

## 4 Ergänzungen

### 4.1 Die homotope Version des Cauchyschen Integralsatzes

**Definition 4.1.** Seien  $X$  ein normierter Vektorraum,  $D \subseteq X$  offen und  $\Gamma_0, \Gamma_1 \subseteq D$  stetige geschlossene Wege mit Parametrisierungen  $\gamma_0, \gamma_1 \in C([a, b], X)$ . Die Wege  $\Gamma_0$  und  $\Gamma_1$  heißen homotop über  $D$ , wenn es eine Funktion  $h \in C([0, 1] \times [a, b], X)$  gibt, so dass

$$h(s, t) \in D, \quad h(0, t) = \gamma_0(t), \quad h(1, t) = \gamma_1(t) \\ \text{und } h(s, a) = h(s, b) \quad \forall (s, t) \in [0, 1] \times [a, b].$$

Die Funktion  $h$  heißt dann Homotopie und man schreibt

$$\Gamma_0 \underset{D}{\sim} \Gamma_1 \text{ oder } \gamma_0 \underset{D}{\sim} \gamma_1.$$

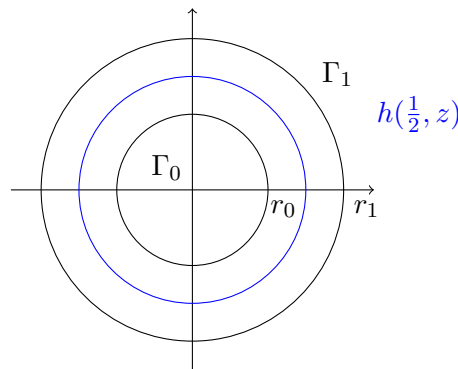
Falls dabei  $\Gamma_1 = \{x_0\}$ , also  $\gamma_1(t) = x_0$  für alle  $t \in [a, b]$  und ein  $x_0 \in D$ , so heißt  $\Gamma_0$  nullhomotop, und man schreibt  $\Gamma_0 \sim 0$ . Wenn alle geschlossenen Wege nullhomotop sind, dann heißt  $D$  einfach zusammenhängend.

**Beispiel 4.2.** (a) Seien  $\Gamma_j = \partial B(0, r_j)$  mit

$$\gamma_j(t) = r_j e^{it}, \quad t \in [0, 2\pi], \quad j = 0, 1, \quad 0 < r_0 < r_1, \quad D = \mathbb{C} \setminus \{0\}.$$

Dann sind die Kreislinien  $\Gamma_0$  und  $\Gamma_1$  über  $D$  homotop mit

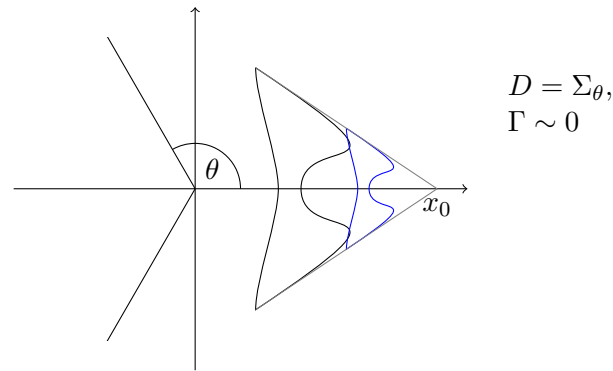
$$h(s, t) = (sr_1 + (1-s)r_0)e^{it} \text{ für } s \in [0, 1], \quad t \in [0, 2\pi].$$



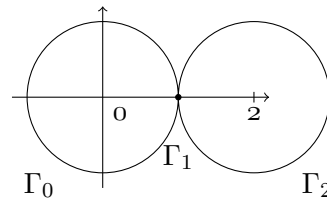
(b) Jedes sternförmige Gebiet  $D$  mit Zentrum  $x_0$  ist einfach zusammenhängend. Eine geschlossene Kurve  $\Gamma$  kann dabei mittels der Homotopie

$$h(s, t) = (1-s)\gamma(t) + sx_0 \in \overrightarrow{\gamma(t)x_0} \subseteq D$$

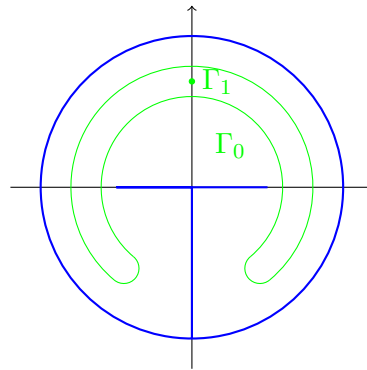
auf dem konstanten Weg  $\{x_0\}$  zusammengezogen werden.



- (c) Das Gebiet  $D = \mathbb{C} \setminus \{0\}$  ist einfach zusammenhängend. Dabei ist der Weg  $\Gamma_0 = \partial\mathbb{D}$  über  $D$  weder zu  $\Gamma_1 = \{1\}$  noch zu  $\Gamma_2 = \partial B(2, 1)$  homotop. Es gilt aber  $\Gamma_1 \underset{D}{\sim} \Gamma_2$ .



- (d) Das Gebiet  $D = \mathbb{D} \setminus (i(-1, 0) \cup [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}])$  ist einfach zusammenhängend, aber nicht sternförmig.



**Theorem 4.3** (Homotope Version des Cauchyschen Integralsatzes). Seien  $D \subseteq \mathbb{C}$  ein Gebiet,  $f \in H(D)$  und  $\Gamma_0, \Gamma_1 \subseteq D$  geschlossene Kurven mit  $\Gamma_0 \underset{D}{\sim} \Gamma_1$ . Dann gilt:

$$\int_{\Gamma_0} f(z) \, dz = \int_{\Gamma_1} f(z) \, dz.$$

Inbesondere gilt

$$\int_{\Gamma_0} f(z) \, dz = 0$$

für jede nullhomotope Kurve  $\Gamma_0 \subseteq D$ . Wenn  $D$  einfach zusammenhängend ist, folgt also

$$\int_{\Gamma} f(z) \, dz = 0$$

für jede geschlossene Kurve  $\Gamma$ .

**Bemerkung 4.4.** (a) Theorem 2.23, 3.10, 3.16 und Korollar 3.17 gelten für alle nullhomotopen Kurven  $\Gamma$  in beliebigen Gebieten  $G \subseteq \mathbb{C}$ .

(b) Beispiel 4.2(c) folgt aus Theorem 4.3 für  $f(z) = \frac{1}{z}$ ,  $z \in D = \mathbb{C} \setminus \{0\}$ . Denn

$$\int_{\partial D} \frac{1}{z} dz = 2\pi \neq 0 = \int_{\{1\}} \frac{1}{z} dz = \int_{\partial B(2,1)} \frac{1}{z} dz.$$

*Beweis von 4.3.* Seien  $\gamma_0, \gamma_1: [0, 1] \rightarrow D$  Parametrisierungen von  $\Gamma_0$  und  $\Gamma_1$  (OBdA  $a = 0$  und  $b = 1$ ),  $h \in C([0, 1]^2, \mathbb{C})$  mit

$$h(s, t) \in D, \quad h(j, t) = \gamma_j(t), \quad h(s, 0) = h(s, 1) \quad \forall 0 \leq s, t \leq 1, \quad j = 0, 1.$$

Da  $[0, 1]^2$  kompakt ist, ist  $h([0, 1]^2) \subset D$  kompakt und  $h$  gleichmäßig stetig. Somit existiert ein  $\varepsilon > 0$  mit  $B(z, \varepsilon) \subseteq D$  für alle  $z \in h([0, 1]^2)$  und es existiert  $\delta > 0$  mit

$$|h(s, t) - h(s', t')| < \varepsilon,$$

falls  $(t, s), (t', s') \in [0, 1]^2$  mit

$$|t - t'|^2 + |s - s'|^2 < \delta^2. \quad (*)$$

Wähle  $n \in \mathbb{N}$  mit  $\frac{\sqrt{2}}{n} < \delta$  und setze

$$z_{jk} = h\left(\frac{j}{n}, \frac{k}{n}\right) \in D, \quad j, k = 0, 1, \dots, n.$$

Beachte:  $z_{jn} = h(\frac{j}{n}, 1) = h(\frac{j}{n}, 0) = z_{j0}$ ,  $z_{0k} = h(0, \frac{k}{n}) = \gamma_0(\frac{k}{n})$  und  $z_{nk} = h(1, \frac{k}{n}) = \gamma_1(\frac{k}{n})$ . Weiter setzen wir

$$I_{jk} := \left[\frac{j}{n}, \frac{j+1}{n}\right] \times \left[\frac{k}{n}, \frac{k+1}{n}\right], \quad j, k = 0, \dots, n-1.$$

Mit (\*) folgt  $h(I_{jk}) \subseteq B(z_{jk}, \varepsilon) \subseteq D$ , da der Durchmesser von  $I_{jk}$   $\frac{\sqrt{2}}{n}$  ist. Ferner, da jede Kugel konvex ist, liegt das Viereck  $V_{jk}$  mit den Ecken

$$z_{jk}, z_{jk+1}, z_{j+1k+1}, z_{j+1k} \in h(I_{jk})$$

in  $B(z_{jk}, \varepsilon)$ . Der Integralsatz liefert für  $D = B(z_{jk}, \varepsilon)$

$$\int_{\partial V_{jk}} f(z) dz. \quad (**)$$

Betrachte Polygonzüge  $P_j$  mit den Ecken

$$z_{j0} = z_{jn}, z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jn-1}, \quad j = 0, \dots, n.$$

*Behauptung 1:* Für  $j = 0, 1, \dots, n-1$  gilt  $\int_{P_j} f(z) dz = \int_{P_{j+1}} f(z) dz$ .

*Behauptung 2:*  $\int_{\Gamma_0} f(z) dz = \int_{P_0} f(z) dz$ ,  $\int_{\Gamma_1} f(z) dz = \int_{P_n} f(z) dz$ .

Aus den Behauptungen 1 und 2 folgt das Theorem.  $\square$

## 4.2 Laplace Transformationen

Sei  $f: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{C}$  lokal integrierbar, das heißt  $f$  ist messbar und  $|f|$  ist integrierbar auf allen Intervallen  $[0, b]$ ,  $b > 0$ . Weiter sei  $f$  auf einem Intervall  $[t_0, \infty)$  exponentiell beschränkt, das heißt es gibt  $M \geq 0$ ,  $\omega \in \mathbb{R}$ ,  $t_0 \geq 0$ , so dass

$$|f(t)| \leq M e^{\omega t} \quad (\forall t \geq t_0).$$

Es sei  $\omega(f)$  das Infimum der obigen  $\omega$ ;  $\omega(f)$  heißt exponentielle Wachstumsschranke.

**Bemerkung.** Für  $f(t) = e^{-t^2}$  gilt  $\omega(f) = -\infty$ ; für  $g(t) = t$  ist  $\omega(g) = 0$  und das Infimum wird nicht angenommen; für  $h(t) = e^{t^2}$  gilt  $\omega(h) = \infty$  (stets  $\forall t \geq 0$ ).

*Beweis.* Es gilt:

$$e^{-t^2} \leq e^{\frac{\omega^2}{4}} e^{\omega t} \quad (\forall \omega \in \mathbb{R}, t \geq 0) \implies \omega(f) = -\infty.$$

Ferner:

$$t \leq \frac{1}{e^\omega} \quad (\forall \omega > 0, t \geq 0) \implies \omega(g) \leq 0.$$

Aber es gibt kein  $M > 0$  mit  $t \leq M$ , für alle  $t \geq 0$ . Folglich ist  $\omega(g) = 0$ .

Die letzte Behauptung beweist man ähnlich. □

Nach Beispiel 2.28 existiert die *Laplacetransformation*

$$(\mathcal{L}f)(\lambda) = \hat{f}(\lambda) := \int_0^\infty e^{-\lambda t} f(t) dt$$

für alle  $\lambda \in \mathbb{C}$  mit  $\operatorname{Re} \lambda > \omega(f)$  und  $\hat{f}$  ist auf

$$\{\lambda \in \mathbb{C} : \operatorname{Re} \lambda > \omega(f)\}$$

holomorph. Weiter gilt:

$$\hat{f}^{(n)}(\lambda) = (-1)^n \int_0^\infty e^{-\lambda t} t^n f(t) dt = (-1)^n \mathcal{L}(q_n f)(\lambda) \quad (\forall n \in \mathbb{N}), \quad (4.1)$$

wobei  $q_n(t) = t^n$ ,  $\operatorname{Re} \lambda > \omega(f)$ . Sei ferner  $g: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{C}$  lokal integrierbar mit  $\omega(g) < \infty$ . Seien  $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ . Dann gilt:

$$\omega(\alpha f + \beta g) \leq \max\{\omega(f), \omega(g)\} < \infty$$

und

$$\mathcal{L}(\alpha f + \beta g) = \alpha \mathcal{L}(f) + \beta \mathcal{L}(g) \quad (4.2)$$

auf  $\{\lambda : \operatorname{Re} \lambda > \max\{\omega(f), \omega(g)\}\}$ . Sei nun  $f \in C^k(\mathbb{R}_+, \mathbb{C})$  mit

$$w := \max_{0 \leq j \leq k} \omega(f^{(j)}) \quad (k \in \mathbb{N}_0).$$

Dann gilt

$$\mathcal{L}(f^{(k)})(\lambda) = \lambda^k \hat{f}(\lambda) - \sum_{j=0}^{k-1} \lambda^j f^{(k-j-1)}(0), \quad \forall \operatorname{Re} \lambda > w. \quad (4.3)$$

*Beweis.* Für  $k = 1$ : Sei  $\operatorname{Re} \lambda > \omega$ . Dann ist

$$\lambda \hat{f}(\lambda) = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b \underbrace{\lambda e^{-\lambda t}}_{= -\frac{d}{dt} e^{-\lambda t}} f(t) dt = \lim_{b \rightarrow \infty} \left( + \int_0^b e^{-\lambda t} f'(t) dt + f(0) - e^{-\lambda b} f(b) \right) \stackrel{\operatorname{Re} \lambda > \omega}{=} \mathcal{L}(f')(\lambda) + f(0),$$

wobei die partielle Integration mit (2.1) wie in Ana 1 gerechtfertigt werden kann. Der Rest der Behauptung folgt per Induktion.  $\square$

Betrachte nun das Polynom  $p(t) = a_n t^n + \dots + a_1 t + 1_0$  mit  $a_0, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ ,  $a_n \neq 0$  und die Differentialgleichung

$$\begin{cases} p\left(\frac{d}{dt}\right)(u) = a_n u^{(n)} + a_{n-1} u^{(n-1)} + \dots + a_1 u' + a_0 u = f, & t \geq 0, \\ u(0) = u_0, & u'(0) = u_1, \dots, u^{(n-1)}(0) = u_{n-1}. \end{cases} \quad (4.4)$$

Dabei sind  $u_0, \dots, u_{n-1} \in \mathbb{R}$  und ein stetiges  $f: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$  mit  $\omega(f) < \infty$  gegeben.

Aus Analysis II wissen wir es gibt eine Lösung  $u \in C^n(\mathbb{R}_+)$ . Setze weiterhin

$$v(t) = (u(t), \dots, u^{(n-1)}(t)), \quad v_0 = (u_0, \dots, u_{n-1}), \quad g = (0, \dots, 0, f).$$

Dann existiert eine Hauptfundamentallösung  $e^{tA}$  mit

$$v(t) = e^{tA} v_0 + \int_0^t e^{(t-s)A} f(s) ds, \quad (t \geq 0).$$

Ferner existieren  $M_1, M_2 \geq 0$  und  $\omega_1, \omega_2 \in \mathbb{R}$  mit

$$\|e^{tA}\| \leq M_1 e^{\omega_1 t}, \quad |g(t)|_2 \leq M_2 e^{\omega_2 t}, \quad t \geq 0.$$

Sei  $\omega = \max\{\omega_1, \omega_2\}$ . Dann:

$$\begin{aligned} |u^{(k)}(t)| &\leq |v(t)|_2 \leq M_1 e^{\omega_1 t} |v_0|_2 + \int_0^t M_2 e^{\omega_2(t-s)} M_1 e^{\omega_1 s} ds \\ &\leq M_1 |v_0|_2 e^{\omega t} + M_1 M_2 t e^{\omega t} \quad (k \in \{0, \dots, n-1\}, t \geq 0). \end{aligned}$$

Mit (4.4) folgt die entsprechende Abschätzung für  $u^{(n)}$ . Also ist  $\omega(u^{(k)}) \leq \omega$  für alle  $k = 0, \dots, n$ , also sind alle Ableitungen exponentiell beschränkt.

Wende nun  $\mathcal{L}$  auf (4.4) für  $\operatorname{Re} \lambda > \omega$  an. Dann gilt:

$$\hat{f}(\lambda) = \mathcal{L}\left(p\left(\frac{d}{dt}\right)(u)\right)(\lambda) \stackrel{(4.2)}{=} \sum_{k=0}^n a_k \mathcal{L}(u^{(k)})(\lambda) \stackrel{(4.3)}{=} \sum_{k=0}^n a_k \lambda^k \hat{u}(\lambda) - \underbrace{\sum_{k=1}^n \sum_{j=0}^{k-1} a_k \lambda^j \underbrace{u^{(k-j-1)}(0)}_{\stackrel{(4.4)}{=} u_{k-j-1}}}_{=: q(\lambda)}$$

. Also gilt  $\hat{f} = p\hat{u} - q$  und somit

$$\hat{u}(\lambda) = \frac{1}{p(\lambda)} \hat{f}(\lambda) + \frac{q(\lambda)}{p(\lambda)} \quad (4.5)$$

für alle  $\lambda \in \mathbb{C}$  mit  $\operatorname{Re} \lambda > \omega$ ,  $p(\lambda) \neq 0$ . Hierbei sind  $f$ ,  $p$  und  $q$  gegeben! Es stellen sich noch folgende Fragen:

- 1) Wie kann man  $\hat{f}$  berechnen?
- 2) Existiert  $\mathcal{L}^{-1}$ ? Gibt es eine Formel?

**Beispiel 4.5.** (a)  $f = \mathbb{1}_{[a,b]}$  wobei  $0 \leq a < b \leq \infty$ . Für  $b = \infty$  gilt

$$|f(t)| \leq 1 \leq e^{\omega t}, \quad \forall \omega > 0, \quad t \geq 0$$

und

$$\nexists \omega \leq 0, \quad M \geq 0 \text{ mit } |f(t)| \leq M e^{\omega t}, \quad \forall t \geq 0.$$

Folglich ist  $\omega(f) = 0$ . Für  $b < \infty$  gilt

$$|f(t)| \leq \begin{cases} 1, & t < b \\ 0, & t \leq b \end{cases} \leq e^{\omega b} e^{-\omega t} \quad (\forall t \geq 0, \quad \omega \in \mathbb{R}).$$

Folglich ist  $\omega(f) = -\infty$ . Sei  $\operatorname{Re} \lambda > \omega(f)$ . Dann:

$$\hat{f}(\lambda) = \int_0^\infty e^{-\lambda t} f(t) dt = \int_a^b e^{-\lambda t} dt = \begin{cases} b - a, & \text{falls } b < \infty, \\ \frac{1}{\lambda}(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b}), & b < \infty, \lambda \neq 0, \\ \frac{1}{\lambda}e^{-\lambda a}, & b = \infty. \end{cases}$$

Für  $b = \infty$  hat  $\hat{f}$  also eine eindeutige holomorphe Fortsetzung auf  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ .

- (b)  $f(t) = t^m$  für festes  $n \in \mathbb{N}$ . Wie oben gilt  $\omega(f) = 0$ . Sei  $\operatorname{Re} \lambda > 0$ . Dann:

$$\hat{f}(\lambda) = \mathcal{L}(q_n \mathbb{1}) \stackrel{(4.1)}{=} (-1)^n \hat{\mathbb{1}}(\lambda)^{(n)} \stackrel{(a)}{=} (-1)^n \left( \frac{d}{d\lambda} \right)^n \frac{1}{\lambda} = n! \lambda^{-(n+1)}$$

Folglich existiert keine holomorphe Fortsetzung auf  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$  mit Pol  $(n+1)$ ter Ordnung in 0.

- (c)  $f(t) = e^{at} =: e_a(t)$  für festes  $a \in \mathbb{C}$ . Es gilt  $\omega(f) = \operatorname{Re} a$ . Für  $\operatorname{Re} \lambda > \operatorname{Re} a$  gilt:

$$\hat{f}(\lambda) = \int_0^\infty e^{-\lambda t} e^{at} dt = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b e^{(a-\lambda)t} dt = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{e^{(a-\lambda)t}}{a-\lambda} \Big|_0^b = \frac{1}{\lambda - a}.$$

Also gibt es keine holomorphe Fortsetzung auf  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ .

Vergemeinerung: Verschiebungsregel: Sei  $a \in \mathbb{C}$ ,  $f$  mit  $\omega(f) < \infty$ ,  $f$  lokal integrierbar. Sei  $\operatorname{Re} \lambda > \operatorname{Re} a + \operatorname{Re} \omega(f)$ . Dann gilt:

$$\mathcal{L}(e_a f)(\lambda) = \int_0^\infty \underbrace{e^{-\lambda t} e^{at}}_{e^{-(\lambda-a)t}} f(t) dt = \hat{f}(\lambda - a). \quad (4.6)$$

- (d)  $f(t) = \cos(\alpha t)$  für festes  $\alpha \in \mathbb{R}$ . Dann ist

$$f = \frac{1}{2}(e_{i\alpha} + e_{-i\alpha})$$

und damit

$$\mathcal{L}(f) = \frac{1}{2}(\hat{e}_{i\alpha} + \hat{e}_{-i\alpha}) \stackrel{(c)}{=} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\lambda - i\alpha} + \frac{1}{\lambda + i\alpha} \right) = \frac{1}{\lambda^2 + \alpha^2}.$$

Hierbei ist  $\omega(f) = 0$  und  $\operatorname{Re} \lambda > 0$ . Weiter hat  $\hat{f}$  eine holomorphe Fortsetzung auf  $\mathbb{C} \setminus \{\pm i\alpha\}$ .

- (e)  $f(t) = t^{\alpha-1}$ ,  $t > 0$ ,  $f(0) = 0$ , wobei  $\alpha > 0$  fest. Dann ist  $f$  integrierbar auf  $[0, b]$  für alle  $b > 0$  und

$$|f(t)| \leq 1, \quad \forall t \geq 1 \implies \omega(f) \leq 0.$$

Es gilt ferner:  $\omega(f) = 0$ . Sei  $\lambda > 0$ . Dann gilt:

$$\hat{f}(\lambda) = \int_0^\infty e^{-\lambda t} t^{\alpha-1} dt \stackrel{s=\lambda t}{=} \int_0^\infty e^{-s} \left(\frac{s}{\lambda}\right)^{\alpha-1} \frac{1}{\lambda} ds = \lambda^{-\alpha} \Gamma(\alpha)$$

nach Beispiel 2.39. Die Formel gilt auf  $\mathbb{C}_+$  (mit  $\lambda^{-\alpha} = e^{-\alpha \log \lambda}$ ). Weiter hat  $\hat{f}$  eine holomorphe Fortsetzung auf  $\Sigma_\pi = \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}_-$ .

- (f) Sei  $f(t) = n$  für  $t \in [n^2, (n+1)^2)$ . Dann ist  $\omega(f) = 0$ . Sei  $\operatorname{Re} \lambda > 0$ . Dann:

$$\hat{f}(\lambda) = \sum_{n=0}^\infty \int_{n^2}^{(n+1)^2} n e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \left( \sum_{n=1}^\infty n e^{-n^2 \lambda} - \sum_{n=0}^\infty n e^{-(n+1)^2 \lambda} \right) \stackrel{j=n+1}{=} \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^\infty e^{-j^2 \lambda}.$$

Remmert II, §11.2.4 liefert: Es gibt kein  $iz \in i\mathbb{R}$ , so dass  $\hat{f}$  eine holomorphe Fortsetzung auf eine Umgebung von  $iz$  hat (Kronecker).

Seien  $f, g: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{C}$  messbar mit

$$|f(t)| \leq M_1 e^{\omega_1 t}, \quad |g(t)| \leq M_2 e^{\omega_2 t}$$

für alle  $t \geq 0$  und Konstanten  $M_1, M_2 \geq 0$  und  $\omega_1, \omega_2 \in \mathbb{R}$ . Dann definieren wir die Faltung  $f * g$  durch:

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(t-s)g(s) ds, \quad t \geq 0.$$

Diese ist integrierbar.

*Beweis.* Sei  $\omega = \max\{\omega_1, \omega_2\}$ ,  $\operatorname{Re} \lambda > \omega$ . Setze  $D = \{(s, t) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq s \leq t\}$ . Dann:

$$\left| e^{-\lambda t} \mathbb{1}_D(s, t) f(t-s)g(s) \right| \leq e^{-\operatorname{Re} \lambda t} \mathbb{1}_D(s, t) M_1 e^{\omega(t-s)} M_2 e^{\omega s} = e^{-t \operatorname{Re} \lambda} \mathbb{1}_D(s, t) M_1 M_2 e^{\omega t} =: \varphi(s, t).$$

Damit:

$$\int_{\mathbb{R}^2} \varphi(s, t) ds dt = \int_0^\infty t M_1 M_2 e^{(\omega - \operatorname{Re} \lambda)t} dt < \infty \quad (\operatorname{Re} \lambda > \omega).$$

Also ist  $\varphi$  integrierbar auf  $\mathbb{R}^2$  und somit auch die Faltung.  $\square$

Für die Laplacetransformation der Faltung gilt dann:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(f * g)(t) &= \int_0^\infty e^{-\lambda t} \int_0^t f(t-s)g(s) ds dt \\ &\stackrel{\text{Fubini}}{=} \int_0^\infty \int_s^\infty e^{-\lambda(t-s)} f(t-s) e^{-\lambda s} g(s) dt ds \\ &\stackrel{\substack{t=r+s \\ r=t-s}}{=} \int_0^\infty e^{-\lambda r} \int_0^\infty e^{-\lambda r} f(r) dr ds = \hat{f}(\lambda) \hat{g}(\lambda) \end{aligned} \quad (4.7)$$

für alle  $\lambda$  mit  $\operatorname{Re} \lambda > \max\{\omega_1, \omega_2\}$ .

**Erinnerung:** Sei  $J \subseteq \mathbb{R}$  ein Intervall. Eine Nullmenge  $N \subseteq J$  ist eine Borelmenge mit

$$\int_N dx = \int_J \mathbb{1}_N(x) dx = 0.$$

Man sagt, dass  $f, g: J \rightarrow \mathbb{C}$  *fast überall* gleich sind, wenn es eine Nullmenge  $N \subseteq J$  gibt mit  $f(t) = g(t)$  für alle  $t \in J \setminus N$ . Eine Nullmenge kann kein Intervall mit Länge  $> 0$  enthalten (\*). Wenn  $\varphi \in C^1(J)$ , dann ist auch  $\varphi(N)$  eine Nullmenge (vgl. Analysis 3, Lem. 3.33 oder Übung 3.2).

**Theorem 4.6** (Eindeutigkeitssatz für die Laplacetransformation). *Seien  $f, g: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{C}$  messbar und es gebe Konstanten  $M \geq 0$  und  $\omega \in \mathbb{R}$  mit  $|f(t)|, |g(t)| \leq Me^{\omega t}$  für alle  $t \geq 0$ . Weiter gebe es Zahlen  $l > 0$  und  $\lambda_0 \geq \omega + l$ , sodass  $\hat{f}(\lambda_n) = \hat{g}(\lambda_n)$  für alle  $\lambda_n = \lambda_0 + nl$  gilt,  $n \in \mathbb{N}_0$ . Dann ist  $f = g$  fast überall und  $f(t) = g(t)$  für alle gemeinsamen Stetigkeitsstellen  $t \geq 0$  von  $f$  und  $g$ .*

*Beweis.* Setze  $h = f - g$  (das ist messbar). Es gilt  $|h(t)| \leq 2Me^{\omega t}$  für alle  $t \geq 0$  und  $\hat{h}(\lambda_n) = \hat{f}(\lambda_n) - \hat{g}(\lambda_n) = 0$  für alle  $n \in \mathbb{N}_0$ . Damit folgt

$$0 = \int_0^\infty e^{-nlt} e^{-\lambda_0 t} h(t) dt.$$

Nun machen wir eine Transformation  $\tau = e^{-lt} \iff t = -\frac{\ln \tau}{l}, \frac{d\tau}{dt} = -le^{-lt} = -l\tau$ :

$$0 = \int_0^1 \underbrace{\tau^n e^{\frac{\lambda_0}{l} \ln \tau} h\left(-\frac{\ln \tau}{l}\right) \frac{1}{l\tau}}_{=: \varphi(\tau), 0 < \tau \leq 1} d\tau.$$

Beachte:  $\varphi$  ist messbar,  $\varphi \leq \frac{1}{l\tau} e^{\frac{\lambda_0}{l} \ln \tau} 2Me^{-\omega \frac{\ln \tau}{l}} = \frac{M}{l} \tau^{\frac{\lambda_0}{l} - \frac{\omega}{l} - 1} \leq \frac{M}{l}$ , da  $0 < \tau \leq 1$  und  $\lambda_0 - \omega \geq l$ . Lemma 4.7 zeigt dann, dass  $\varphi = 0$  fast überall  $\implies h = 0$  fast überall  $\implies f = g$  fast überall.

Sei  $t$  eine gemeinsame Stetigkeitsstelle von  $f$  und  $g$  und  $N \subseteq \mathbb{R}_+$  eine Nullmenge mit  $f(s) = g(s)$  für alle  $s \in \mathbb{R}_+ \setminus N$ . Nach (\*) existiert eine Folge  $t_n \rightarrow t$  mit  $t_n \in \mathbb{R}_+ \setminus N \implies f(t_n) = g(t_n)$  für alle  $n \in \mathbb{N}$ . Mit  $n \rightarrow \infty$  folgt  $f(t) = g(t)$ .  $\square$

**Lemma 4.7.** *Sei  $\varphi \in L^2((0, 1))$  mit  $\int_0^1 t^n \varphi(t) dt = 0$  für alle  $n \in \mathbb{N}_0$ . Dann ist  $\varphi = 0$  fast überall.*

*Beweis.* Sei  $\varepsilon > 0$ . Nach dem Approximationssatz von Weierstrass (Analysis 3) existieren Polynome  $p_1, p_2$  mit  $\|\operatorname{Re} \varphi - p_1\|_\infty \leq \varepsilon, \|\operatorname{Im} \varphi - p_2\|_\infty \leq \varepsilon$ . Setze  $p = p_1 + ip_2$ . Dann ist  $\|\varphi - p\|_\infty = \|\operatorname{Re} \varphi - p_1 + i(\operatorname{Im} \varphi - p_2)\|_\infty \leq 2\varepsilon$ . Sei etwa  $p(t) = \sum_{k=0}^m b_k t^k$ . Dann:  $\square$