad \limsup_{r=\infty} r \cdot f(r) \cdot a_r \geq k$$

und daher mit Berücksichtigung von Ungl. (2):

$$(12) \quad \limsup_{r=\infty} r \cdot m_r \cdot a_r = \infty.$$

Setzt man ferner:

$$\sum_{p_n+1}^{\infty} a_r = \sum_{n+1}^{\infty} A_i, \quad \text{wo: } A_i = \sum_{p_{i-1}+1}^{p_i} a_r,$$

so wird:

$$\begin{aligned}
A_i &= \sum_{p_{i-1}+1}^{p_i} \frac{k_r}{C_{i-1} \cdot \varphi(C_i)} < k_0 \cdot \frac{p_i - p_{i-1}}{C_{i-1} \cdot \varphi(C_i)} \\
&< \frac{k_0}{C_{i-1}} \cdot \frac{p_i - p_{i-1}}{p_i} \quad (\text{wegen: } p_i < \varphi(C_i)) \\
&< \frac{k_0}{C_{i-1}},
\end{aligned}$$

woraus die Convergenz der fraglichen Reihe unmittelbar hervorgeht.

Damit ist aber der oben ausgesprochene Satz vollständig bewiesen.

Will man wirklich Reihen $\sum a_r$ von der eben charakterisirten Beschaffenheit herstellen, so kann man etwa über C_i so verfügen, dass man setzt:

$$C_i = \lambda^q, \quad \text{wo: } q > 1,$$

also nach Gl. (7):

$$(13) \quad a_r = \frac{k_r}{(\lambda - 1)^2 \cdot q(\lambda^2)}$$

für alle r , welche durch die Bedingung (8) definirt sind, d. h. für:

$$(14) \quad q((\lambda - 1)^2) \leq r < q(\lambda^2).$$

Mit Hülfe dieser Ungleichungen lässt sich sodann λ auch explicite durch r ausdrücken. In Folge der Beziehung: $f(q(x)) = x$ ergibt sich nämlich aus (14):

$$(\lambda - 1)^2 \leq f(r) < \lambda^2$$

und hieraus folgt weiter:

$$(15) \quad \lambda - 1 = \left[\sqrt[r]{f(r)} \right]$$

(wenn man durch das Symbol $[x]$ die grösste in x enthaltene ganze Zahl bezeichnet).

Somit geht der Ausdruck (13) in den folgenden über:

$$(16) \quad a_r = \frac{k_r}{\left[\sqrt[r]{f(r)} \right]^2 \cdot q \left(\left[1 + \sqrt[r]{f(r)} \right]^2 \right)}.$$

Da aber offenbar:

$$\left[\sqrt[r]{f(r)} \right] \simeq \sqrt[r]{f(r)} \quad \text{und daher:} \quad \left[\sqrt[r]{f(r)} \right]^2 \simeq f(r),$$

so kann man, ohne den Charakter der Reihe $\sum a_r$ zu verändern, den Term (16) auch durch den folgenden etwas einfacheren ersetzen:

$$(17) \quad a_r = \frac{k_r}{f(r) \cdot q \left(\left[1 + \sqrt[r]{f(r)} \right]^2 \right)}.$$

Ist dann z. B. $m_r = \lg r$ vorgelegt, so wähle man etwa: $f(x) = (\lg x)^{\frac{1}{\sigma}} = y$ (wo $\sigma > 1$), also: $x = e^{y^\sigma} = q(y)$; alsdann wird, wenn man noch $\varrho \sigma = \tau$ setzt:

$$(18) \quad a_r = \frac{k_r}{\sqrt[\sigma]{\lg r} \cdot e^{\left[1 + \sqrt[\tau]{\lg r} \right]^\tau}} \quad (\text{wo: } \tau > \sigma > 1).$$

Die Reihe Σa_ν ist alsdann convergent, obschon ihre monoton abnehmenden Glieder der Bedingung genügen:

$$\limsup_{\nu=\infty} \nu \cdot \lg \nu \cdot a_\nu = \infty.$$

Sie reagirt als auf keins der üblichen Convergenz-Kriterien.

§ 4. Es giebt keine Schranke für die Divergenz.

Nach dem Satze des vorigen Paragraphen bildet jede Zahlenfolge von der Form $\left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)$, wo ε eine beliebig klein anzunehmende positive Zahl bedeutet, eine Convergenz-Schranke in dem Sinne, dass die Terme einer monotonen Zahlenfolge (a_ν) von einer angebbaren Stelle ab jene Schranke nicht mehr erreichen dürfen, wenn Σa_ν convergiren soll. Ersetzt man dagegen ε durch ε_ν , wo ε_ν ($\nu = 0, 1, 2, \dots$) mit unbegrenzt wachsendem ν beliebig langsam gegen Null abnimmt, so giebt es unendlich viele convergente Reihen Σa_ν , deren (monoton abnehmende) Glieder a_ν der Schranke $\left(\frac{\varepsilon_\nu}{\nu}\right)$ unendlich oft durchsetzen.

Aus der bewiesenen Existenz der Convergenz-Schranke $\left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)$ folgt aber, wie schon zu Anfang des vorigen Paragraphen angedeutet wurde, unmittelbar die Nicht-Existenz einer Divergenz-Schranke. Denn bezeichnet (b_ν) irgend eine positive monotone Zahlenfolge, so giebt es nach § 2 stets unendlich viele monotone Zahlenfolgen (a_ν) , welche die beiden Schranken $\left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)$ und (b_ν) unendlich oft durchsetzen, sodass Σa_ν sicher divergiren muss. Da man hierbei für (b_ν) die Terme einer beliebig stark convergirenden Reihe $\Sigma \frac{1}{C_\nu}$ wählen und diese wiederum noch durch eine wesentlich stärker convergirende ersetzen kann, so ergibt sich also der Satz:

Wie stark auch die Reihe $\Sigma \frac{1}{C_\nu}$ convergiren möge,

$$(6) \quad q_{\lambda}(a) - q_{\lambda-1}(a) > 1 \quad (\lambda = 2, 3, 4, \dots),$$

so dass zwischen $q_{\lambda-1}(a)$ und $q_{\lambda}(a)$ stets mindestens eine ganze Zahl liegt.

Nimmt man jetzt wiederum noch eine Folge beliebiger positiver, monoton abnehmender Zahlen k_r ($r = 0, 1, 2, \dots$) mit dem von Null verschiedenen Grenzwerte $\lim_{r=\infty} k_r = k$ an, so soll gesetzt werden:

$$(7) \quad a_r = \frac{k_r}{q_{\lambda}(a)}$$

für alle ganzzahligen r , welche durch die Bedingung definirt sind:

$$(8) \quad q_{\lambda-1}(a) - 1 \leq r < q_{\lambda}(a) - 1 \quad (\lambda = 2, 3, 4, \dots).$$

Alsdann nehmen offenbar die a_r mit wachsendem r monoton ab, und es lässt sich andererseits zeigen, dass $\liminf_{\lambda=\infty} C_r \cdot a_r = 0$ und die Reihe $\sum a_r$ divergent ist.

Bezeichnet man nämlich (analog wie in § 3) mit p_{λ} die grösste ganze Zahl, die kleiner als $q_{\lambda}(a)$ ist, so dass also:

$$(9) \quad q_{\lambda}(a) - 1 \leq p_{\lambda} < q_{\lambda}(a),$$

so lässt sich zunächst die Bedingung (8) durch die folgende ersetzen:

$$(10) \quad p_{\lambda-1} \leq r < p_{\lambda}.$$

In Folge dessen ergibt sich:

$$\begin{aligned} a_{p_{\lambda}} &= \frac{k_{p_{\lambda}}}{q_{\lambda+1}(a)} = \frac{k_{p_{\lambda}}}{q(p_{\lambda}(a))} \\ &< \frac{k_{p_{\lambda}}}{q(p_{\lambda})} \quad (\text{wegen: } p_{\lambda} < q_{\lambda}(a)) \end{aligned}$$

also:

$$\lim_{\lambda=\infty} q(p_{\lambda}) \cdot a_{p_{\lambda}} \leq k$$

d. h.

$$(11) \quad \liminf_{r=\infty} q(r) \cdot a_r \leq k$$

und schliesslich mit Berücksichtigung von Ungl. (1):

$$(12) \quad \liminf_{r=\infty} C_r \cdot a_r = 0.$$

Ferner hat man:

$$\sum_{p_1}^{\infty} a_r = \sum_2^{\infty} A_{\lambda}, \text{ wenn gesetzt wird: } A_{\lambda} = \sum_{p_{\lambda-1}}^{p_{\lambda}-1} a_r.$$

Da sodann:

$$A_{\lambda} = \sum_{p_{\lambda-1}}^{p_{\lambda}-1} \frac{k_r}{q_{\lambda}(a)} > k \cdot \frac{p_{\lambda} - p_{\lambda-1}}{q_{\lambda}(a)} = k \cdot \frac{p_{\lambda} - p_{\lambda-1}}{p_{\lambda}} \cdot \frac{p_{\lambda}}{q_{\lambda}(a)},$$

so ergibt sich sofort die Divergenz der fraglichen Reihe, da $\frac{p_{\lambda} - p_{\lambda-1}}{p_{\lambda}}$ das allgemeine Glied einer divergenten Reihe bildet und $\lim_{\lambda=\infty} \frac{p_{\lambda}}{q_{\lambda}(a)} = 1$ ist (s. Ungl. (9)).

Beispiel. Es sei: $C_r = r^{\sigma}$, wo $\sigma > 1$. Man kann also setzen:

$$q(x) = x^{\sigma}, \text{ wo: } \sigma > 1.$$

Alsdann wird:

$$q_2(x) = (x^{\sigma})^{\sigma} = x^{\sigma^2}, \dots q_{\lambda}(x) = x^{\sigma^{\lambda}}.$$

Nimmt man der Einfachheit halber die oben mit a bezeichnete Zahl auch $= \sigma$ (was z. B. sicher gestattet ist, wenn $\sigma \geq 2$, da alsdann:

$$q_{\lambda}(\sigma) - q_{\lambda-1}(\sigma) = \sigma^{\sigma^{\lambda}} - \sigma^{\sigma^{\lambda-1}} \geq 2^{2^{\lambda}} - 2^{2^{\lambda-1}} > 1),$$

so wird nach (7) und (8):

$$(13) \quad a_r = \frac{k_r}{\sigma^{\sigma^{\lambda}}}, \text{ solange: } \sigma^{\sigma^{\lambda-1}} - 1 \leq r < \sigma^{\sigma^{\lambda}} - 1.$$

Um auch hier wiederum λ explicite durch r auszudrücken, hat man:

$$\sigma^{\lambda-1} \leq \log^{\sigma} (\nu + 1) < \sigma^{\lambda}$$

$$\lambda - 1 \leq \log_2^{\sigma} (\nu + 1) < \lambda$$

d. h.

$$(14) \quad \lambda - 1 = \left[\log_2^{\sigma} (\nu + 1) \right]$$

und daher

$$(15) \quad a_r = \frac{k_r}{\sigma^{\sigma^1 + \left[\log_2^{\sigma} (\nu + 1) \right]}}.$$

Diese Reihe Σa_r ist divergent, obschon ihre (monoton abnehmenden) Glieder der Bedingung genügen:

$$\liminf \nu^{\sigma} \cdot a_r = 0 \quad (\text{wo: } \sigma > 1).$$

Sie kann also auf keins der gewöhnlichen Divergenz-Kriterien reagieren.

Die vorstehenden Betrachtungen und Resultate lassen sich ohne weiteres auch auf Integrale von der Form $\int_{x_0}^{\infty} f(x) \cdot dx$ übertragen, wo $f(x)$ mit unbegrenzt wachsendem x monoton gegen Null abnimmt. Denn dieses Integral convergirt und divergirt stets gleichzeitig mit der Reihe $\Sigma f(\nu)$.

Jede Curve: $y = \frac{\varepsilon}{x}$ bildet also — bei beliebig kleinem $\varepsilon > 0$ — stets eine Schranke für die Convergenz jenes Integrals, d. h. alle monotonen Curven $y = f(x)$ mit convergentem Integral müssen schliesslich durchweg merklich unter dieser Schranke verlaufen, während sie andererseits jede Curve von der Form: $y = \frac{1}{x \cdot g(x)}$ noch unendlich oft überschneiden können, wenn auch $g(x)$ mit x beliebig langsam in's Unendliche wächst.

Dagegen existirt überhaupt keine Schranke für die Divergenz des Integrals, d. h. dasselbe kann divergiren, auch wenn die monotone Curve $y = f(x)$ jede Curve $y = g(x)$ mit beliebig stark convergirendem Integral $\int_{x_0}^{\infty} g(x) \cdot dx$ unendlich oft durchsetzt.