

Komplexe Funktionen für Studierende der Ingenieurwissenschaften

Reiner Lauterbach

Fachbereich Mathematik
Universität Hamburg

Technische Universität Hamburg–Harburg
Sommersemester 2014

Kapitel 1. Komplexe Zahlen

Ausgangspunkt: Betrachte die **kubische** Gleichung

$$x^3 = 3px + 2q$$

und die Lösungsformel (nach Gerolamo Cardano, 16. Jahrhundert)

$$x = \sqrt[3]{q + \sqrt{q^2 - p^3}} + \sqrt[3]{q - \sqrt{q^2 - p^3}}$$

Rafael Bombelli (ebenfalls 16. Jahrhundert) betrachtet die Gleichung

$$x^3 = 15x + 4$$

und erhält aus der Lösungsformel

$$x = \sqrt[3]{2 + \sqrt{-121}} + \sqrt[3]{2 - \sqrt{-121}}$$

Bombelli definiert die imaginäre Einheit i mittels $i^2 = -1$, die komplexen Zahlen sowie deren Addition und Multiplikation.

Prinzipielle Fragen zu den komplexen Zahlen.

- Was ist eigentlich i ?
- Kann man mit den obigen Rechenoperationen widerspruchsfrei rechnen?
- Sind die Rechenoperationen konsistent mit den bekannten Rechenregeln in \mathbb{R} ?
- Kann man die komplexen Zahlen anordnen?
- Gibt es alternative Darstellungen für komplexe Zahlen?
- Sind mit Rechenoperationen in \mathbb{C} geometrische Interpretationen verbunden?
- ...
- Warum beschäftigen wir uns eigentlich mit komplexen Zahlen?
- ... und später mit komplexen Funktionen?
- Gibt es hierzu interessante Anwendungen in den Ingenieurwissenschaften?

Zur Konstruktion der komplexen Zahlen.

Ausgangspunkt: Betrachte die Menge $\mathbb{R}^2 = \{(a, b) \mid a, b \in \mathbb{R}\}$ mit **Addition**

$$(a_1 + ib_1) + (a_2 + ib_2) = (a_1 + a_2) + i(b_1 + b_2) \quad \text{für } a_1, a_2, b_1, b_2 \in \mathbb{R}$$

und **Multiplikation**

$$(a_1 + ib_1) \cdot (a_2 + ib_2) = (a_1 a_2 - b_1 b_2) + i(a_1 b_2 + a_2 b_1) \quad \text{für } a_1, a_2, b_1, b_2 \in \mathbb{R}$$

Beobachtung: Die Multiplikation ist assoziativ und kommutativ; weiterhin gilt

$$(a, b) \cdot (1, 0) = (a, b) \quad \text{für } (a, b) \in \mathbb{R}^2,$$

d.h. $(1, 0) \in \mathbb{C}$ ist **neutrales Element der Multiplikation**. Die Gleichung

$$(a, b) \cdot (x, y) = (1, 0) \quad \text{für } (a, b) \neq (0, 0)$$

besitzt die eindeutige Lösung, das **multiplikative Inverse** zu (a, b) ,

$$(x, y) = \left(\frac{a}{a^2 + b^2}, \frac{-b}{a^2 + b^2} \right)$$

Zur Struktur der komplexen Zahlen.

Bemerkung: Die Menge \mathbb{R}^2 bildet mit der Addition und der Multiplikation einen Körper, den **Körper der komplexen Zahlen**, ab sofort bezeichnet mit \mathbb{C} .

Beobachtung: Die Abbildung $\varphi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, definiert durch $\varphi(a) = (a, 0)$ ist injektiv. Für alle $a_1, a_2 \in \mathbb{R}$ gilt

$$\varphi(a_1 + a_2) = (a_1 + a_2, 0) = (a_1, 0) + (a_2, 0) = \varphi(a_1) + \varphi(a_2)$$

$$\varphi(a_1 a_2) = (a_1 a_2, 0) = (a_1, 0) \cdot (a_2, 0) = \varphi(a_1) \cdot \varphi(a_2)$$

Fazit:

- Wir können die reellen Zahlen mit komplexen Zahlen der Form $(a, 0)$ identifizieren;
- Die reellen Zahlen bilden einen **Unterkörper** von \mathbb{C} ;
- Die Rechenregeln in \mathbb{C} sind konsistent mit den Rechenregeln in \mathbb{R} .

Der Körper der reellen Zahlen ist angeordnet.

Bemerkung: Die reellen Zahlen bilden einen **angeordneten Körper**; es gelten die folgenden **Anordnungsaxiome**.

- Für jedes $x \in \mathbb{R}$ gilt entweder $x > 0$ oder $x = 0$ oder $x < 0$;
- Für $x > 0$ und $y > 0$ gilt $x + y > 0$;
- Für $x > 0$ und $y > 0$ gilt $xy > 0$.

Frage: Ist der Körper \mathbb{C} der komplexen Zahlen angeordnet?

Antwort: NEIN!

Denn in einem angeordneten Körper sind von Null verschiedene Quadratzahlen positiv. Wäre \mathbb{C} angeordnet, so folgt aus

$$0 < 1^2 = 1 \quad \text{und} \quad 0 < i^2 = -1$$

der Widerspruch $0 < 1 + (-1) = 0$.

Zur einfacheren Notation der komplexen Zahlen.

Vereinfachung der Notation:

- Für $a \in \mathbb{R}$ schreiben wir a statt $(a, 0)$;
- Die komplexe Einheit $(0, 1)$ notieren wir mit i ;
- Damit lässt sich jede komplexe Zahl (a, b) schreiben als

$$(a, b) = (a, 0) + (0, b) \cdot (0, 1) = a + b \cdot i = a + ib$$

und es gilt

$$i^2 = i \cdot i = (0, 1) \cdot (0, 1) = (-1, 0) = -1.$$

Fazit: Wir haben mit \mathbb{C} einen Körper konstruiert, der \mathbb{R} umfasst. Die Gleichung

$$x^2 + 1 = 0$$

ist in \mathbb{C} lösbar. Die einzigen beiden Lösungen lauten $\pm i$.

Realteil und Imaginärteil.

Ab sofort bezeichnen wir komplexe Zahlen mit z oder w . Für

$$z = x + iy \in \mathbb{C} \quad \text{für } x, y \in \mathbb{R}$$

heißt x der **Realteil** und y der **Imaginärteil** von z , kurz

$$x = \operatorname{Re}(z) \quad \text{und} \quad y = \operatorname{Im}(z)$$

Es gelten die folgenden Rechenregeln

$$\operatorname{Re}(z + w) = \operatorname{Re}(z) + \operatorname{Re}(w) \quad \text{für } z, w \in \mathbb{C}$$

$$\operatorname{Im}(z + w) = \operatorname{Im}(z) + \operatorname{Im}(w) \quad \text{für } z, w \in \mathbb{C}$$

$$\operatorname{Re}(az) = a \operatorname{Re}(z) \quad \text{für } z \in \mathbb{C}, a \in \mathbb{R}$$

$$\operatorname{Im}(az) = a \operatorname{Im}(z) \quad \text{für } z \in \mathbb{C}, a \in \mathbb{R}$$

und weiterhin

$$\frac{1}{z} = \frac{x}{x^2 + y^2} - i \frac{y}{x^2 + y^2} \quad \text{für } z \neq 0.$$

Die komplexe Zahlenebene.

Geometrische Veranschaulichung:

Wir stellen $z = (x, y) \in \mathbb{C}$ als **Punkt** in der

komplexen Zahlenebene (Gaußsche Zahlenebene)

dar, gegeben durch das kartesische Koordinatensystem des \mathbb{R}^2 , mit einer **reellen Achse**, \mathbb{R} , und einer **imaginären Achse**, $i \cdot \mathbb{R}$.

Geometrische Veranschaulichung der Addition:

Durch übliche Addition der Ortsvektoren nach der Parallelogrammregel.

Darstellung der Addition zweier komplexer Zahlen auf **Folie**.

Konjugation komplexer Zahlen.

Ordne durch Spiegelung an reeller Achse jeder komplexen Zahl $z = x + iy$ mit

$$\bar{z} = x - iy \in \mathbb{C}$$

die **konjugiert** komplexe Zahl zu.

Es gelten die folgenden Rechenregeln

$$\overline{z + w} = \bar{z} + \bar{w} \quad \text{für } z, w \in \mathbb{C}$$

$$\overline{zw} = \bar{z} \cdot \bar{w} \quad \text{für } z, w \in \mathbb{C}$$

$$\overline{(\bar{z})} = z \quad \text{für } z \in \mathbb{C}$$

$$z\bar{z} = x^2 + y^2 \quad \text{für } z = x + iy \in \mathbb{C}$$

$$\operatorname{Re}(z) = (z + \bar{z})/2 \quad \text{für } z \in \mathbb{C}$$

$$\operatorname{Im}(z) = (z - \bar{z})/2i \quad \text{für } z \in \mathbb{C}$$

Insbesondere gilt $z = \bar{z}$ genau dann, wenn $z \in \mathbb{R}$.

Die Betragsfunktion.

Setze

$$|z| = \sqrt{z\bar{z}} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{für } z = x + iy \in \mathbb{C}$$

für den **Betrag** von z sowie $|z - w|$ für den **Abstand** zweier Zahlen $z, w \in \mathbb{C}$ in der komplexen Zahlenebene.

- Somit stellt $|z| = |z - 0|$ den euklidischen Abstand von z zum Ursprung dar.
- Für $z \in \mathbb{R}$ stimmt $|z|$ mit dem (üblichen) Betrag für reelle Zahlen überein.
- Es gelten die folgenden Abschätzungen.

$$-|z| \leq \operatorname{Re}(z) \leq |z| \quad \text{und} \quad -|z| \leq \operatorname{Im}(z) \leq |z| \quad \text{für } z \in \mathbb{C}$$

Satz

Die Betragsfunktion liefert eine **Norm** auf \mathbb{C} , denn es gelten die Relationen

- 1 $|z| \geq 0$ für alle $z \in \mathbb{C}$ und $|z|$ genau dann, wenn $z = 0$;
- 2 $|z + w| \leq |z| + |w|$ für alle $z, w \in \mathbb{C}$ (**Dreiecksungleichung**);
- 3 $|zw| = |z| \cdot |w|$ für alle $z, w \in \mathbb{C}$.

Die Eulersche Formel.

In der komplexen Zahlenebene gilt für $z = x + iy$ mit den **Polarkoordinaten**

$$(x, y) = |z|(\cos(\varphi), \sin(\varphi))$$

die **Eulersche Formel**

$$z = |z| \exp(i\varphi) = |z|(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))$$

wobei $\varphi \in [0, 2\pi)$ für $z \neq 0$ den (eindeutigen) Winkel zwischen der positiven reellen Achse und dem Strahl von 0 durch $z = (x, y)$ darstellt.

Der Winkel $\varphi \in [0, 2\pi)$ wird ebenso als **Argument** von $z \neq 0$ bezeichnet, kurz

$$\varphi = \arg(z) \in [0, 2\pi)$$

Beispiel

$i = (0, 1) = \exp(i\pi/2)$, $-1 = i^2 = \exp(i\pi)$, somit gilt $e^{i\pi} + 1 = 0$.

Zur Geometrie der Multiplikation und Division.

Mit der Verwendung von Polarkoordinaten lässt sich die Multiplikation zweier komplexer Zahlen $z, w \in \mathbb{C}$ als **Drehstreckung** in der komplexen Zahlenebene interpretieren, denn für

$$z = |z| (\cos(\varphi), \sin(\varphi)) \quad \text{und} \quad w = |w| (\cos(\psi), \sin(\psi))$$

gilt

$$\begin{aligned} z \cdot w &= |z| \cdot |w| (\cos(\varphi) + i \sin(\varphi)) (\cos(\psi) + i \sin(\psi)) \\ &= |z| \cdot |w| (\cos(\varphi + \psi) + i \sin(\varphi + \psi)) = |z| \cdot |w| \exp(i(\varphi + \psi)) \end{aligned}$$

bzw. mit der Eulerschen Formel

$$z \cdot w = |z| \cdot |w| \exp(i\varphi) \exp(i\psi) = |z| \cdot |w| \exp(i(\varphi + \psi))$$

Für die Division zweier komplexer Zahlen $z, w \in \mathbb{C}$ mit $z \neq 0$ gilt analog

$$\frac{z}{w} = \frac{|z|}{|w|} \exp(i(\varphi - \psi)) = \frac{|z|}{|w|} (\cos(\varphi - \psi) + i \sin(\varphi - \psi))$$

Potenzen und Einheitswurzeln.

Für die **n -te Potenz** z^n von $z \in \mathbb{C}$ gilt die Darstellung

$$z^n = (|z| \exp(i\varphi))^n = |z|^n \exp(in\varphi) = |z|^n (\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi))$$

Die Gleichung

$$z^n = 1$$

besitzt die n paarweise verschiedenen Lösungen

$$z_k = \exp\left(i \frac{2\pi k}{n}\right) \quad \text{für } k = 0, \dots, n-1.$$

Diese Lösungen werden als **n -te Einheitswurzeln** bezeichnet.

Kapitel 2. Komplexwertige Funktionen einer Variablen

Eine **komplexe Funktion** $w = f(z)$ ist eine Abbildung $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ mit $D \subset \mathbb{C}$, d.h. jedem $z \in D$ wird ein eindeutiges $w = f(z) \in \mathbb{C}$ zugeordnet.

Die Menge D ist der **Definitionsbereich** von f . Die Menge

$$W = f(D) = \{f(z) \mid z \in D\}$$

der **Bild- oder Wertebereich**.

Notationen:

$$z = x + iy$$

$$w = u + iv$$

$$u = u(x, y) = \operatorname{Re}(w)$$

$$v = v(x, y) = \operatorname{Im}(w)$$

Zur geometrischen Veranschaulichung komplexer Funktionen verwendet man häufig Bilder von **Koordinatennetzen**.

Kapitel 2. Komplexwertige Funktionen einer Variablen

2.1 Lineare Funktionen

Definition

Eine komplexe Funktion f heißt **linear**, falls f für feste komplexe Konstanten $a, b \in \mathbb{C}$, $a \neq 0$, eine Darstellung der folgenden Form besitzt.

$$f(z) = az + b \quad \text{für } z \in \mathbb{C}.$$

Frage: Wie können wir lineare Funktionen geometrisch deuten?

Spezialfall 1: Die Wahl $a = 1$ führt zu einer **Translation** um b ,

$$f(z) = z + b \quad \text{für } z \in \mathbb{C}$$

Spezialfall 2: Die Wahl $a \in (0, \infty)$ und $b = 0$ führt zu einer **Streckung** bzw. **Stauchung**,

$$f(z) = az \quad \text{für } z \in \mathbb{C},$$

d.h. der Betrag von z wird **gestreckt** ($a > 1$) oder **gestaucht** ($0 < a < 1$).

Allgemein spricht man von einer **Skalierung** mit **Skalierungsfaktor** $a > 0$.

Weitere Spezialfälle linearer Funktionen.

Spezialfall 3: Die Wahl $a \in \mathbb{C}$ mit $|a| = 1$ und $b = 0$ führt zu einer **Drehung** bzw. **Rotation**,

$$f(z) = az \quad \text{für } z \in \mathbb{C},$$

Genauer: eine Drehung um den Winkel $\alpha \in [0, 2\pi)$, wobei $\alpha = \arg(a)$ bzw. $a = \exp(i\alpha)$.

Spezialfall 4: Die Wahl $a \in \mathbb{C}$, $a \neq 0$ und $b = 0$ führt zu einer **Drehstreckung**

$$f(z) = az \quad \text{für } z \in \mathbb{C},$$

die wir als Komposition einer Rotation und einer Skalierung verstehen.

Genauer gilt: Für

$$a = |a| \exp(i\alpha) \quad \text{mit } \alpha = \arg(a)$$

handelt es sich um eine Rotation um den Winkel $\alpha \in [0, 2\pi)$ und eine Skalierung um $|a|$.

Der allgemeine Fall linearer Funktionen.

Für $a, b \in \mathbb{C}$, $a \neq 0$, lässt sich jede lineare Funktion

$$f(z) = az + b = |a| \exp(i\alpha)z + b$$

als Komposition

$$f = f_3 \circ f_2 \circ f_1$$

von drei Abbildungen schreiben,

- 1 $f_1(z) = \exp(i\alpha)z$ eine **Drehung** um den Winkel $\alpha \in [0, 2\pi)$;
- 2 $f_2(z) = |a|z$ eine **Streckung** um den Skalierungsfaktor $|a| > 0$;
- 3 $f_3(z) = z + b$ eine **Verschiebung** um den Vektor b .

Bemerkung

Drehung f_1 und Streckung f_2 kommutieren, d.h. lassen sich vertauschen, denn es gilt

$$f_2 \circ f_1 = f_1 \circ f_2$$

und somit

$$f = f_3 \circ f_2 \circ f_1 = f_3 \circ f_1 \circ f_2$$

2.2 Quadratische Funktionen

Definition

Eine komplexe Funktion f heißt **quadratisch**, falls f für feste Konstanten $a, b, c \in \mathbb{C}$, $a, b \neq 0$, eine Darstellung der folgenden Form besitzt.

$$f(z) = az^2 + bz + c \quad \text{für } z \in \mathbb{C}$$

Wir betrachten zunächst das geometrische Verhalten der quadratischen Funktion

$$f(z) = z^2 \quad \text{für } z \in \mathbb{C}$$

Dazu betrachten wir die Bilder der achsenparallelen Geraden unter f .

Setze $w = z^2$. Dann ergibt sich für $z = x + iy$ und $w = u + iv$ die Darstellung

$$w = u + iv = z^2 = (x + iy)^2 = x^2 - y^2 + 2ixy$$

und somit

$$u = x^2 - y^2 \quad \text{und} \quad v = 2xy.$$

Bilder achsenparalleler Geraden unter $z \mapsto z^2$.

Für das Bild einer zur x -Achse parallelen Geraden $y = y_0$ bekommt man somit

$$u = x^2 - y_0^2 \quad \text{und} \quad v = 2xy_0$$

Für $y_0 = 0$ (die x -Achse) bekommen wir $u = x^2$ und $v = 0$.

Für $y_0 \neq 0$ können wir x mit $x = v/(2y_0)$ eliminieren, und bekommen somit

$$u = \frac{v^2}{4y_0^2} - y_0^2,$$

eine nach rechts geöffnete Parabel, symmetrisch zur u -Achse mit Brennpunkt Null, und den Schnittpunkten $u = -y_0^2$ (mit u -Achse) und $v = \pm 2y_0^2$ (v -Achse).

Fazit: Die Schar zur x -Achse paralleler Geraden wird durch die quadratische Funktion $f(z) = z^2$ auf eine Schar **konfokaler** (d.h. gleiche Symmetrieachse, gleicher Brennpunkt) nach rechts geöffneter Parabeln abgebildet.

Die Geraden $y = y_0$ und $y = -y_0$ werden auf die gleiche Parabel abgebildet.

Bilder achsenparalleler Geraden unter $z \mapsto z^2$.

Für das Bild einer zur y -Achse parallelen Geraden $x = x_0$ bekommt man somit

$$u = x_0^2 - y^2 \quad \text{und} \quad v = 2x_0y$$

Für $x_0 = 0$ (die y -Achse) bekommen wir $u = -y^2$ und $v = 0$.

Für $x_0 \neq 0$ können wir y mit $y = v/(2x_0)$ eliminieren, und bekommen somit

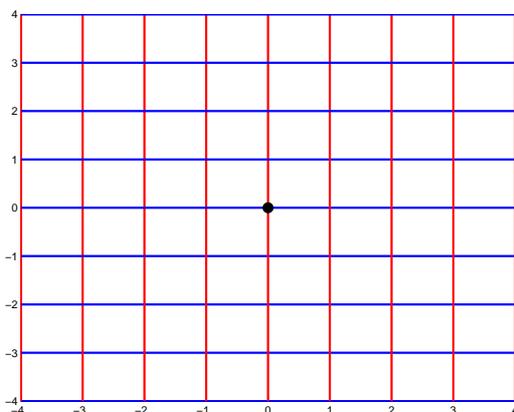
$$u = x_0^2 - \frac{v^2}{4x_0^2}$$

eine nach links geöffnete Parabel, symmetrisch zur u -Achse mit Brennpunkt Null, und den Schnittpunkten $u = -x_0^2$ (mit u -Achse) und $v = \pm 2x_0^2$ (v -Achse).

Fazit: Die Schar zur y -Achse paralleler Geraden wird durch die Funktion $f(z) = z^2$ auf eine Schar konfokaler nach links geöffneter Parabeln abgebildet.

Die Geraden $x = x_0$ und $x = -x_0$ werden auf die gleiche Parabel abgebildet.

Bilder achsenparalleler Geraden unter $z \mapsto z^2$.



Urbild.

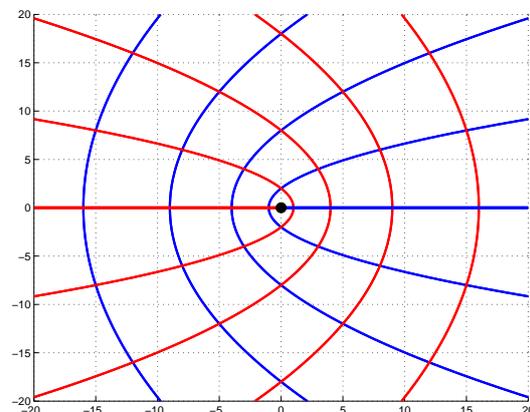


Bild von $f(z) = z^2$.

Allgemeine quadratische Funktionen.

Für $a, b, c \in \mathbb{C}$, $a, b \neq 0$, und mit der Darstellung

$$f(z) = az^2 + bz + c = a \left(z + \frac{b}{2a} \right)^2 - \frac{b^2}{4a} + c$$

setzt sich jede quadratische Funktion als Komposition

$$f = f_4 \circ f_3 \circ f_2 \circ f_1$$

von vier Abbildungen zusammen:

- 1 der Translation $f_1(z) = z + \frac{b}{2a}$;
- 2 der quadratischen Funktion $f_2(z) = z^2$;
- 3 der Drehstreckung $f_3(z) = az$;
- 4 der Translation $f_4(z) = z - \frac{b^2}{4a} + c$.

Kapitel 2. Komplexwertige Funktionen einer Variablen

2.3 Die Exponentialfunktion

Definition

Die **komplexe Exponentialfunktion** $\exp : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ ist definiert durch

$$\exp(z) = e^z = e^{x+iy} = e^x(\cos(y) + i\sin(y)) \quad \text{für } z = x + iy.$$

Beachte: Es gilt das Additionstheorem

$$e^{z_1+z_2} = e^{z_1} e^{z_2} \quad \text{für } z_1, z_2 \in \mathbb{C}.$$

Frage: Wie sieht die komplexe Exponentialfunktion $z \rightarrow \exp(z)$ aus?

Für $w = \exp(z)$, $z = x + iy$ und $w = u + iv$ bekommen wir

$$w = u + iv = e^z = e^x(\cos(y) + i\sin(y))$$

und somit

$$u = e^x \cos(y) \quad \text{und} \quad v = e^x \sin(y)$$

Bilder achsenparalleler Geraden unter $z \mapsto \exp(z)$.

Für das Bild einer zur x -Achse parallelen Geraden $y = y_0$ bekommt man somit

$$u = e^x \cos(y_0) \quad \text{und} \quad v = e^x \sin(y_0)$$

- Für festes y_0 ergibt dies einen vom Ursprung ausgehenden Strahl, der mit der positiven x -Achse den Winkel y_0 einschließt.
- Für Winkel y_0 und y_1 , die sich um ein Vielfaches von 2π unterscheiden, d.h.

$$y_1 = y_0 + 2\pi k \quad \text{für ein } k \in \mathbb{Z},$$

ergibt sich der gleiche Strahl.

- **Genauer:** Wegen der **Periodizität** von $\exp(z)$ gilt

$$e^{z+2\pi ik} = e^z e^{2\pi ik} = e^z (\cos(2\pi k) + i \sin(2\pi k)) = e^z \cdot 1 = e^z.$$

d.h. zwei Punkte mit gleichen Realteilen, deren Imaginärteile sich um ein Vielfaches von 2π unterscheiden, werden auf den gleichen Punkt abgebildet.

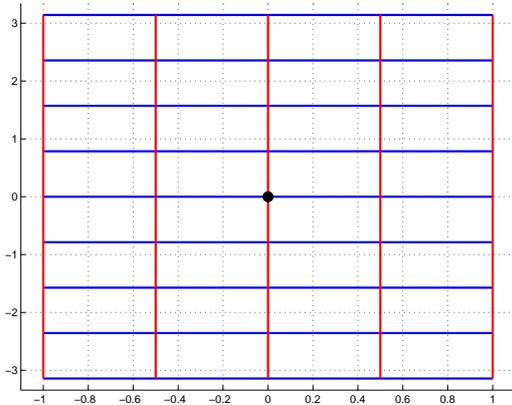
Bilder achsenparalleler Geraden unter $z \mapsto \exp(z)$.

Für das Bild einer zur y -Achse parallelen Geraden $x = x_0$ bekommt man

$$u = e^{x_0} \cos(y) \quad \text{und} \quad v = e^{x_0} \sin(y)$$

- Für festes x_0 ergibt dies einen Kreis um Null mit Radius e^{x_0} .
- **Beachte:** Der Nullpunkt liegt nicht im Bild der Exponentialfunktion, d.h. es gibt kein Argument $z \in \mathbb{C}$ mit $\exp(z) = 0$. Somit gilt $e^z \neq 0$ für alle $z \in \mathbb{C}$.
- **Beobachtung:** Die Exponentialfunktion bildet Rechteckgitter im kartesischen Koordinatensystem auf Netze von Kurven ab, die sich rechtwinklig schneiden.
- **Genauer:** Kurven, die sich im kartesischen Koordinatensystem rechtwinklig schneiden, werden unter der Exponentialfunktion \exp auf Kurven abgebildet, die sich ebenso (im jeweiligen Schnittpunkt) rechtwinklig schneiden.
- **Noch allgemeiner:** Die Exponentialfunktion ist in $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ **winkeltreu** bzw. **konform**. Genauere Details dazu später.

Bilder achsenparalleler Geraden unter $z \mapsto \exp(z)$.



Urbild.

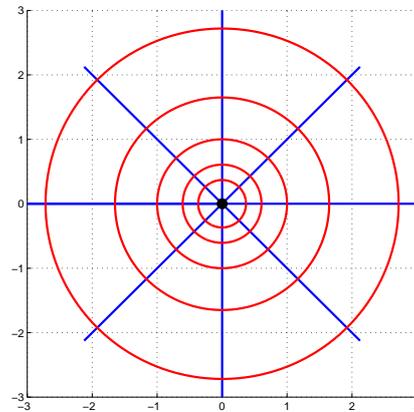


Bild von $f(z) = \exp(z)$.

Kapitel 2. Komplexwertige Funktionen einer Variablen

2.4 Die Umkehrfunktion

Definition

Eine komplexe Funktion $f(z)$ heißt **injektiv**, wenn es zu jedem Punkt $w \in \mathbb{C}$ ihres Wertebereichs genau einen Punkt $z \in \mathbb{C}$ ihres Definitionsbereichs gibt mit $f(z) = w$.

Bemerkung

Eine nicht injektive Funktion wird ggf. durch eine geeignete Einschränkung ihres Definitionsbereichs injektiv.

Beispiel

- 1** die lineare Funktion $f(z) = az + b$, $a \neq 0$, ist injektiv.
- 2** die quadratische Funktion $f(z) = z^2$, ist **nicht** injektiv, denn es gilt $f(z) = f(-z)$ für alle $z \in \mathbb{C}$.
- 3** die komplexe Exponentialfunktion $\exp(z)$ ist **nicht** injektiv, denn es gilt $\exp(z) = \exp(z + 2\pi ik)$ für alle $k \in \mathbb{Z}$ und alle $z \in \mathbb{C}$.

Einschränkung des Definitionsbereichs.

Bemerkung

Eine nicht injektive Funktion wird ggf. durch eine geeignete Einschränkung ihres Definitionsbereichs injektiv.

Beispiel

Betrachte die quadratische Funktion

$$f(z) = z^2 \quad \text{für } z \in \mathbb{C} \text{ mit } \operatorname{Re}(z) > 0$$

auf der **rechten Halbebene** $\{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) > 0\}$. Hier ist f injektiv.

Weiterhin ist in diesem Fall der Bildbereich gegeben durch die **aufgeschnittene komplexe Ebene**

$$\begin{aligned} \mathbb{C}^- &= \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Im}(z) \neq 0 \text{ oder } \operatorname{Re}(z) > 0\} \\ &= \mathbb{C} \setminus \{z \in \mathbb{R} \mid z \leq 0\} \end{aligned}$$

Graphische Darstellung des Urbild- und Bildbereichs auf Folie

Umkehrfunktion.

Definition

Sei f eine injektive Funktion mit Definitionsbereich $D(f)$ und Wertebereich $W(f)$. Dann ist die **Umkehrfunktion** $f^{-1} : W(f) \rightarrow D(f)$ zu f diejenige Funktion, die jedem Punkt $w \in W(f)$ den (eindeutigen) Punkt $z \in D(f)$ mit $f(z) = w$ zuordnet, d.h. es gilt $f^{-1}(w) = z$ bzw.

$$(f^{-1} \circ f)(z) = z \quad \text{für alle } z \in D(f)$$

$$(f \circ f^{-1})(w) = w \quad \text{für alle } w \in W(f)$$

Beispiel

Für den Definitionsbereich

$$D(f) = \{z = re^{i\varphi} \in \mathbb{C} \mid r > 0 \text{ und } -\pi/2 < \varphi < \pi/2\}$$

existiert die Umkehrfunktion f^{-1} von $f(z) = z^2$ mit Wertebereich $W(f) = \mathbb{C}^-$.

Für den **Hauptwert der Wurzel** $f^{-1} : W(f) \rightarrow D(f)$ gilt

$$w = f^{-1}(z) = \sqrt{r}e^{i\varphi/2} \quad \text{für } z = re^{i\varphi} \text{ mit } \varphi = \arg(z) \in (-\pi, \pi).$$

2.5 Der komplexe Logarithmus

Ziel: Umkehrung der komplexen Exponentialfunktion

$$f(z) = \exp(z).$$

Beachte: Die Exponentialfunktion $\exp(z)$ ist für **alle** $z \in \mathbb{C}$ erklärt, und es gilt

$$D(\exp) = \mathbb{C} \quad \text{und} \quad W(f) = \mathbb{C} \setminus \{0\}$$

für den Definitions- und Wertebereich.

Aber: Die Exponentialfunktion ist nicht injektiv auf \mathbb{C} .

Also: Zur Konstruktion einer Umkehrfunktion \exp^{-1} von \exp müssen wir den Definitionsbereich von \exp geeignet einschränken.

Frage: Sei $z = x + iy \in W(\exp)$. Welche Werte $w = u + iv$ kommen in Frage, so dass gilt

$$e^w = z?$$

Konstruktion des komplexen Logarithmus.

Ausgangspunkt: Für $z = x + iy \in W(\exp)$ soll gelten

$$e^w = z \quad \text{für ein } w = u + iv \in \mathbb{C}.$$

Dann gilt

$$|e^w| = |e^u| = |z|$$

und somit $u = \ln(|z|)$, wobei $\ln : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ der **reelle** Logarithmus ist.

Weiterhin gilt

$$\arg(e^w) = \arg(e^{u+iv}) = \arg(e^u e^{iv}) = v$$

und somit $v = \arg(z) + 2\pi k$ für ein $k \in \mathbb{Z}$.

Daher besteht die Menge der Lösungen von $e^w = z$ aus den komplexen Zahlen

$$w = \ln(|z|) + i(\arg(z) + 2\pi k) \quad \text{mit einem } k \in \mathbb{Z}.$$

Die Menge der Lösungen von $e^w = z$ heißt **komplexer Logarithmus** von z .

Beispiele.

Die Funktion $\text{Log}(z)$ bezeichnet den komplexen Logarithmus von z .

Beispiel

- 1 Wie sieht die Menge $\text{Log}(-1)$ aus? Zunächst gilt $\ln(|-1|) = \ln(1) = 0$ und das Argument von -1 ist $\arg(-1) = \pi$. Somit gilt

$$\text{Log}(-1) = \{i(2k+1)\pi \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

für die Werte des Logarithmus von -1 .

- 2 Wie sieht die Menge $\text{Log}(-1+i)$ aus? Zunächst gilt $|-1+i| = \sqrt{2}$ und weiterhin ist $\arg(-1+i) = \frac{3\pi}{4}$ das Argument von $-1+i$. Somit gilt

$$\text{Log}(-1+i) = \left\{ \ln(\sqrt{2}) + i \left(\frac{3\pi}{4} + 2\pi k \right) \mid k \in \mathbb{Z} \right\}$$

für die Werte des Logarithmus von $-1+i$.

- 3 Für $x > 0$ gilt $\text{Log}(x) = \{\ln(x) + 2\pi ik \mid k \in \mathbb{Z}\}$.

Der Hauptwert des Logarithmus.

Die vorherigen Überlegungen zur Gleichung

$$z = e^w$$

zeigten, dass die Exponentialfunktion auf dem Streifen

$$S = \{w \in \mathbb{C} \mid -\pi < \text{Im}(w) < \pi\}$$

injektiv ist. Der zugehörige Wertebereich ist \mathbb{C}^- .

Der einzige Wert von $\text{Log}(z)$, der zu dem Streifen S gehört, ist

$$w = \log(|z|) + i \arg(z) \quad \text{mit } -\pi < \arg(z) < \pi.$$

Dieser Wert heißt der **Hauptwert des Logarithmus** von z , kurz $\ln(z)$.

Bemerkung

Der Hauptwert des Logarithmus ist nur in der aufgeschnittenen komplexen Ebene \mathbb{C}^- definiert. Auf der negativen reellen Achse und bei $z = 0$ ist $\ln(z)$ nicht definiert. Auf der positiven reellen Achse stimmt $\ln(z)$ mit dem reellen Logarithmus $\ln(x)$ überein.

2.6 Die Joukowski–Funktion

Die **Joukowski–Funktion**, definiert durch

$$f(z) = \frac{1}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right) \quad \text{für } z \neq 0,$$

ist im Zusammenhang mit Problemen der Strömungsdynamik von Interesse.

Beobachtung: Es gilt die Symmetrie

$$f(z) = f(1/z) \quad \text{für } z \neq 0.$$

Ziel: Analysiere das geometrische Verhalten der Joukowski–Funktion.

Bestimme dazu für

$$w = \frac{1}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right)$$

die Bilder der Kreise $|z| = \text{const.}$ und der Strahlen $\arg(z) = \text{const.}$.

Geometrisches Verhalten der Joukowski–Funktion.

Für $z = re^{i\varphi}$ und $w = u + iv$ bekommen wir

$$u + iv = \frac{1}{2} \left(re^{i\varphi} + \frac{1}{r} e^{-i\varphi} \right)$$

und somit

$$u = \frac{1}{2} \left(r + \frac{1}{r} \right) \cos(\varphi) \quad \text{und} \quad v = \frac{1}{2} \left(r - \frac{1}{r} \right) \sin(\varphi).$$

Für das Bild des Kreises $r \equiv r_0 > 0$ erhält man die Parameterdarstellung

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{1}{2} \left(r_0 + \frac{1}{r_0} \right) \cos(\varphi) \\ v &= \frac{1}{2} \left(r_0 - \frac{1}{r_0} \right) \sin(\varphi) \end{aligned} \right\} \quad 0 \leq \varphi < 2\pi,$$

für den Einheitskreis $r_0 \equiv 1$ somit $u = \cos(\varphi)$, für $0 \leq \varphi < 2\pi$, und $v \equiv 0$, also die Strecke zwischen den Punkten -1 und 1 , die **zweimal** durchlaufen wird.

Geometrisches Verhalten der Joukowski–Funktion.

Für $r_0 \neq 1$ können wir φ eliminieren, womit man die Ellipse

$$\frac{u^2}{\frac{1}{4} \left(r_0 + \frac{1}{r_0}\right)^2} + \frac{v^2}{\frac{1}{4} \left(r_0 - \frac{1}{r_0}\right)^2} = 1$$

mit den Halbachsen

$$a = \frac{1}{2} \left(r_0 + \frac{1}{r_0}\right) \quad \text{und} \quad b = \frac{1}{2} \left|r_0 - \frac{1}{r_0}\right|$$

und den Brennpunkten ± 1 bekommt.

Fazit: Die Joukowski–Funktion bildet eine Schar von Kreisen $r \equiv \text{const.}$ auf eine Schar **konfokaler Ellipsen** ab. Die beiden Kreise $r \equiv r_0$ und $r \equiv 1/r_0$ werden dabei auf die gleiche Ellipse abgebildet.

Geometrisches Verhalten der Joukowski–Funktion.

Für die Bilder des Strahls $\varphi \equiv \varphi_0$ bekommt man

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{1}{2} \left(r + \frac{1}{r}\right) \cos(\varphi_0) \\ v &= \frac{1}{2} \left(r - \frac{1}{r}\right) \sin(\varphi_0) \end{aligned} \right\} \quad 0 < r < \infty,$$

für die positive x -Achse $\varphi_0 = 0$ somit

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{1}{2} \left(r + \frac{1}{r}\right) \\ v &= 0 \end{aligned} \right\} \quad 0 < r < \infty,$$

das Stück $\{(u, 0) \mid 1 \leq u < \infty\}$ der u -Achse.

Analog erhalten wir für die negative x -Achse $\varphi_0 = \pi$ das Stück $-\infty < u < -1$.

Die Strahlen $\varphi_0 = \pi/2$ (positive y -Achse) und $\varphi_0 = 3\pi/2$ (negative y -Achse) werden auf die komplette v -Achse abgebildet.

Geometrisches Verhalten der Joukowski–Funktion.

Falls $\varphi_0 \notin \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$, so können wir r eliminieren, womit wir die Hyperbel

$$\frac{u^2}{\cos^2(\varphi_0)} - \frac{v^2}{\sin^2(\varphi_0)} = 1$$

mit den Halbachsen

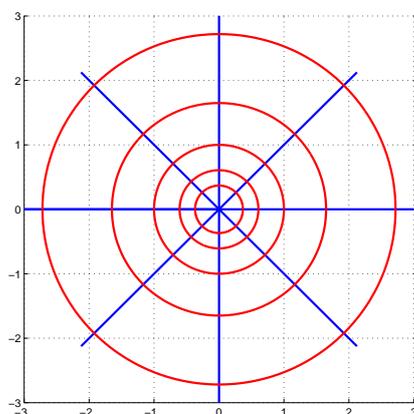
$$a = |\cos(\varphi_0)| \quad \text{und} \quad b = |\sin(\varphi_0)|$$

bekommen. Der Abstand der Brennpunkte der Hyperbel von Zentrum beträgt

$$\sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{\cos^2(\varphi_0) + \sin^2(\varphi_0)} = 1.$$

Somit liegen die beiden Brennpunkte bei ± 1 .

Bilder unter der Joukowski–Funktion.



Urbild.

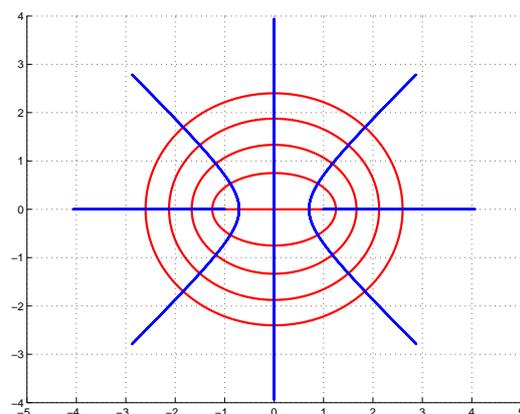


Bild der Joukowski–Funktion.

Weitere Bemerkungen zur Joukowski–Funktion.

- 1 Die Joukowski–Funktion bildet das Polarkoordinatennetz auf ein Netz von Ellipsen und Hyperbeln ab, die sich jeweils im rechten Winkel schneiden. Die Joukowski–Funktion ist winkeltreu.
- 2 Die Joukowski–Funktion ist auf ihrem Definitionsbereich $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ **nicht** injektiv, denn für jedes $z \in \mathbb{C} \setminus \{\pm 1, 0\}$ gilt $z \neq 1/z$, aber $f(z) = f(1/z)$.
- 3 Auf den folgenden zwei Einschränkungen ihres Definitionsbereichs ist die Joukowski–Funktion injektiv.
 - Auf dem **Komplement des Einheitskreises** $D(f) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| > 1\}$.
 - Auf der **oberen Halbebene** $D(f) = \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Im}(z) > 0\}$.
- 4 Die Umkehrfunktion $w = f^{-1}(z)$ der Joukowski–Funktion $f(w)$ bekommt man durch Auflösen resultierender der quadratischen Gleichung

$$w^2 - 2zw + 1 = 0$$

nach w in dem jeweiligen Definitionsbereich $D(f)$, somit $w = z + \sqrt{z^2 - 1}$.

Kapitel 3. Die Möbius–Transformation

3.1 Die stereographische Projektion

Vorbemerkungen: Bei der Untersuchung rationaler Funktionen

$$R(z) = \frac{p(z)}{q(z)} \quad \text{mit Polynomen } p, q : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$$

ist es sinnvoll, die **Lücken** des Definitionsbereichs (d.h. die Nullstellen von $q(z)$) dadurch zu schließen, dass man $R(z)$ dort den “Wert” ∞ zuordnet, sofern nicht gleichzeitig der Zähler $p(z)$ dort verschwindet.

Notation: Falls $z^* \in \mathbb{C}$ eine Nullstelle von q ist, d.h. $q(z^*) = 0$, und $p(z^*) \neq 0$, so schreibt man $R(z^*) = \infty$, d.h. der Wertebereich von R wird um die “Zahl” ∞ erweitert.

Definition

In der Erweiterung $\mathbb{C}^* = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$ der komplexen Zahlenebene wird ∞ als **unendlich ferner Punkt** bezeichnet.

Erweiterung der Rechenregeln für \mathbb{C}^* .

Auf der erweiterten komplexen Zahlenebene \mathbb{C}^* werden zusätzlich zu den üblichen Rechenregeln in \mathbb{C} folgende **Rechenregeln** definiert.

$$a + \infty := \infty \quad \text{für } a \in \mathbb{C}$$

$$a \cdot \infty := \infty \quad \text{für } a \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$$

$$a/\infty := 0 \quad \text{für } a \in \mathbb{C}$$

Warnung: Die Verknüpfungen $0 \cdot \infty$ und $\infty \pm \infty$ lassen sich nicht sinnvoll (d.h. nicht widerspruchsfrei) definieren.

Topologische Bedeutung: Die erweiterte komplexe Zahlenebene \mathbb{C}^* ist ein **topologischer Raum**. Für eine komplexe Zahlenfolge $\{z_n\}_n$, $z_n \neq 0$, gilt

$$z_n \rightarrow \infty \quad \text{für } n \rightarrow \infty \quad \iff \quad 1/z_n \rightarrow 0 \quad \text{für } n \rightarrow \infty$$

Der Raum \mathbb{C}^* ist **folgenkompakt**, d.h. **jede** Folge in \mathbb{C}^* besitzt (mindestens) einen Häufungspunkt. Daher wird \mathbb{C}^* als **Kompaktifizierung** von \mathbb{C} bezeichnet.

Die stereographische Projektion.

Definition

Die stereographische Projektion ist diejenige Abbildung $P: \mathbb{S}^2 \rightarrow \mathbb{C}^*$ der **Riemannschen Zahlenkugel**

$$\mathbb{S}^2 = \{x \in \mathbb{R}^3 \mid \|x\| = 1\}$$

auf die erweiterte komplexe Ebene \mathbb{C}^* , die jedem Punkt $x \in \mathbb{S}^2$, $x \neq N = (0, 0, 1)^T$, den Durchstoßpunkt $P(x)$ der Geraden durch x und n durch die x_1 - x_2 -Ebene zuordnet, wobei $P(N) := \infty$ definiert wird.

Die stereographische Projektion besitzt die folgende analytische Darstellung:

$$z = P(x) = \frac{x_1 + ix_2}{1 - x_3} \in \mathbb{C}^* \quad \text{für } (x_1, x_2, x_3)^T \in \mathbb{S}^2.$$

Bemerkung

- 1 Die stereographische Projektion $P: \mathbb{S}^2 \rightarrow \mathbb{C}^*$ ist bijektiv.
- 2 Die Umkehrabbildung P^{-1} ist gegeben durch $P^{-1}(\infty) = (0, 0, 1)^T$ und

$$x = P^{-1}(z) = \left(\frac{z + \bar{z}}{1 + |z|^2}, \frac{z - \bar{z}}{i(1 + |z|^2)}, \frac{z\bar{z} - 1}{1 + |z|^2} \right)^T \in \mathbb{S}^2 \quad \text{für } z \in \mathbb{C}.$$

Geometrie der stereographischen Projektion.

Unter einem **sphärischen Bild** U einer Menge $B \subset \mathbb{C}^*$ verstehen wir im folgenden das Urbild unter der stereographischen Projektion, so dass $P(U) = B$.

Satz

Für die stereographische Projektion gelten die folgenden Eigenschaften.

- Das sphärische Bild einer Geraden in \mathbb{C}^* ist ein Kreis auf \mathbb{S}^2 , der durch N geht.
- Ein Kreis auf \mathbb{S}^2 , der durch N geht, wird durch die stereographische Projektion auf eine Gerade in \mathbb{C}^* abgebildet.
- Das sphärische Bild eines Kreises in \mathbb{C} ist ein Kreis auf \mathbb{S}^2 , der nicht durch N geht.
- Ein Kreis auf \mathbb{S}^2 , der nicht durch N geht, wird durch die stereographische Projektion auf einen Kreis in \mathbb{C} abgebildet.
- Die stereographische Projektion ist **kreistreu**.

Kapitel 3. Die Möbius–Transformation

3.2 Möbius–Transformationen

Definition

Eine rationale Abbildung der Form

$$w = T(z) = \frac{az + b}{cz + d} \quad \text{mit } ad \neq bc$$

heißt **Möbius–Transformation**.

Bemerkung

Für eine Möbius–Transformation $T : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$ gilt

- Zähler und Nenner haben verschiedene Nullstellen.
- Es gilt $T(-d/c) = \infty$ und $T(\infty) = a/c$.
- Die Abbildung $T(z)$ ist bijektiv mit Umkehrabbildung $T^{-1} : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$

$$T^{-1}(w) = \frac{dw - b}{-cw + a}.$$

- Analogie zu der Inversen einer (2×2) –Matrix

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}.$$

Komposition von Möbius-Transformationen.

Satz

Die Komposition zweier Möbius-Transformationen ist **wieder** eine Möbius-Transformation. Genauer gilt

$$w = T_1(z) = \frac{az + b}{cz + d} \quad \text{für } ad \neq bc$$
$$u = (T_2 \circ T_1)(z) = T_2(w) = \frac{\alpha w + \beta}{\gamma z + \delta} \quad \text{für } \alpha\delta \neq \beta\gamma$$
$$= \frac{Az + B}{Cz + D}$$

Die Koeffizienten A, B, C und D ergeben sich aus dem **Matrixprodukt**

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

Insbesondere gilt wegen $\det(AB) = \det A \cdot \det B$

$$AD - BC = (ad - bc) \cdot (\alpha\delta - \beta\gamma) \neq 0$$

Kreistreue von Möbius-Transformationen.

Satz

Möbius-Transformationen sind **kreistreu**, d.h. (verallgemeinerte) Kreise in \mathbb{C}^* gehen durch Möbius-Transformationen in (verallgemeinerte) Kreise über.

Beweis: Verwende eine geeignete Zerlegung für $c \neq 0$

$$\frac{az + b}{cz + d} = \frac{\frac{a}{c}(cz + d) - \frac{ad}{c} + b}{cz + d} = \frac{a}{c} - \frac{ad - bc}{c} \cdot \frac{1}{cz + d}$$

Wir setzen nun

$$w_1 = cz + d$$

$$w_2 = \frac{1}{w_1}$$

$$w_3 = \frac{a}{c} - \frac{ad - bc}{c} \cdot w_2$$

Die Abbildungen w_1 und w_3 sind linear und daher **kreistreu**.

Fortsetzung des Beweises.

Es bleibt zu zeigen:

Die Inversion $w = f(z) = 1/z$ ist eine kreistreue Abbildung.

Gehe den Umweg über die stereographische Projektion, d.h. betrachte statt $z \rightarrow 1/z$ die Abbildungsfolge

$$z \rightarrow \mathbf{x} := P^{-1}(z) \rightarrow \tilde{\mathbf{x}} \rightarrow P(\bar{\mathbf{x}}) = \frac{1}{z}$$

Dann gilt

$$\mathbf{x} = P^{-1}(z) = \left(\frac{z + \bar{z}}{z\bar{z} + 1}, \frac{z - \bar{z}}{i(z\bar{z} + 1)}, \frac{z\bar{z} - 1}{z\bar{z} + 1} \right)^T$$

sowie

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}} &:= P^{-1}\left(\frac{1}{z}\right) \\ &= \left(\frac{\frac{1}{z} + \frac{1}{\bar{z}}}{\frac{1}{z}\frac{1}{\bar{z}} + 1}, \frac{\frac{1}{z} - \frac{1}{\bar{z}}}{i\left(\frac{1}{z}\frac{1}{\bar{z}} + 1\right)}, \frac{\frac{1}{z}\frac{1}{\bar{z}} - 1}{\frac{1}{z}\frac{1}{\bar{z}} + 1} \right)^T \end{aligned}$$

Komplettierung des Beweises.

Eine Vereinfachung ergibt

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}} &= \left(\frac{z + \bar{z}}{z\bar{z} + 1}, -\frac{z - \bar{z}}{i(z\bar{z} + 1)}, -\frac{z\bar{z} - 1}{z\bar{z} + 1} \right) \\ &= (x_1, -x_2, -x_3)^T \end{aligned}$$

Wir erhalten damit eine Abbildung $F : S^2 \rightarrow S^2$ mit

$$F(\mathbf{x}) = (x_1, -x_2, -x_3)^T$$

Diese Abbildung ist eine Drehung der Sphäre um die x_1 -Achse um 180° und offensichtlich **kreistreu**.

Damit haben wir gezeigt, dass die Abbildungsfolge

$$z \rightarrow \mathbf{x} := P^{-1}(z) \rightarrow \tilde{\mathbf{x}} \rightarrow P(\bar{\mathbf{x}}) = \frac{1}{z}$$

und daher die Inversion $z \rightarrow 1/z$ eine kreistreue Abbildung ist.

Bemerkungen zu Möbius-Transformationen.

Bemerkung

Für eine Möbius-Transformation

$$w = T(z) = \frac{az + b}{cz + d} \quad \text{mit } ad \neq bc$$

gelten die folgenden Eigenschaften.

- (Verallgemeinerte) Kreise durch den Punkt $-d/c$ werden durch T auf Geraden in der w -Ebene abgebildet.
- Alle Geraden der z -Ebene werden durch T in (verallgemeinerte) Kreise der w -Ebene durch den Punkt a/c abgebildet.
- Kreise, die **nicht** durch den Punkt $-d/c$ gehen, werden durch T in Kreise abgebildet, die **nicht** durch den Punkt a/c gehen.

Doppelverhältnisse und Möbius-Transformationen.

Satz

Seien $z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C}^*$ und $w_1, w_2, w_3 \in \mathbb{C}^*$ jeweils paarweise verschieden. Dann gibt es **genau eine** Möbius-Transformation $w = T(z)$, die die Interpolationsbedingungen

$$w_j = T(z_j) \quad \text{für } j = 1, 2, 3$$

erfüllt. Die interpolierende Möbius-Transformation $T(z)$ ist gegeben durch die **Dreipunkteformel**

$$\frac{w - w_1}{w - w_2} : \frac{w_3 - w_1}{w_3 - w_2} = \frac{z - z_1}{z - z_2} : \frac{z_3 - z_1}{z_3 - z_2}.$$

Definition

Den Ausdruck

$$D(z_0, z_1, z_2, z_3) = \frac{z_0 - z_1}{z_0 - z_2} : \frac{z_3 - z_1}{z_3 - z_2}.$$

nennt man das **Doppelverhältnis** der Punkte z_0, z_1, z_2, z_3 .

Beispiel.

Gesucht ist die Möbius–Transformation mit den **Interpolationsbedingungen**

$$\begin{array}{c|ccc} z_j & 1 & i & 0 \\ \hline w_j & i & -i & 0 \end{array}$$

Wir erhalten diese eindeutige Möbius–Transformation durch den Ansatz

$$\frac{w-i}{w+i} : \frac{0-i}{0+i} = \frac{z-1}{z-i} : \frac{0-1}{0-i}$$

Eine Vereinfachung ergibt

$$-\frac{w-i}{w+i} = i \frac{z-1}{z-i}$$

bzw.

$$(z-i)(w-i) = -i(z-1)(w+i)$$

und dies liefert schließlich die Darstellung

$$w = \frac{(1+i)z}{(1+i)z - 2i}$$

Symmetrie zum Kreis.

Definition

Gegeben sei ein Kreis C in \mathbb{C} mit Mittelpunkt $z_0 \in \mathbb{C}$ und Radius R . Zwei Punkte $z, z' \in \mathbb{C}$ liegen **symmetrisch zum Kreis C** , falls gilt

$$(z - z_0)\overline{(z' - z_0)} = R^2$$

Die Abbildung $z \rightarrow z'$ nennt man die **Inversion am Kreis C** oder auch **Spiegelung am Kreis C** .

Graphische Darstellung der Spiegelung an der Tafel!

Bemerkung

- Ein Punkt z mit $|z - z_0| \leq R$ ist stets zu einem Punkt z' mit $|z' - z_0| \geq R$ symmetrisch.
- Gilt $|z - z_0| = R$, so ist z zu sich selbst symmetrisch, d.h. $z' = z$.
- Der Punkt $z = z_0$ ist zu $z' = \infty$ symmetrisch.

Möbius-Transformationen und Kreissymmetrien.

Definition

Zwei Punkte z, z' nennt man **symmetrisch zu einer Geraden** in \mathbb{C} , wenn z' aus z durch Spiegelung an der Geraden entsteht.

Satz

Möbius-Transformationen erhalten **Symmetrien** zu (verallgemeinerten) Kreisen.

Genauer gilt:

Ist C ein (verallgemeinerter) Kreis in \mathbb{C}^* und liegen z und z' symmetrisch zu C , so liegen die Bilder von z, z' unter einer Möbius-Transformation symmetrisch zu demjenigen (verallgemeinerten) Kreis in \mathbb{C}^* , der das Bild von C darstellt.

Beispiel

Gesucht ist eine Möbius-Transformation $w = T(z)$, die den Kreis $|z| = 2$ auf den Kreis $|w + 1| = 1$ abbildet mit $T(-2) = 0$ und $T(0) = i$.

Eine Möbius-Transformation ist eindeutig bestimmt, falls die Transformation von **drei** Punkten festgelegt ist. Wir haben aber nur

$$z_1 = -2, z_2 = 0 \quad \text{und} \quad w_1 = 0, w_2 = i.$$

Uns fehlt also **ein** Punkt!

Fortsetzung des Beispiels.

Nach dem letzten Satz erhalten Möbius-Transformationen die Symmetrie zu verallgemeinerten Kreisen.

$$z_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad z_3 = \infty \quad \text{ist symmetrisch zu } z_2 \text{ bzgl. des Kreises } |z| = 2$$

Daher ist w_3 der zu $w_2 = i$ symmetrische Punkt bezüglich des Kreises $|w + 1| = 1$ und somit gegeben durch die Bedingung $(w_2 + 1)(\overline{w_3 + 1}) = 1$, also

$$w_3 = \frac{1}{2}(-1 + i)$$

Anwendung der **Dreipunkteformel** liefert

$$\frac{w - 0}{w - i} : \frac{w_3 - 0}{w_3 - i} = \frac{z + 2}{z - 0} : \frac{z_3 + 2}{z_3 - 0}$$

Was passiert mit dem Term

$$\frac{z_3 + 2}{z_3 - 0}$$

für $z_3 \rightarrow \infty$?

Komplettierung des Beispiels.

Was passiert mit dem Term

$$\frac{z_3 + 2}{z_3 - 0}$$

für $z_3 \rightarrow \infty$?

Es gilt

$$\frac{z_3 + 2}{z_3 - 0} = \frac{1 + \frac{2}{z_3}}{1 + \frac{0}{z_3}} \rightarrow 1 \quad \text{für } z_3 \rightarrow \infty$$

Wir erhalten also

$$\left(\frac{w}{w-i} \right) : \left(\frac{\frac{1}{2}(-1+i)}{\frac{1}{2}(-1+i)-i} \right) = \left(\frac{z+2}{z} \right)$$

und Auflösung nach w ergibt

$$w = T(z) = -\frac{z+2}{(1+i)z+2i}$$

Beispiel.

Für $b > a > 0$ betrachten wir die Möbius-Transformation

$$w = T(z) = \frac{z+p}{-z+p} \quad \text{wobei } p = \sqrt{ab} \in (a, b)$$

Für die folgenden Auswertungen von T bekommen wir

$$z_{1,2} = \pm p \quad \rightarrow \quad w_{1,2} = \infty, 0$$

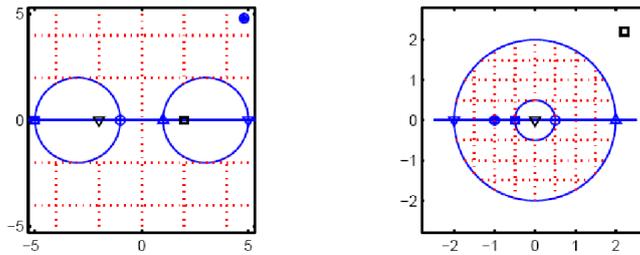
$$z_{3,4} = a, b \quad \rightarrow \quad w_{3,4} = \pm \frac{\sqrt{a} + \sqrt{b}}{\sqrt{b} - \sqrt{a}} =: \rho > 1$$

$$z_{5,6} = -a, -b \quad \rightarrow \quad w_{5,6} = \pm \frac{\sqrt{b} - \sqrt{a}}{\sqrt{a} + \sqrt{b}} = \pm \frac{1}{\rho}$$

$$z_{7,8} = 0, \infty \quad \rightarrow \quad z_{7,8} = 1, -1.$$

Fortsetzung des Beispiels.

- Die x -Achse wird durch T auf die u -Achse abgebildet.
- Punkte, die symmetrisch zur x -Achse liegen, werden auf Punkte abgebildet, die symmetrisch zur u -Achse liegen.
- Kreise, die symmetrisch zur x -Achse liegen, werden auf Kreise abgebildet, die symmetrisch zur u -Achse liegen.



Relevante Anwendung: Das elektrostatische Feld im Äußeren von zwei stromdurchflossenen parallelen Leitern wird in das Feld eines Zylinderkondensators abgebildet.

Kapitel 4. Differentialrechnung im Komplexen

4.1 Komplexe Differentiation

Definition

Sei $f : D \rightarrow \mathbb{C}$, $D \subset \mathbb{C}$ eine komplexe Funktion. Dann heißt $f(z)$ im Punkt $z_0 \in D^0$ **komplex differenzierbar** mit Ableitung $f'(z_0)$, falls der folgende Grenzwert existiert,

$$f'(z_0) = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0}$$

Ist $f(z)$ in jedem Punkt eines Gebietes D komplex differenzierbar, so nennt man $f(z)$ **holomorph**, **analytisch** oder **regulär** auf D .

Bemerkung

- 1 Der Grenzwertprozess $z \rightarrow z_0$ erfolgt in der komplexen Ebene, d.h. die Richtung der Annäherung $z \rightarrow z_0$ ist **beliebig**.
- 2 Die oben stehende Division ist die Division **komplexer** Zahlen.

4.1 Komplexe Differentiation

Lemma

Ist $f(z)$ reellwertig, d.h. $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{C}$ ein Gebiet, und ist $f(z)$ holomorph auf D , dann ist $f(z)$ eine konstante Funktion.

Beweis: Wir betrachten zuerst die Folge $z_n \rightarrow z_0$ gegeben durch

$$z_n = z_0 + \frac{1}{n}$$

Dann ist der Differenzenquotient für alle $n \in \mathbb{N}$ reell, denn

$$\frac{f(z_n) - f(z_0)}{z_n - z_0} = n(f(z_n) - f(z_0)) \in \mathbb{R}$$

Dagegen liefert die Folge $z_n \rightarrow z_0$ mit $z_n = z_0 + i/n$ den rein imaginären Differenzenquotienten

$$\frac{f(z_n) - f(z_0)}{z_n - z_0} = \frac{n}{i}(f(z_n) - f(z_0)) \in \mathbb{C}$$

Da aber die Funktion auf D holomorph ist, folgt

$$f'(z_0) = 0 \quad \text{für alle } z_0 \in D.$$

Die Cauchy–Riemannschen Differentialgleichungen.

Bemerkung

Ist die Funktion $f(z)$ in z_0 komplex differenzierbar, so folgt

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0) - f'(z_0)(z - z_0)}{z - z_0} = 0$$

bzw. äquivalent dazu

$$f(z) = f(z_0) + f'(z_0)(z - z_0) + o(|z - z_0|)$$

Sei nun $f(z)$ im Punkt z_0 komplex differenzierbar. Setzen wir

$$\gamma := f'(z_0),$$

so folgt nach obiger Bemerkung die äquivalente Schreibweise

$$f(z) = f(z_0) + \gamma(z - z_0) + \varepsilon(z)|z - z_0|$$

mit $\varepsilon(z) \rightarrow 0$ für $z \rightarrow z_0$.

Die Cauchy–Riemannschen Differentialgleichungen.

Wir verwenden nun mit $z = x + iy$ die **Darstellungen**

$$f(z) = u(z) + iv(z) = u(x, y) + iv(x, y)$$

und

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

Damit erhalten wir

$$u(z) = u(z_0) + \alpha(x - x_0) - \beta(y - y_0) + \operatorname{Re}(\varepsilon(z)) \cdot |z - z_0|$$

$$v(z) = v(z_0) + \beta(x - x_0) + \alpha(y - y_0) + \operatorname{Im}(\varepsilon(z)) \cdot |z - z_0|$$

In **Matrixschreibweise** lautet dies

$$\begin{pmatrix} u(z) \\ v(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u(z_0) \\ v(z_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{pmatrix} + \varepsilon(z) \cdot |z - z_0|$$

Die Cauchy–Riemannschen Differentialgleichungen.

Wir interpretieren jetzt $f(z)$ als eine vektorwertige, **total differenzierbare** Funktion zweier reeller Variablen, d.h.

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$$

mit der **Jakobi–Matrix**

$$Jf(x_0, y_0) = \left(\begin{array}{cc} u_x & u_y \\ v_x & v_y \end{array} \right) \Big|_{(x_0, y_0)} = \begin{pmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}$$

Satz

Die Funktion $f(z)$ ist im Punkt $z_0 \in D$ genau dann komplex differenzierbar, wenn $f(z)$ als Funktion $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ dort total differenzierbar ist und die **Cauchy–Riemannschen Differentialgleichungen** gelten

$$u_x(z_0) = v_y(z_0)$$

$$u_y(z_0) = -v_x(z_0)$$

Darstellung der komplexen Ableitung.

Korollar

Ist $f(z)$ komplex differenzierbar in $z_0 \in D$, so folgt

$$f'(z_0) = u_x(z_0) + iv_x(z_0).$$

Beweis: Da $f'(z_0) \in \mathbb{C}$ schreiben wir

$$f'(z_0) = \tilde{u}(z_0) + i\tilde{v}(z_0)$$

Daraus ergibt sich

$$\begin{aligned} f'(z_0) \cdot (z - z_0) &= (\tilde{u}(z_0) + i\tilde{v}(z_0)) \cdot [(x - x_0) + i(y - y_0)] \\ &= \tilde{u} \cdot (x - x_0) - \tilde{v} \cdot (y - y_0) + i(\tilde{v} \cdot (x - x_0) + \tilde{u} \cdot (y - y_0)) \end{aligned}$$

Da f in z_0 total differenzierbar ist und die Cauchy–Riemannschesen DGL's erfüllt sind, gilt ebenfalls

$$\begin{pmatrix} u_x & -v_x \\ v_x & u_x \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x \cdot (x - x_0) - v_x \cdot (y - y_0) \\ v_x \cdot (x - x_0) + u_x \cdot (y - y_0) \end{pmatrix}$$

Holomorphe Funktionen und die Laplacegleichung.

Satz

Ist $f \in \mathcal{C}^2$ holomorph auf D , so gilt

$$u_{xx} + u_{yy} = v_{xx} + v_{yy} = 0,$$

d.h. sowohl der Real- als auch der Imaginärteil von f erfüllen die Laplacegleichung.

Beweis: Ist $f(z)$ holomorph, so folgt

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \stackrel{\text{C.R.}}{=} \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0 \\ \Delta v &= \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \stackrel{\text{C.R.}}{=} -\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} = 0 \end{aligned}$$

Es gilt auch die folgende **Umkehrung**: Erfüllt $u = u(x, y)$ auf einem zusammenhängenden Gebiet die Laplacegleichung $\Delta u = 0$, so existiert eine differenzierbare Funktion $v = v(x, y)$, sodass $f(z) = u(z) + iv(z)$ auf D holomorph ist.

Beweis der Umkehrung.

Sei $u = u(x, y)$ mit $\Delta u = 0$ gegeben. Gesucht ist eine Funktion $v = v(x, y)$, sodass die Cauchy–Riemannschen Differentialgleichungen erfüllt sind, also

$$v_x = -u_y \quad v_y = u_x$$

Aus den C.R. DGL's folgt

$$\text{grad } v = (v_x, v_y) = (-u_y, u_x) =: V = (V_1, V_2)$$

Wir suchen also ein Potential v mit $\text{grad } v = V$. Unter der [Integrabilitätsbedingung](#)

$$\frac{\partial V_1}{\partial y} - \frac{\partial V_2}{\partial x} = 0$$

ist die Existenz eines solchen Potentials gesichert.

Nun gilt aber

$$\frac{\partial V_1}{\partial y} - \frac{\partial V_2}{\partial x} = -u_{yy} - u_{xx} = -\Delta u = 0$$

Differentiationsregeln.

- Es gelten die folgenden Regeln:

$$(f \pm g)'(z_0) = f'(z_0) \pm g'(z_0)$$

$$(f \cdot g)'(z_0) = f'(z_0)g(z_0) + f(z_0)g'(z_0)$$

$$\left(\frac{f}{g}\right)'(z_0) = \frac{f'(z_0)g(z_0) - f(z_0)g'(z_0)}{(g(z_0))^2}$$

- **Kettenregel:** Ist $f(z)$ differenzierbar in z_0 und $g(w)$ differenzierbar in $w_0 = f(z_0)$, so folgt

$$(g \circ f)'(z_0) = g'(f(z_0)) \cdot f'(z_0)$$

- **Ableitung der Umkehrfunktion:** Ist $f(z)$ holomorph und $f'(z_0) \neq 0$, so ist $f(z_0)$ um z_0 lokal bijektiv und es gilt

$$(f^{-1})'(w_0) = \frac{1}{f'(z_0)}, \quad w_0 = f(z_0)$$

Die modifizierte Kettenregel.

Lemma

Ist $f(z)$ holomorph auf D und ist $c : [a, b] \rightarrow D$ eine \mathcal{C}^1 -Kurve in D , so gilt

$$\frac{d}{dt}f(c(t)) = f'(c(t)) \cdot \dot{c}(t)$$

Beweis: Zunächst gilt

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}f(c(t)) &= \frac{d}{dt}u(c(t)) + i \frac{d}{dt}v(c(t)) \\ &= (u_x \dot{c}_1 + u_y \dot{c}_2) + i(v_x \dot{c}_1 + v_y \dot{c}_2)\end{aligned}$$

Daneben haben wir

$$\begin{aligned}f'(c(t)) \cdot \dot{c}(t) &= (u_x + i v_x) \cdot (\dot{c}_1 + i \dot{c}_2) \\ &= (u_x \dot{c}_1 - v_x \dot{c}_2) + i(v_x \dot{c}_1 + u_x \dot{c}_2)\end{aligned}$$

Beide Terme sind wegen der C.R. DGL's identisch.

Beispiele.

Beispiel

1 Für $f(z) = z$ erhalten wir wegen $u(x, y) = x$ und $v(x, y) = y$

$$f'(z) = u_x(z) + i v_x(z) = 1$$

Daraus folgt, dass komplexe Polynome auf \mathbb{C} holomorph sind mit

$$\frac{d}{dz} \left(\sum_{k=0}^n a_k z^k \right) = \sum_{k=1}^n a_k k z^{k-1}$$

Explizite Berechnung für $f(z) = z^2$: mit

$$f(z) = z^2 = (x^2 - y^2) + i2xy$$

berechnet man

$$f'(z) = u_x(z) + i v_x(z) = 2x + i2y = 2z$$

Beispiele.

Beispiel

- 2** *Rationale Funktionen, also Funktionen der Form*

$$f(z) = \frac{p(z)}{q(z)}, \quad p, q \text{ komplexe Polynome}$$

sind an allen Stellen mit $q(z) \neq 0$ komplex differenzierbar.

- 3** *Die Exponentialfunktion $f(z) = e^z = e^x(\cos y + i \sin y)$ ist komplex differenzierbar mit $f'(z) = e^z$, denn mit*

$$u(x, y) = e^x \cos y, \quad v(x, y) = e^x \sin y$$

sind die C.R. DGL's erfüllt

$$u_x = v_y = e^x \cos y, \quad u_y = -v_x = -e^x \sin y$$

und es gilt

$$f'(z) = u_x + i v_x = e^x \cos y + i e^x \sin y = e^z$$

Weitere Beispiele.

Beispiel

- 4** *Die trigonometrischen Funktionen*

$$\sin z := \frac{1}{2j} (e^{iz} - e^{-iz}), \quad \cos z := \frac{1}{2} (e^{iz} + e^{-iz})$$

sind nach Beispiel 3 holomorph auf \mathbb{C} und es gelten den reellen Funktionen analoge Formeln.

- 5** *Durch komplexe Potenzreihen erklärte Funktionen*

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k (z - z_0)^k$$

sind auf ihrem Konvergenzbereich $K_r(z_0)$ holomorph mit

$$f'(z) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k k (z - z_0)^{k-1}$$

und damit auf $K_r(z_0)$ gleichzeitig beliebig oft komplex differenzierbar.

Kapitel 4. Differentialrechnung im Komplexen

4.2 Konforme Abbildungen

Satz

Sei $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ eine holomorphe Funktion auf einem Gebiet $D \subset \mathbb{C}$ mit $f'(z) \neq 0$ für alle $z \in D$. Dann gilt lokal an einem Punkt $z_0 \in D$:

- Winkel* zwischen sich im Punkt z_0 schneidender Kurven bleiben bei der Transformation $w = f(z)$, einschließlich des Umlaufsinnns, erhalten,
- der Term $|f'(z_0)|$ ist die für alle von z_0 ausgehenden Richtungen gemeinsame *Längenverzerrung*. Insbesondere bleiben Längenverhältnisse erhalten.

Abbildungen mit diesen beiden Eigenschaften nennt man **konforme Abbildungen**.

Für konforme Abbildungen gilt die folgende **Umkehrung** des Satzes.

Satz

Ist $w = f(z)$ eine konforme Abbildung und als Funktion $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ stetig

Beweis des ersten Satzes.

Seien c und d zwei Kurven, die für $t = 0$ durch den Punkt z_0 laufen. Die beiden Tangentialvektoren in diesem Punkt sind dann $\dot{c}(0)$ und $\dot{d}(0)$ und für den Winkel γ zwischen den Tangentialvektoren gilt

$$\gamma = \angle(\dot{c}(0), \dot{d}(0)) = \arg(\dot{d}(0)) - \arg(\dot{c}(0))$$

Mittels f erhalten wir die beiden Kurven $f \circ c$ und $f \circ d$ im Bildraum.

Der Winkel $\tilde{\gamma}$ zwischen den beiden Kurven im Punkt $f(z_0)$ im Bildraum lautet

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma} &= \angle(f'(z_0)\dot{c}(0), f'(z_0)\dot{d}(0)) \\ &= \arg(f'(z_0)\dot{d}(0)) - \arg(f'(z_0)\dot{c}(0)) \\ &= \arg(f'(z_0)) + \arg(\dot{d}(0)) - \arg(f'(z_0)) - \arg(\dot{c}(0)) = \gamma \end{aligned}$$

und bezüglich der Längenverzerrung berechnet man

$$\left\| \frac{d}{dt} (f \circ c) \right\| = |f'(z_0)\dot{c}(0)| = |f'(z_0)| \cdot |\dot{c}(0)|$$

Konforme Transformationen.

Definition

Sei $f : D \rightarrow D'$ eine bijektive und konforme Abbildung zwischen den beiden Gebieten $D \subset \mathbb{C}$ und $D' \subset \mathbb{C}$. Weiterhin sei $\Phi : D \rightarrow \mathbb{R}$ eine **reellwertige** zweimal stetig differenzierbare Funktion auf D . Dann nennt man die Funktion $\Psi : D' \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch

$$\Psi = \Phi \circ f^{-1}$$

die **konforme Transformation** von Φ mit der Abbildung f .

Physikalische Anwendungen: Ist $\Phi(z)$ eine gesuchte Potentialfunktion definiert in der **physikalischen Ebene** D , so ist Ψ die entsprechende Funktion in der **Modellebene** D' .

Im folgenden sind Φ und Ψ also **Potentiale**, z.B.

- elektrostatische Potentiale;
- Strömungspotentiale;
- Temperaturfelder etc.

Dabei sind die Vektoren (Φ_x, Φ_y) und (Ψ_u, Ψ_v) von besonderem Interesse.

Der komplexe Gradient.

Definition

Für eine **reellwertige** Funktion $\Phi : D \rightarrow \mathbb{R}$ auf einem Gebiet $D \subset \mathbb{C}$ nennt man für $z = x + iy$ den Ausdruck

$$\text{grad } \Phi(z) = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + i \frac{\partial \Phi}{\partial y}$$

den **komplexen Gradienten** von $\Phi(z)$.

Satz

Sei Ψ die **konforme Transformation** von Φ mit der Abbildung f . Dann gelten die beiden Beziehungen

$$\text{grad}_z \Phi(z) = \text{grad}_w \Psi(f(z)) \cdot \overline{f'(z)}$$

$$\Delta_z \Phi(z) = \Delta_w \Psi(f(z)) \cdot |f'(z)|^2.$$

Beweis: Nach Definition ist die **konforme Transformation** von Φ mit der Abbildung f gegeben durch $\Psi = \Phi \circ f^{-1}$.

Fortsetzung des Beweises.

Daraus folgt aber $\Phi = \Psi \circ f$ und mit $f(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$

$$\Phi(x, y) = \Psi(u(x, y), v(x, y))$$

Wir berechnen nun

$$\Phi_x = \Psi_u u_x + \Psi_v v_x$$

$$\Phi_y = \Psi_u u_y + \Psi_v v_y$$

Für den **komplexen Gradienten** gilt dann wegen $f'(z) = u_x + iv_x$

$$\begin{aligned} \text{grad } \Phi(z) &= (\Psi_u u_x + \Psi_v v_x) + i(\Psi_u u_y + \Psi_v v_y) \\ &= \Psi_u (u_x + i u_y) + \Psi_v (v_x + i v_y) \\ &\stackrel{\text{C.R.}}{=} \Psi_u (u_x - i v_x) + i \Psi_v (u_x - i v_x) \\ &= \text{grad } \Psi(f(z)) \cdot \overline{f'(z)} \end{aligned}$$

Komplettierung des Beweises.

Die Berechnung der **zweiten Ableitungen** ergibt

$$\Phi_{xx} = \Psi_{uu} u_x^2 + 2\Psi_{uv} u_x v_x + \Psi_{vv} v_x^2 + \Psi_u u_{xx} + \Psi_v v_{xx}$$

$$\Phi_{yy} = \Psi_{uu} u_y^2 + 2\Psi_{uv} u_y v_y + \Psi_{vv} v_y^2 + \Psi_u u_{yy} + \Psi_v v_{yy}$$

Daraus folgt

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= \Psi_{uu} (u_x^2 + u_y^2) + 2\Psi_{uv} (u_x v_x + u_y v_y) \\ &\quad + \Psi_{vv} (v_x^2 + v_y^2) + \Psi_u \Delta u + \Psi_v \Delta v \end{aligned}$$

Wir verwenden nun wieder die C.R. DGL's und erhalten

$$u_x^2 + u_y^2 = v_x^2 + v_y^2 = u_x^2 + v_x^2 = |f'(z)|^2$$

$$u_x v_x + u_y v_y = 0$$

$$\Delta u = \Delta v = 0$$

und damit das gewünschte Resultat

$$\Delta \Phi = \Delta \Psi \cdot |f'(z)|^2$$

Zur praktischen Anwendung konformer Transformationen.

Korollar

Bei konformen Transformation gehen harmonische Funktionen in harmonische Funktionen über.

Anwendung konformer Transformationen: Gegeben sei das **Dirichlet–Problem** für die Laplacegleichung, d.h. die Randwertaufgabe

$$\begin{cases} \Delta u = 0 & \text{in } D \\ u = g & \text{auf } \partial D \end{cases}$$

wobei $D \subset \mathbb{R}^2$ ein “kompliziertes” zweidimensionales Gebiet sei.

Mit Hilfe einer geeigneten **konformen Transformation** lässt sich das Problem nach folgender Vorgehensweise sogar explizit lösen.

- 1 suche eine konforme Transformation, die das physikalische Gebiet D auf das “einfache” Modellgebiet D' transformiert;
- 2 transformiere die Randbedingungen auf ∂D zu Randbedingungen auf $\partial D'$ und löse das Dirichlet–Problem auf D' ;

Ein Anwendungsbeispiel: Ebene Potentialströmungen.

Wir wollen das Geschwindigkeitsfeld einer **stationären, wirbel- und quellenfreien Umströmung eines Zylinders** berechnen. Sei dazu $\mathbf{w} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ das gesuchte Geschwindigkeitsfeld.

Dann gelten die Gleichungen

$$\operatorname{rot} \mathbf{w} = \frac{\partial w_2}{\partial x} - \frac{\partial w_1}{\partial y} = 0$$

$$\operatorname{div} \mathbf{w} = \frac{\partial w_1}{\partial x} + \frac{\partial w_2}{\partial y} = 0$$

Ist $D \subset \mathbb{R}^2$ einfach zusammenhängend, so folgt aus der ersten Bedingung

es existiert eine Funktion $u : D \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\nabla u = -\mathbf{w}$

und aus der zweiten Bedingung

es existiert eine Funktion $v : D \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\nabla v = (w_2, -w_1)^T$

Das komplexe Strömungspotential.

Man nennt

- die Funktion u das **Geschwindigkeitspotential**;
- die Funktion v die **Stromfunktion**.

Die zur Stromfunktion gehörenden **Stromlinien** sind Lösungen der gewöhnlichen Differentialgleichung $y'(x) = w_2/w_1$ und gegeben durch

$$v(x, y) = \text{const.}$$

Definition

Die komplexe Funktion $\Phi = \Phi(x, y)$ definiert durch

$$\Phi(x, y) = u(x, y) + i v(x, y)$$

nennt man **komplexes Strömungspotential**.

Das komplexe Strömungspotential $\Phi(z)$ ist eine holomorphe Funktion, denn es gelten die Cauchy–Riemannschen Differentialgleichungen

$$u_x - v_y = -w_1 - (-w_1) = 0$$

Fortsetzung: Ebene Potentialströmungen.

Das Geschwindigkeitsfeld \mathbf{w} lässt sich direkt berechnen: wegen

$$\Phi'(z) = u_x + i v_x = -w_1 + i w_2$$

folgt

$$\mathbf{w} = w_1 + i w_2 = -\overline{\Phi'(z)}$$

Unser **physikalisches Gebiet** ist gegeben durch $D = \{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$ und das entsprechende **Modellgebiet** ist

$$D' = \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im } z \neq 0 \text{ und } |\text{Re } z| > 1\}$$

Die Joukowski–Funktion $f(z)$ gegeben durch

$$f(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{z}{R} + \frac{R}{z} \right)$$

ist eine **konforme Transformation** von D auf D' .

Fortsetzung: Ebene Potentialströmungen.

In der **Modellebene** können wir annehmen, dass ein homogenes Geschwindigkeitsfeld vorliegt, d.h. in D' gilt

$$\mathbf{W} = \text{const.} = (V_\infty, 0)^T$$

da eine unendlich dünne Platte eine gegebene homogene Strömung in Richtung der reellen Achse und Geschwindigkeit V_∞ nicht beeinflusst.

Für das **Geschwindigkeitspotential** $U(W)$ gilt dann die Gleichung

$$\text{grad } U(W) = -(V_\infty, 0)^T$$

und daraus folgt

$$U(w) = -V_\infty W_1$$

Entsprechend ergibt sich für die **Stromfunktion** $V(W)$

$$\text{grad } V(W) = (0, -V_\infty)^T \quad \Rightarrow \quad V(w) = -V_\infty W_2$$

Fortsetzung: Ebene Potentialströmungen.

In der **physikalischen Ebene** können wir annehmen, dass

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \text{grad } \Phi(z) = -v_\infty$$

gilt, d.h. im Unendlichen spürt die ungestörte Strömung kein Hindernis.

Wegen der Beziehung

$$\text{grad } \Phi(z) = \text{grad } \Psi(f(z)) \cdot \overline{f'(z)}$$

folgt mit

$$f'(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} - \frac{R}{z^2} \right)$$

die Beziehung $V_\infty = 2Rv_\infty$.

Für das **komplexe Strömungspotential** gilt dann

$$\Psi(W) = -2Rv_\infty (\text{Re } W + i \text{Im } W)$$

Fortsetzung: Ebene Potentialströmungen.

Wir betrachten nun die **Rücktransformation** in die physikalische Ebene, d.h.

$$\Phi(z) = (\Psi \circ f)(z) = -2Rv_\infty(\operatorname{Re} f(z) + i \operatorname{Im} f(z))$$

Für die Joukowski-Funktion

$$f(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{z}{R} + \frac{R}{z} \right)$$

gilt offensichtlich

$$\operatorname{Re} f(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{x}{R} + \frac{Rx}{x^2 + y^2} \right) \quad \operatorname{Im} f(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{R} - \frac{Ry}{x^2 + y^2} \right)$$

Damit ergibt sich in der physikalischen Ebene das **Geschwindigkeitspotential** $u(z)$

$$u(z) = u(x, y) = -v_\infty \left(x + \frac{R^2 x}{x^2 + y^2} \right)$$

Fortsetzung: Ebene Potentialströmungen.

Entsprechend ergibt sich für die **Stromfunktion**

$$v(z) = v(x, y) = -v_\infty \left(y - \frac{R^2 y}{x^2 + y^2} \right)$$

Das **Geschwindigkeitsfeld** \mathbf{w} um den Zylinder ist dann gegeben durch

$$\mathbf{w} = -\nabla u = -v_\infty \left(\frac{(x^2 + y^2)^2 - R^2(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}, -\frac{2R^2 xy}{(x^2 + y^2)^2} \right)$$

Insbesondere gilt:

- In den beiden **Staupunkten** $(-R, 0)$ und $(R, 0)$ ist die Geschwindigkeit gleich Null,

$$\mathbf{w}(-R, 0) = \mathbf{w}(R, 0) = (0, 0)^T$$

- Die Geschwindigkeit ist **maximal** in den beiden Punkten $(0, -R)$ und $(0, R)$ mit

$$w_{\max} = 2v_\infty$$

Kapitel 5. Komplexe Integration

5.1 Beispiele zur komplexen Integration

Definition

Eine komplexwertige Funktion $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ einer reellen Variablen ist **integrierbar**, falls der Real- und Imaginärteil von f integrierbar sind, und es gilt:

$$\int_a^b f(t) dt := \int_a^b \operatorname{Re}(f(t)) dt + i \int_a^b \operatorname{Im}(f(t)) dt = \operatorname{Re} e^{i\varphi}$$

Es gelten zu dem Reellen analoge Eigenschaften, wie zum Beispiel **Linearität**. Weiter gilt stets

$$\left| \int_a^b f(t) dt \right| \leq \int_a^b |f(t)| dt$$

Beweis: Man berechnet

$$\begin{aligned} \left| \int_a^b f(t) dt \right| &= R = e^{-i\varphi} \int_a^b f(t) dt = \int_a^b e^{-i\varphi} f(t) dt = \int_a^b \operatorname{Re}(e^{-i\varphi} f(t)) dt \\ &\leq \int_a^b |e^{-i\varphi} f(t)| dt = \int_a^b |f(t)| dt \end{aligned}$$

Komplexe Integration analog zu Kurvenintegralen.

Reelle Analysis: Sei $c : [a, b] \rightarrow D \subset \mathbb{R}^n$ ein stückweiser \mathcal{C}^1 -Weg, $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ und $\mathbf{F} : D \rightarrow \mathbb{R}^n$ gegeben. Dann hatten wir in Analysis II und III die beiden Kurvenintegrale 1. und 2. Art

$$\int_c f(\mathbf{x}) ds := \int_a^b f(c(t)) \|\dot{c}\| dt$$

bzw.

$$\int_c \mathbf{F}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} := \int_a^b \langle \mathbf{F}(c(t)), \dot{c}(t) \rangle dt$$

Definition

Sei $D \subset \mathbb{C}$ ein Gebiet, $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ stetig und $c : [a, b] \rightarrow D$ ein stückweiser \mathcal{C}^1 -Weg. Dann ist

$$\int_c f(z) dz := \int_a^b f(c(t)) \dot{c}(t) dt$$

das **komplexe Integral** von $f(z)$ längs der Kurve c .

Eigenschaften des komplexen Integrals.

- Der Wert des komplexen Integrals ist **unabhängig** von der Parametrisierung der Kurve.
- Bei Änderung der **Durchlaufrichtung** gilt

$$\int_{-c} f(z) dz = - \int_c f(z) dz$$

Hier ist $(-c)(t) := c(b + t(a - b))$, $0 \leq t \leq 1$.

- **Linearität**

$$\int_c (\alpha f(z) + \beta g(z)) dz = \alpha \int_c f(z) dz + \beta \int_c g(z) dz \quad \text{für } \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$

- **Additivität** bzgl. des Integrationsweges:

$$\int_{c_1+c_2} f(z) dz = \int_{c_1} f(z) dz + \int_{c_2} f(z) dz$$

Weitere Eigenschaft des komplexen Integrals

Es gilt die Abschätzung

$$\left| \int_c f(z) dz \right| \leq \sup_{z \in \text{Bild}(c)} |f(z)| \cdot \underbrace{\int_a^b |\dot{c}(t)| dt}_{\text{Bogenlänge } L(c)}$$

Beweis: Man berechnet direkt

$$\begin{aligned} \left| \int_c f(z) dz \right| &= \left| \int_a^b f(c(t)) \dot{c}(t) dt \right| \\ &\leq \int_a^b |f(c(t))| |\dot{c}(t)| dt \\ &\leq \sup_{a \leq t \leq b} |f(c(t))| \cdot \int_a^b |\dot{c}(t)| dt \end{aligned}$$

Ein Beispiel für komplexe Integrale.

Beispiel

1 Sei $f(z) = z$ und $c(t) = re^{it}$ mit $0 \leq t \leq 2\pi$. Dann gilt

$$\begin{aligned}\oint_c z \, dz &= \int_0^{2\pi} re^{it} \cdot (rie^{it}) \, dt \\ &= ir^2 \int_0^{2\pi} e^{2it} \, dt \\ &= ir^2 \int_0^{2\pi} (\cos(2t) + i \sin(2t)) \, dt \\ &= -r^2 \int_0^{2\pi} \sin(2t) \, dt + ir^2 \int_0^{2\pi} \cos(2t) \, dt \\ &= 0.\end{aligned}$$

Weitere Beispiele zu komplexen Integralen.

Beispiel

2 Sei $f(z) = \bar{z}$ und $c(t) = re^{it}$ mit $0 \leq t \leq 2\pi$. Dann gilt

$$\oint_c \bar{z} \, dz = \int_0^{2\pi} re^{-it} \cdot (rie^{it}) \, dt = ir^2 \int_0^{2\pi} dt = r^2 \cdot 2\pi i.$$

3 Sei $f(z) = 1/z$ und $c(t) = re^{it}$ mit $0 \leq t \leq 2\pi$. Dann gilt

$$\oint_c \frac{1}{z} \, dz = \oint_c \frac{\bar{z}}{|z|^2} \, dz = \frac{1}{r^2} \oint_c \bar{z} \, dz = 2\pi i.$$

4 Es gilt mit $c(t) = z_0 + re^{it}$, $0 \leq t \leq 2\pi$ die Beziehung

$$\oint_c (z - z_0)^n \, dz = \begin{cases} 2\pi i & : \text{für } n = -1 \\ 0 & : \text{für } n \in \mathbb{Z} \setminus \{-1\}. \end{cases}$$

Fortsetzung des letzten Beispiels.

Beispiel

4 (Fortsetzung)

$$\begin{aligned}\oint_c (z - z_0)^n dz &= \int_0^{2\pi} (re^{it})^n \cdot (rie^{it}) dt = ir^{n+1} \int_0^{2\pi} e^{i(n+1)t} dt \\ &= r^{n+1} \left(- \int_0^{2\pi} \sin((n+1)t) dt + i \int_0^{2\pi} \cos((n+1)t) dt \right) \\ &= \begin{cases} 2\pi i & : \text{für } n = -1 \\ 0 & : \text{für } n \in \mathbb{Z} \setminus \{-1\}. \end{cases}\end{aligned}$$

Nur für $n = -1$ verschwindet das Integral nicht und es gilt

$$\oint_c \frac{1}{z - z_0} dz = 2\pi i.$$

Frage: Woran liegt das?

Gleichmäßige Konvergenz bei komplexen Integralen.

Satz

Ist $f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f_k(z)$ eine Reihe stetiger Funktionen, die auf dem Gebiet $D \subset \mathbb{C}$ **gleichmäßig konvergiert**, und ist $c : [a, b] \rightarrow D$ ein stückweiser \mathcal{C}^1 -Weg, so gilt

$$\int_c f(z) dz = \sum_{k=0}^{\infty} \int_c f_k(z) dz$$

Beweis: Da die Reihe stetiger Funktionen gleichmäßig konvergiert, ist auch die Grenzfunktion $f(z)$ stetig und daher auch integrierbar und

$$\int_c f(z) dz - \sum_{k=0}^n \int_c f_k(z) dz = \int_c R_n(z) dz$$

Gleichmäßige Konvergenz bedeutet

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N(\varepsilon) : \forall n \geq N, z \in D : |R_n(z)| < \varepsilon$$

Fortsetzung des Beweises.

Aus der gleichmäßigen Konvergenz folgt sofort

$$\left| \int_C R_n(z) dz \right| \leq \varepsilon \cdot L(c)$$

und damit

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_C R_n(z) dz = 0$$

Beispiel

Sei

$$c(t) = re^{it} \quad \text{mit } 0 \leq t \leq 2\pi$$

und $|z_0| > r$. Dann gilt:

$$\oint_{|z|=r} \frac{dz}{z - z_0} = 0$$

Beachte: Der Punkt z_0 liegt außerhalb des Kreises $c(t)$.

Fortsetzung des letzten Beispiels.

Man berechnet direkt unter Verwendung der geometrischen Reihe

$$\oint_{|z|=r} \frac{dz}{z - z_0} = -\frac{1}{z_0} \oint_{|z|=r} \frac{dz}{1 - \frac{z}{z_0}} = -\frac{1}{z_0} \oint_{|z|=r} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{z_0^k} z^k dz$$

denn es gilt

$$\left| \frac{z}{z_0} \right| < 1$$

Aufgrund der gleichmäßigen Konvergenz gilt

$$\frac{1}{z_0} \oint_{|z|=r} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{z_0^k} z^k dz = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{z_0^{k+1}} \oint_{|z|=r} z^k dz = 0$$

da man Integration und Summation vertauschen kann.

Vorgriff auf die Laurent-Reihe.

Beispiel

Eine Reihe der Form

$$f(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k (z - z_0)^k = \underbrace{\sum_{k=0}^{\infty} a_k (z - z_0)^k}_{\text{analog zur Taylor-Reihe}} + \underbrace{\sum_{k=-\infty}^{-1} a_k (z - z_0)^k}_{\text{negative Potenzen}}$$

nennt man eine **Laurent-Reihe**.

Sie konvergiert lokal gleichmäßig und absolut in einem **Kreisring**

$$0 \leq R_1 < |z - z_0| < R_2$$

Für $R_1 < r < R_2$ und $c(t) = z_0 + re^{it}$, $0 \leq t \leq 2\pi$ gilt daher

$$\oint_{|z-z_0|=r} f(z) dz = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \oint_{|z-z_0|=r} (z - z_0)^k dz = 2\pi i a_{-1}.$$

Kapitel 5. Komplexe Integration

5.2 Der Cauchysche Hauptsatz

Wir hatten im Abschnitt 5.1 mit der Kurve $c(t) = z_0 + re^{it}$, $0 \leq t \leq 2\pi$ die Aussage

$$\oint_c (z - z_0)^n dz = \begin{cases} 2\pi i & : \text{für } n = -1 \\ 0 & : \text{für } n \in \mathbb{Z} \setminus \{-1\} \end{cases}$$

Frage: Wann verschwindet das Integral über geschlossene Kurven?

Satz (Cauchyscher Integralsatz, Hauptsatz der Funktionentheorie))

Ist $G \subset \mathbb{C}$ ein **einfach zusammenhängendes** Gebiet, $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ eine **holomorphe** Funktion und $c : [a, b] \rightarrow G$ eine **geschlossene** stückweise \mathcal{C}^1 -Kurve, so gilt stets

$$\oint_c f(z) dz = 0.$$

Bemerkung zum Cauchyschen Integralsatz.

Alle drei Voraussetzungen sind wichtig und zusammen hinreichend:

- 1 Die Funktion $f(z) = \bar{z}$ ist **nicht** holomorph und es gilt

$$\oint_{|z|=1} \bar{z} dz \neq 0.$$

- 2 Das Gebiet $G = \{z \in \mathbb{C} : z \neq 0\}$ ist **nicht** einfach zusammenhängend und es gilt

$$\oint_{|z|=1} \frac{1}{z} dz \neq 0.$$

- 3 Die Kurve $c(t) = e^{(1+i)t}$ mit $0 \leq t \leq 2\pi$ ist **nicht** geschlossen und es gilt

$$\int_c z dz \neq 0.$$

Beweis des Cauchyschen Integralsatzes.

Beweis: Wir setzen $c(t) = (x(t), y(t))^T$ und $f(x, y) = u(x, y) + i v(x, y)$:

$$\begin{aligned} \int_c f(z) dz &= \int_a^b (u\dot{x} - v\dot{y}) dt + i \int_a^b (u\dot{y} + v\dot{x}) dt \\ &= \int_c \begin{pmatrix} u \\ -v \end{pmatrix} d\mathbf{x} + i \int_c \begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix} d\mathbf{x} \end{aligned}$$

Bei beiden Vektorfelder $(u, -v)^T$ und $(v, u)^T$ ist wegen der C.R. DGL's die Integrabilitätsbedingung erfüllt:

$$\operatorname{rot} \begin{pmatrix} u \\ -v \end{pmatrix} = u_y + v_x = 0, \quad \operatorname{rot} \begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix} = v_y - u_x = 0$$

Daher existiert ein **Potential** und beide Integrale sind, da die **Kurve geschlossen** ist, gleich Null.

Die Stammfunktion einer holomorphen Funktion.

Korollar

Ist $G \subset \mathbb{C}$ einfach zusammenhängend, $f(z)$ holomorph auf G und $c_1, c_2 : [a, b] \rightarrow G$, so folgt aus $c_1(a) = c_2(a)$ und $c_1(b) = c_2(b)$ direkt

$$\int_{c_1} f(z) dz = \int_{c_2} f(z) dz$$

d.h. das Integral $\int_c f(z) dz$ ist **wegunabhängig**.

Satz (Existenz einer Stammfunktion)

Sei $G \subset \mathbb{C}$, $f(z)$ holomorph auf G , $z_0 \in G$ ein fester Punkt und setze für $z \in G$

$$F(z) := \int_{c_z} f(\xi) d\xi$$

mit einer beliebigen stückweisen \mathcal{C}^1 -Kurve, die z_0 und z verbindet.
Dann ist $F(z)$ eine **Stammfunktion** von $f(z)$, d.h. es gilt

$$F'(z) = f(z).$$

Beweis des letzten Satzes.

Beweis: Es gilt

$$\begin{aligned} \frac{F(z+h) - F(z)}{h} &= \frac{1}{h} \int_z^{z+h} f(\xi) d\xi = \frac{1}{h} \int_0^1 f(z+th) h dt \\ &= \int_0^1 f(z+th) dt \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$\begin{aligned} \left| \frac{F(z+h) - F(z)}{h} - f(z) \right| &= \left| \int_0^1 (f(z+th) - f(z)) dt \right| \\ &\leq \sup_{t \in [0,1]} |f(z+th) - f(z)| \rightarrow 0 \end{aligned}$$

für $h \rightarrow 0$.

Berechnung komplexer Integrale mittels Stammfunktion.

Korollar

Ist $f(z)$ auf einem **einfach zusammenhängenden** Gebiet G **holomorph** und $F(z)$ eine **Stammfunktion** von $f(z)$, so gilt für alle stückweisen \mathcal{C}^1 -Kurven $c: [a, b] \rightarrow G$

$$\int_c f(z) dz = F(c(b)) - F(c(a)).$$

Beispiel

Wir betrachten mit $a, b \in \mathbb{R}$, $a, b > 0$ das Integral

$$\int_{a-ib}^{a+ib} \frac{dz}{z^2}$$

Die Funktion $f(z) = 1/z^2$ ist auf dem einfach zusammenhängenden Gebiet

$$G = \mathbb{C} \setminus \{x \in \mathbb{R} : x \leq 0\},$$

holomorph. G ist die komplexe Ebene ohne die negative reelle Achse.

Inbesondere ist das obenstehende Integral **wegunabhängig**

Fortsetzung des Beispiels.

Direkte Integration: Wir setzen den Integrationsweg

$$c(t) = a + it, \quad \text{für } -b \leq t \leq b$$

und erhalten

$$\begin{aligned} \int_c \frac{dz}{z^2} &= \int_{-b}^b \frac{i}{(a+it)^2} dt = - \frac{1}{a+it} \Big|_{-b}^b \\ &= \frac{1}{a-ib} - \frac{1}{a+ib} = \frac{2ib}{a^2 + b^2} \end{aligned}$$

Auf der anderen Seite berechnet man mit Hilfe der **Stammfunktion**

$$\int_{a-ib}^{a+ib} \frac{dz}{z^2} = \left(-\frac{1}{z} \right) \Big|_{a-ib}^{a+ib} = \frac{2ib}{a^2 + b^2}$$

Homotope Kurven.

Definition

Sei $G \subset \mathbb{C}$ ein Gebiet, $c, \tilde{c} : [a, b] \rightarrow G$ zwei geschlossene Kurven in G . Man nennt c und \tilde{c} **homotop**, falls eine stetige Abbildung $\Phi : [a, b] \times [0, 1] \rightarrow G$ existiert mit

$$\Phi(t, 0) = c(t) \quad \text{für alle } t \in [a, b]$$

$$\Phi(t, 1) = \tilde{c}(t) \quad \text{für alle } t \in [a, b]$$

$$\Phi(a, s) = \Phi(b, s) \quad \text{für alle } s \in [0, 1]$$

Eine geschlossene Kurve c heißt **nullhomotop**, falls sie sich in G stetig auf einen Punkt zusammenziehen lässt.

Damit folgt aus dem **Cauchyschen Integralsatz**:

Sei $f(z)$ holomorph auf einem Gebiet G . Dann gilt für zwei geschlossene Wege c und \tilde{c} :

$$c, \tilde{c} \text{ homotop} \Rightarrow \oint_c f(z) dz = \oint_{\tilde{c}} f(z) dz.$$

Beispiel und Definition der Umlaufzahl.

Beispiel

Für jede einfach geschlossene Kurve c , die den Punkt $z_0 \in \mathbb{C}$ (einmal) im positiven Sinn umläuft, gilt

$$\oint_c \frac{dz}{z - z_0} = 2\pi i$$

Denn $c(t)$ ist homotop zu $\tilde{c}(t) = z_0 + e^{it}$, $0 \leq t \leq 2\pi$.

Definition

Für eine geschlossene, stückweise \mathcal{C}^1 -Kurve $c : [a, b] \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{z_0\}$ heißt

$$\text{Uml}(c, z_0) := \frac{1}{2\pi i} \oint_c \frac{dz}{z - z_0}$$

die **Umlaufzahl** von c bezüglich des Punktes z_0 .

Die Umlaufzahl ist stets eine ganze Zahl und gibt an, wie oft der Weg c den Punkt z_0 in mathematisch positivem Sinne umläuft.

5.3 Die Cauchysche Integralformel, Taylor-Entwicklung

Satz (Cauchysche Integralformel)

Sei $f(z)$ holomorph auf einem Gebiet G , $z_0 \in G$ und $c : [a, b] \rightarrow G \setminus \{z_0\}$ ein zum Punkt z_0 homotoper Weg, der z_0 im positiven Sinn einmal umläuft. Dann gilt

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_c \frac{f(z)}{z - z_0} dz.$$

Beweis:

Der Weg c lässt sich innerhalb von $G \setminus \{z_0\}$ auf einen Kreis $K_r(t) = z_0 + re^{it}$, $0 \leq t \leq 2\pi$ zusammenziehen. Daher gilt

$$\oint_c \frac{f(z)}{z - z_0} dz = \oint_{K_r} \frac{f(z)}{z - z_0} dz = \int_0^{2\pi} \frac{f(z_0 + re^{it})}{re^{it}} ire^{it} dt$$

Fortsetzung des Beweises.

Daher gilt

$$\begin{aligned} \oint_c \frac{f(z)}{z - z_0} dz &= \oint_{K_r} \frac{f(z)}{z - z_0} dz = \int_0^{2\pi} \frac{f(z_0 + re^{it})}{re^{it}} ire^{it} dt \\ &= i \int_0^{2\pi} f(z_0 + re^{it}) dt \end{aligned}$$

Im Grenzfall $r \rightarrow 0$ erhalten wir offensichtlich die Beziehung

$$i \int_0^{2\pi} f(z_0 + re^{it}) dt \rightarrow 2\pi if(z_0)$$

Da das Integral $\oint_c \frac{f(z)}{z - z_0} dz$ aber unabhängig von r ist, folgt

$$\oint_c \frac{f(z)}{z - z_0} dz = 2\pi if(z_0)$$

Bemerkungen zur Cauchyschen Integralformel.

- Für einen beliebigen z_0 -homotopen Weg in $G \setminus \{z_0\}$, der den Punkt z_0 nicht notwendigerweise genau einmal durchläuft, gilt entsprechend

$$\oint_c \frac{f(z)}{z - z_0} dz = 2\pi i \cdot \text{Uml}(c, z_0) \cdot f(z_0)$$

- Nützlich ist folgende **heuristische Herleitung**: aus der Taylor-Formel

$$f(z) = f(z_0) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{f^{(k)}(z_0)}{k!} (z - z_0)^k$$

folgt

$$\frac{f(z)}{z - z_0} = \frac{f(z_0)}{z - z_0} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{f^{(k)}(z_0)}{k!} (z - z_0)^{k-1}$$

Formal erhalten wir damit

$$\oint_c \frac{f(z)}{z - z_0} dz = \oint_c \frac{f(z_0)}{z - z_0} dz + \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} \oint_c \frac{f^{(k)}(z_0)}{k!} (z - z_0)^{k-1} dz}_{=0} = 2\pi i \cdot f(z_0)$$

Ein Beispiel zur Cauchyschen Integralformel.

Zu berechnen sei das Integral

$$\oint_c \frac{1}{1 + z^2} dz,$$

wobei c die Achterkurve bezeichnet, die den Punkt $z_1 = i$ einmal im positiven Sinn, den Punkt $z_2 = -i$ einmal im negativen Sinn umläuft.

- 1** Berechnung mittels **Partialbruchzerlegung**

$$\begin{aligned} \oint_c \frac{1}{1 + z^2} dz &= \oint_c \frac{1}{(z + i)(z - i)} dz = \frac{i}{2} \oint_c \left(\frac{1}{z + i} - \frac{1}{z - i} \right) dz \\ &= \frac{i}{2} \oint_c \frac{dz}{z + i} - \frac{i}{2} \oint_c \frac{dz}{z - i} = \frac{i}{2} (-2\pi i) - \frac{i}{2} (2\pi i) = 2\pi \end{aligned}$$

- 2** Berechnung mittels **Cauchyscher Integralformel**

$$\oint_c \frac{1}{1 + z^2} dz = \oint_{c_1} \frac{\left(\frac{1}{z+i}\right)}{z - i} dz + \oint_{c_2} \frac{\left(\frac{1}{z-i}\right)}{z + i} dz = 2\pi.$$

Folgerungen aus der Cauchyschen Integralformel.

Korollar (Mittelwerteigenschaft)

Ist $f(z)$ holomorph auf dem Gebiet G , so gilt für $z_0 \in G$, $\overline{K_r(z_0)} \subset G$ die Mittelwertformel

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(z_0 + re^{it}) dt$$

Korollar (Maximumprinzip)

- 1) Ist $f(z)$ holomorph auf G und besitzt $|f(z)|$ sein Maximum in $z_0 \in G$, dann ist $f(z)$ eine konstante Funktion.
- 2) Ist $f(z)$ stetig auf \overline{G} und holomorph auf G , so nimmt $|f(z)|$ sein Maximum stets auf dem Rand ∂G an.

Korollar (Fundamentalsatz der Algebra)

Ist $p(z) = \sum_{k=0}^n a_k z^k$ ein Polynom vom Grad $n \geq 1$ und $a_n \neq 0$, so besitzt $p(z)$ wenigstens eine Nullstelle in \mathbb{C} .

Beweis des Fundamentalsatzes der Algebra.

Wir nehmen an, dass das Polynom keine Nullstelle besitzt. Dann ist die Funktion $f(z) := 1/p(z)$ holomorph auf ganz \mathbb{C} . Nun gilt

$$\begin{aligned} |f(z)| &= \left| \frac{1}{a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_0} \right| \\ &= \frac{1}{|z|^n} \cdot \left| \frac{1}{a_n + a_{n-1} \frac{1}{z} + \dots + a_0 \frac{1}{z^n}} \right| \end{aligned}$$

Im Grenzfall $z \rightarrow \infty$ erhalten wir also $|f(z)| \rightarrow 0$.

Daher muss $|f(z)|$ in einem Punkt $z_0 \in \mathbb{C}$ das Maximum annehmen und nach dem [Maximumprinzip](#) folgt $f(z) = \text{const.}$

Demnach ist auch $p(z) = \text{const.} =: \alpha$, aber dann gilt

$$a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_0 = \alpha$$

und wir erhalten durch Koeffizientenvergleich $a_n = 0$, also einen [Widerspruch](#).

Taylor–Entwicklung komplexer Funktionen.

Satz

Ist $f(z)$ auf einem Gebiet $G \subset \mathbb{C}$ holomorph und $z_0 \in G$, so ist $f(z)$ in jedem Kreis $K_r(z_0) \subset G$ in eine **Potenzreihe** entwickelbar,

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k (z - z_0)^k \quad \text{mit } |z - z_0| < r.$$

Den Punkt z_0 nennt man den **Entwicklungspunkt**.
Insbesondere ist $f(z)$ auf G beliebig oft differenzierbar mit

$$f'(z) = \sum_{k=1}^{\infty} k a_k (z - z_0)^{k-1}$$

Die **Koeffizienten** a_k der Potenzreihe sind gegeben durch

$$a_k = \frac{1}{k!} f^{(k)}(z_0)$$

Für den **Konvergenzradius** R der Taylor–Reihe gilt

$$R \geq \sup\{r > 0 : K_r(z_0) \subset G\}.$$

Verallgemeinerte Cauchysche Integralformel.

Satz

Analog zur Cauchyschen Integralformel

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z-z_0|=r} \frac{f(z)}{z-z_0} dz$$

gilt für die **Ableitungen** von $f(z)$ die Formel

$$f^{(n)}(z_0) = \frac{n!}{2\pi i} \oint_{|z-z_0|=r} \frac{f(z)}{(z-z_0)^{n+1}} dz$$

Beweis: Nach der **Cauchyschen Integralformel** gilt

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta-z_0|=r} \frac{f(\zeta)}{\zeta-z_0} d\zeta$$

wobei der Kreis $|\zeta - z_0| = r$ **einmal** im positiven Sinn durchlaufen wird.

Fortsetzung des Beweises.

Liegt nun z **innerhalb** dieses Kreises, d.h. $|z - z_0| < r$, so folgt ebenfalls

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta$$

Wir schreiben nun

$$\begin{aligned} \frac{1}{\zeta - z} &= \frac{1}{\zeta - z_0} \cdot \frac{\zeta - z_0}{(\zeta - z_0) - (z - z_0)} \\ &= \frac{1}{\zeta - z_0} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)} \end{aligned}$$

Der letzte Ausdruck auf der rechten Seite ist der Grenzwert der **geometrischen Reihe**

$$\frac{1}{1 - \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)} = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)^k$$

Fortsetzung des Beweises.

Wir erhalten damit

$$\frac{1}{\zeta - z} = \frac{1}{\zeta - z_0} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)^k$$

Für den Integranden in obenstehendem Integral folgt

$$\frac{f(\zeta)}{\zeta - z} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} \cdot (z - z_0)^k$$

und damit kann die Integralformel in der Form

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta - z_0| = r} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} \cdot (z - z_0)^k d\zeta$$

geschrieben werden.

Da die Potenzreihe **gleichmäßig** konvergiert, kann man Summation und Integration **vertauschen**.

Komplettierung des Beweises.

Wir erhalten damit

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} d\zeta \right] (z - z_0)^k$$

und ein **Koeffizientenvergleich** in der Potenzreihe ergibt

$$\frac{1}{k!} f^{(k)}(z_0) = a_k = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} d\zeta$$

und damit die verallgemeinerte Cauchysche Integralformel.

Die Cauchysche Ungleichung.

Satz

Sei $f(z)$ holomorph auf G , $z_0 \in G$, $\overline{K_r(z_0)} \subset G$. Für die Koeffizienten der Taylor-Entwicklung von $f(z)$ um z_0 gilt dann die **Abschätzung**

$$\left| \frac{1}{n!} f^{(n)}(z_0) \right| \leq \frac{M(r)}{r^n}$$

mit

$$M(r) = \max_{|z - z_0| = r} |f(z)|.$$

Beweis: Aus der **verallgemeinerten Cauchyschen Integralformel**

$$f^{(n)}(z_0) = \frac{n!}{2\pi i} \oint_{|z - z_0| = r} \frac{f(z)}{(z - z_0)^{n+1}} dz$$

folgt direkt

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{n!} f^{(n)}(z_0) \right| &\leq \frac{1}{2\pi} \cdot \max_{|z - z_0| = r} \left(\frac{|f(z)|}{|z - z_0|^{n+1}} \right) \cdot 2\pi r \\ &= \frac{1}{r^n} \cdot M(r). \end{aligned}$$

Der Satz von Liouville.

Satz

Ist $f(z)$ *holomorph* und *beschränkt* auf \mathbb{C} , so ist $f(z)$ *konstant*.

Beweis: Aus der Cauchyschen Ungleichung folgt im Grenzwert $r \rightarrow \infty$

$$f^{(n)}(z) = 0 \quad \text{für alle } z \in \mathbb{C}, n \geq 1$$

Damit ist auch $f'(z) = 0$ für alle $z \in \mathbb{C}$ und $f(z) = \text{const.}$

Kapitel 5. Komplexe Integration

5.4 Singularitäten und Residuen

Satz (Laurent–Entwicklung)

Sei $f(z)$ auf einem Gebiet $G \subset \mathbb{C}$ holomorph, $z_0 \in \mathbb{C}$ und $0 \leq R_1 < R_2$ mit

$$K_{R_1, R_2}(z_0) := \{z \in \mathbb{C} \mid R_1 < |z - z_0| < R_2\} \subset G$$

Dann ist $f(z)$ auf $K_{R_1, R_2}(z_0)$ in eine *Laurent–Reihe* mit *Entwicklungspunkt* z_0 entwickelbar,

$$f(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k (z - z_0)^k \quad \text{für } R_1 < |z - z_0| < R_2.$$

Für die Koeffizienten gilt mit $R_1 < \rho < R_2$

$$a_k = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta - z_0| = \rho} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} d\zeta \quad \text{für } k \in \mathbb{Z}.$$

Die Laurent-Entwicklung.

Weiterhin gilt: Die Reihe konvergiert innerhalb des größten Kreisringes $K_{r,R}(z_0)$, der noch innerhalb von G liegt, in jedem kleineren **kompakten** Kreisring $\overline{K_{\rho_1,\rho_2}(z_0)}$ ist die Konvergenz **absolut** und **gleichmäßig**.

Beweis des Satzes: Gegeben sei ein Kreisring $K_{r,R}(z_0) \subset G$ mit $R_1 < r < R < R_2$ und den beiden Rändern

$$c_r(t) := z_0 + re^{it}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi$$

$$c_R(t) := z_0 + Re^{it}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi$$

Behauptung: Nach dem Cauchyschen Integralsatzes gilt für einen Punkt $z \in K_{r,R}(z_0)$ die Beziehung

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{c_R} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - \frac{1}{2\pi i} \oint_{c_r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta$$

Fortsetzung des Beweises.

Seien dazu die beiden Kurven c_1 und c_2 definiert wie an der **Tafel** angegeben. Dann gilt

$$\begin{aligned} \oint_{c_R} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - \oint_{c_r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta &= \oint_{c_1} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta + \oint_{c_2} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta \\ &= 2\pi i \cdot f(z) + 0 \end{aligned}$$

Wir versuchen nun, für die beiden Kurvenintegrale entlang c_R und c_r eine **Reihendarstellung** herzuleiten.

Sei zunächst ζ ein Punkt auf c_R , also $|\zeta - z_0| > |z - z_0|$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \frac{1}{\zeta - z} &= \frac{1}{\zeta - z_0} \cdot \frac{\zeta - z_0}{(\zeta - z_0) - (z - z_0)} \\ &= \frac{1}{\zeta - z_0} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)} = \frac{1}{\zeta - z_0} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)^k \end{aligned}$$

Fortsetzung des Beweises.

Setzt man diese Formel in das Kurvenintegral ein, so folgt direkt

$$\frac{1}{2\pi i} \oint_{c_R} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi i} \oint_{c_R} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} d\zeta \right] (z - z_0)^k$$

Sei nun ζ ein Punkt auf c_r , d.h. $|\zeta - z_0| < |z - z_0|$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \frac{1}{\zeta - z} &= \frac{1}{z - z_0} \cdot \frac{z - z_0}{(\zeta - z_0) - (z - z_0)} \\ &= -\frac{1}{z - z_0} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\zeta - z_0}{z - z_0}\right)} = -\frac{1}{z - z_0} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\zeta - z_0}{z - z_0}\right)^k \\ &= -\sum_{m=-\infty}^{-1} \frac{(z - z_0)^m}{(\zeta - z_0)^{m+1}} \quad \text{mit } m = -(k+1) \end{aligned}$$

Fortsetzung des Beweises.

Einsetzen in das Kurvenintegral über c_r ergibt demnach

$$\frac{1}{2\pi i} \oint_{c_r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = -\sum_{k=-\infty}^{-1} \left[\frac{1}{2\pi i} \oint_{c_r} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} d\zeta \right] (z - z_0)^k$$

Addiert man nun beide Reihendarstellungen, so folgt

$$f(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k (z - z_0)^k, \quad r \leq |z - z_0| \leq R$$

wobei die Koeffizienten durch

$$a_k = \begin{cases} \frac{1}{2\pi i} \oint_{c_R} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} d\zeta & : k = 0, 1, 2, \dots \\ \frac{1}{2\pi i} \oint_{c_r} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} d\zeta & : k = -1, -2, -3, \dots \end{cases}$$

gegeben sind.

Komplettierung des Beweises.

Nach dem Cauchyschen Integralsatz gilt dann auch

$$a_k = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta - z_0| = \rho} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{k+1}} d\zeta \quad (k \in \mathbb{Z})$$

für ein beliebiges $\rho \in [r, R]$.

Bemerkung

- Die Laurent-Entwicklung von $f(z)$ ist bei *vorgegebenem* Kreisring *eindeutig* bestimmt.
- Ist $f(z)$ holomorph im gesamten Kreis $\overline{K_{R_2}(z_0)}$, so gilt aufgrund des Cauchyschen Integralsatzes für $k = -1, -2, -3, \dots$ die Beziehung

$$a_k = 0$$

und die *Laurent-Entwicklung* stimmt dann mit der *Taylor-Entwicklung* überein.

Beispiel.

Wir betrachten die Funktion

$$f(z) = \frac{\sin z}{z^2}$$

mit *Entwicklungspunkt* $z_0 = 0$ und *Kreisring* $0 < |z| < \infty$.

Mit der Taylor-Entwicklung

$$\sin z = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{z^{2k+1}}{(2k+1)!}$$

erhalten wir die *Laurent-Reihe*

$$f(z) = \frac{\sin z}{z^2} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{z^{2k-1}}{(2k+1)!} = \frac{1}{z} - \frac{z}{3!} + \frac{z^3}{5!} - \dots$$

Beispiel.

Wir betrachten die Funktion

$$f(z) = \frac{1}{(z+1)(z-2)}$$

mit Entwicklungspunkt $z_0 = 0$. Der Nenner hat **zwei Nullstellen** in $z = -1$ und $z = 2$. Es existieren daher **drei Laurent-Entwicklungen**, nämlich in $|z| < 1$, in $1 < |z| < 2$, und in $|z| > 2$.

Für den Kreisring $1 < |z| < 2$ gilt etwa:

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{z-2} - \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{z+1} = -\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{1-z/2} - \frac{1}{3z} \cdot \frac{1}{1+1/z} \\ &= \left(-\frac{1}{6}\right) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z}{2}\right)^k - \frac{1}{3z} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(-\frac{1}{z}\right)^k \\ &= \sum_{k=-\infty}^{-1} \frac{(-1)^k}{3} \cdot z^k + \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{-1}{3 \cdot 2^{k+1}}\right) \cdot z^k \end{aligned}$$

Isolierte Singularitäten.

Definition

Sei $f(z)$ holomorph auf einem Gebiet G . Ein Punkt $z_0 \in \mathbb{C}$ heißt **isolierte Singularität** von $f(z)$, falls ein $r > 0$ existiert mit $K_{0,r}(z_0) \subset G$.

Ist $f(z) = \sum a_k (z - z_0)^k$ die Laurent-Entwicklung in $K_{0,r}(z_0)$, so nennt man den Punkt z_0

- 1) eine **hebbare Singularität**, falls $a_k = 0$ für alle $k < 0$ gilt,
- 2) einen **Pol der Ordnung $m \in \mathbb{N}$** , falls gilt

$$a_{-m} \neq 0 \quad \wedge \quad \forall k < -m : a_k = 0$$

- 3) eine **wesentliche Singularität**, falls $a_k \neq 0$ für unendlich viele $k < 0$ gilt.

Einige Beispiele.

- 1 Der Punkt $z_0 = 0$ ist eine hebbare Singularität der Funktion

$$f(z) = \frac{\sin z}{z},$$

denn die Taylor-Entwicklung lautet

$$\frac{\sin z}{z} = 1 - \frac{z^2}{3!} + \frac{z^4}{5!} - \dots$$

- 2 Die Funktion

$$f(z) = \frac{\sin z}{z^2}$$

hat in $z_0 = 0$ einen Pol der Ordnung 1.

- 3 Die Funktion $f(z) = e^{1/z}$ hat in $z_0 = 0$ eine wesentliche Singularität, denn es gilt

$$e^{1/z} = 1 + \frac{1}{1!} \left(\frac{1}{z}\right) + \frac{1}{2!} \left(\frac{1}{z}\right)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{1}{z}\right)^3 + \dots$$

Ein weiteres Beispiel: Rationale Funktionen.

Rationale Funktionen haben **keine** wesentlichen Singularitäten: sei

$$f(z) = \frac{p(z)}{q(z)}$$

eine rationale Funktion. Die Singularitäten sind die Nullstellen von $q(x)$. Ist nun z_0 eine m -fache Nullstelle von $q(z)$, so gilt

$$q(z) = (z - z_0)^m r(z), r(z_0) \neq 0 \quad \rightarrow \quad f(z) = \frac{1}{(z - z_0)^m} \cdot g(z),$$

wobei g holomorph in z_0 ist. Daraus folgt

$$f(z) = \frac{1}{(z - z_0)^m} \sum_{k=0}^{\infty} a_k (z - z_0)^k$$

d.h. z_0 ist ein **Pol** der Ordnung $\leq m$ oder eine **hebbare Singularität**, falls $a_0 = a_1 = \dots a_{m-1} = 0$.

Klassifikation von Singularitäten.

Satz

- a) Ist z_0 eine **hebbare** Singularität, so existiert der Grenzwert $\lim_{z \rightarrow z_0} f(z)$.
Die Funktion

$$\tilde{f}(z) = \begin{cases} f(z) & : z \neq z_0 \\ \lim_{z \rightarrow z_0} f(z) & : z = z_0 \end{cases}$$

ist eine **holomorphe Fortsetzung** von $f(z)$.

- b) Ist $f(z)$ in einer Umgebung von z_0 **beschränkt**, so ist z_0 eine hebbare Singularität.
c) Ist z_0 ein **Pol** von $f(z)$, so gilt

$$\lim_{z \rightarrow z_0} f(z) = \infty$$

- d) Ist z_0 eine **wesentliche** Singularität von $f(z)$, so bildet $f(z)$ jeden Kreisring $K_{0,\varepsilon}(z_0)$ auf \mathbb{C} oder $\mathbb{C} \setminus \{a\}$ ab.

Kapitel 5. Komplexe Integration

5.5 Komplexe Partialbruchzerlegung, Residuensatz

Definition

Besitzt die Funktion $f(z)$ bei z_0 die Laurent-Entwicklung

$$f(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_k (z - z_0)^k \quad \text{mit } 0 < |z - z_0| < r,$$

so nennt man

$$h(z; z_0) := \sum_{-\infty}^{-1} a_k (z - z_0)^k$$

den **Hauptteil** von $f(z)$ zum Entwicklungspunkt z_0 .

Satz

Ist $r(z) = p(z)/q(z)$ eine rationale Funktion, wobei der Grad des Zählers echt kleiner als der Grad des Nenners ist, und sind z_1, \dots, z_m die (verschiedenen) Nullstellen von $q(z)$, so gilt

$$r(z) = h(z; z_1) + \dots + h(z; z_m)$$

Beweis des letzten Satzes.

Idee: Wir zeigen, dass die Funktion $g(z)$ definiert durch

$$g(z) := r(z) - \sum_{j=1}^m h(z; z_j)$$

beschränkt und auf ganz \mathbb{C} holomorph ist. Nach dem Satz von Liouville folgt dann, dass $g(z)$ konstant ist. Mit $\lim_{z \rightarrow \infty} g(z) = 0$, folgt dann die Behauptung.

Offensichtlich ist $g(z)$ holomorph auf dem Definitionsbereich $\mathbb{C} \setminus \{z_1, \dots, z_m\}$ und die Hauptteile der Laurent-Entwicklungen zu den Entwicklungspunkten z_1, \dots, z_m verschwinden identisch.

Demnach sind die Punkte z_1, \dots, z_m hebbare Singularitäten und $g(z)$ ist holomorph auf ganz \mathbb{C} . Wegen $\text{grad } p < \text{grad } q$ folgt

$$\lim_{z \rightarrow \infty} r(z) = 0$$

und damit auch

$$\lim_{z \rightarrow \infty} g(z) = 0$$

Fortsetzung des Beweises.

Also ist $g(z)$ beschränkt und holomorph auf ganz \mathbb{C} . Nach dem Satz von Liouville folgt

$$g(z) = \text{const}$$

und aufgrund des Grenzverhaltens für $z \rightarrow \infty$ folgt

$$g(z) = 0$$

Anwendung des Satzes: Die Partialbruchzerlegung einer komplexen rationalen Funktion kann über die Hauptteile der Laurent-Entwicklungen berechnet werden, wobei die Entwicklungspunkte gerade die Singularitäten der rationalen Funktion sind.

Ein Beispiel zur Partialbruchzerlegung.

Man bestimme die **Partialbruchzerlegung** der Funktion

$$f(z) = \frac{4}{(z+1)^2(z-1)}$$

Der Nenner besitzt die beiden **Nullstellen** $z = -1$ und $z = 1$. Wir bestimmen daher die **Hauptteile** der Laurent-Entwicklungen um gerade diese beiden Punkte.

1) Für $z = -1$ schreibt man

$$f(z) = \frac{1}{(z+1)^2} \cdot \underbrace{\frac{4}{z-1}}_{g(z)}$$

Nun ist $g(z)$ in einer Umgebung des Punktes $z = -1$ **holomorph** und kann in eine **Taylor-Reihe** entwickelt werden. Es gilt daher

$$f(z) = \frac{1}{(z+1)^2} \cdot \left(-2 - (z+1) + O((z+1)^2) \right)$$

Fortsetzung des Beispiels.

und wir erhalten damit

$$f(z) = \underbrace{-\frac{2}{(z+1)^2} - \frac{1}{z+1}}_{h(z; -1)} + \dots$$

2) Analog schreiben wir für den Punkt $z = 1$

$$f(z) = \frac{1}{z-1} \cdot \underbrace{\frac{4}{(z+1)^2}}_{g(z)}$$

und erhalten durch **Taylor-Entwicklung**

$$f(z) = \frac{1}{z-1} \cdot \left(1 - (z-1) + O((z-1)^2) \right) = \underbrace{\frac{1}{z-1}}_{h(z; 1)} - 1 + \dots$$

Demnach ist die **komplexe Partialbruchzerlegung** von $f(z)$ gegeben durch

$$f(z) = -\frac{2}{(z+1)^2} - \frac{1}{z+1} + \frac{1}{z-1}$$

Der Residuensatz

Definition

Ist z_0 eine isolierte Singularität von $f(z)$, so besitzt $f(z)$ eine Laurent-Entwicklung zum Punkt z_0 , d.h.

$$f(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k (z - z_0)^k \quad \text{mit } 0 < |z - z_0| < r$$

Man nennt dann

$$\text{Res}(f; z_0) := a_{-1}$$

das **Residuum** von $f(z)$ in z_0 .

Satz

Sei G ein Gebiet, $f : G \setminus \{z_1, \dots, z_m\} \rightarrow \mathbb{C}$ sei holomorph, c eine geschlossene, stückweise \mathcal{C}^1 -Kurve in $G \setminus \{z_1, \dots, z_m\}$, die in G nullhomotop ist, d.h. innerhalb von c liegen höchstens die isolierten Singularitäten z_1, \dots, z_m . Dann gilt

$$\oint_c f(z) dz = 2\pi i \sum_{k=1}^m \text{Uml}(c; z_k) \cdot \text{Res}(f; z_k).$$

Beweisskizze zum Residuensatz.

1) Zunächst genügt es, nur die Singularitäten zu betrachten, die **innerhalb** von c liegen, da sonst die Umlaufzahl Null ist.

2) Man zerlegt c in geschlossene Kurven c_1, \dots, c_s , sodass jede dieser Kurven c_j nur **Singularitäten mit gleicher Umlaufzahl** l_j enthält.

3) Jede Kurve c_j ist innerhalb von $G \setminus \{z_1, \dots, z_m\}$ homotop zu einer **l_j -fach durchlaufenen einfach geschlossenen Kurve** \tilde{c}_j . Daraus folgt

$$\oint_c f(z) dz = \sum_{j=1}^s \oint_{c_j} f(z) dz = \sum_{j=1}^s l_j \cdot \oint_{\tilde{c}_j} f(z) dz$$

4) Jeder **einfach geschlossene Weg** \tilde{c}_j kann in eine Summe von Kreisen um die Singularitäten innerhalb von \tilde{c}_j zerlegt werden. Daraus folgt

$$\oint_c f(z) dz = \sum_{k=1}^m \text{Uml}(c; z_k) \oint_{|z-z_k|=\rho_k} f(z) dz$$

Fortsetzung der Beweisskizze zum Residuensatz.

Mit der **Laurent-Entwicklung** um z_k gilt aber

$$\begin{aligned}\oint_{|z-z_k|=\rho_k} f(z) dz &= \oint_{|z-z_k|=\rho_k} \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j (z-z_k)^j dz \\ &= \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j \cdot \oint_{|z-z_k|=\rho_k} (z-z_k)^j dz \\ &= 2\pi i \cdot a_{-1} = 2\pi i \cdot \text{Res}(f; z_k)\end{aligned}$$

Für die Kurve an der **Tafel** erhält man also

$$\begin{aligned}\oint_C f(z) dz &= 2\pi i \cdot [2\text{Res}(f; z_1) + \text{Res}(f; z_2) \\ &\quad + \text{Res}(f; z_3) + 2\text{Res}(f; z_4) + 2\text{Res}(f; z_5)]\end{aligned}$$

Methoden zur Berechnung von Residuen

Satz

- a) Ist z_0 ein **einfacher Pol** von $f(z)$, so besitzt $f(z)$ eine Darstellung der Form

$$f(z) = \frac{g(z)}{z-z_0}$$

mit einer in z_0 holomorphen Funktion $g(z)$. Für das Residuum gilt dann

$$\text{Res}(f; z_0) = g(z_0) = \lim_{z \rightarrow z_0} (z-z_0)f(z)$$

- b) Ist $f(z) = p(z)/q(z)$ mit auch in z_0 holomorphen Funktionen p und q eine rationale Funktion und z_0 eine **einfache Nullstelle** von $q(z)$, so gilt

$$\text{Res}(f; z_0) = \frac{p(z_0)}{q'(z_0)}$$

- c) Gilt $f(z) = g(z)/(z-z_0)^m$, $m \geq 1$ mit einer in einer Umgebung von z_0 holomorphen Funktion $g(z)$, so gilt

$$\text{Res}(f; z_0) = \frac{g^{(m-1)}(z_0)}{(m-1)!}.$$

Beweis des letzten Satzes.

Wie man leicht sieht, ist Teil a) ein **Spezialfall** von Teil c).

Weiterhin kann Teil c) über eine **Taylor-Entwicklung** bewiesen werden, da $g(z)$ in einer Umgebung von z_0 holomorph ist.

Wir schreiben zunächst

$$f(z) = \frac{g(z)}{(z - z_0)^m} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{g^{(k)}(z_0)}{k!} (z - z_0)^{k-m}$$

Daraus kann man direkt das **Residuum** ablesen und es gilt

$$a_{-1} = \frac{g^{(m-1)}(z_0)}{(m-1)!} = \text{Res}(f; z_0)$$

Für Teil b) definieren wir

$$q(z) =: (z - z_0)r(z)$$

Dann ist $r(z)$ im Punkt z_0 **holomorph fortsetzbar** mit $r(z_0) \neq 0$.

Fortsetzung des Beweises.

Für Teil b) definieren wir

$$q(z) =: (z - z_0)r(z)$$

Dann ist $r(z)$ im Punkt z_0 holomorph fortsetzbar mit $r(z_0) \neq 0$.

Damit ist die Funktion

$$g(z) = \frac{p(z)}{r(z)}$$

bei $z = z_0$ **holomorph** und wir erhalten für $f(z)$ die Darstellung

$$f(z) = \frac{g(z)}{z - z_0}$$

Nach Teil a) folgt wegen

$$q'(z) = r(z) + (z - z_0)r'(z)$$

gerade

$$\text{Res}(f; z_0) = g(z_0) = \frac{p(z_0)}{r(z_0)} = \frac{p(z_0)}{q'(z_0)}$$

Drei Beispiele zur Berechnung von Residuen.

Beispiel

1 Für die Funktion

$$f(z) = \frac{1}{(z+1)(z-2)}$$

hat man nach Teil a) des letzten Satzes

$$\operatorname{Res}(f; -1) = \left. \frac{1}{z-2} \right|_{z=-1} = -\frac{1}{3}$$

$$\operatorname{Res}(f; 2) = \left. \frac{1}{z+1} \right|_{z=2} = \frac{1}{3}.$$

2 Für

$$f(z) = \frac{1}{1+z^2}$$

gilt nach b)

$$\operatorname{Res}(f; i) = \left. \frac{1}{2z} \right|_{z=i} = \frac{1}{2i} \quad \text{und} \quad \operatorname{Res}(f; -i) = \left. \frac{1}{2z} \right|_{z=-i} = -\frac{1}{2i}.$$

Drei Beispiele zur Berechnung von Residuen.

Beispiel

3 Die Funktion

$$f(z) = \frac{e^{iz}}{z(z^2+1)^2}$$

hat bei $z_0 = i$ einen *Pol zweiter Ordnung*. Nach dem letzten Satz, Teil c), gilt

$$\operatorname{Res}(f; i) = g'(i) = -\frac{3}{4e}$$

wobei die Funktion $g(z)$ aufgrund der Darstellung

$$f(z) = \frac{e^{iz}}{z(z+i)^2(z-i)^2}$$

durch

$$g(z) = \frac{e^{iz}}{z(z+i)^2}$$

gegeben ist.

Kapitel 5. Komplexe Integration

5.6 Berechnung reeller Integrale mittels Residuensatz

Satz

Sei $r(x) = p(x)/q(x)$ eine rationale Funktion, die keine Singularitäten auf \mathbb{R} besitzt, und es gelte

$$\text{grad}(q) \geq \text{grad}(p) + 2$$

Dann folgt

$$\int_{-\infty}^{\infty} r(x) dx = 2\pi i \sum_{\text{Im}z > 0} \text{Res}(r; z)$$

Beweis: Wegen $\text{grad}(q) \geq \text{grad}(p) + 2$ existiert nach dem [Majorantenkriterium](#) das oben stehende uneigentliche Integrale, denn für $x \gg 1$ gilt

$$\left| \frac{p(x)}{q(x)} \right| \leq \frac{c}{x^2}$$

Wir approximieren jetzt das uneigentliche reelle Integral durch ein komplexes Integral entlang einer Kurve (siehe Tafel).

Fortsetzung des Beweises.

Ist r hinreichend groß, so liegen alle Singularitäten z_k von $r(z)$ mit strikt positivem Imaginärteil [innerhalb](#) der Kurve $c_1 + c_2$.

Daraus folgt

$$2\pi i \sum_{\text{Im}z_k > 0} \text{Res}(r; z_k) = \oint_{c_1 + c_2} r(z) dz = \int_{c_1} r(z) dz + \int_{c_2} r(z) dz$$

Nun gilt

$$\int_{c_1} r(z) dz = \int_{-r}^r r(z) dz \longrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} r(z) dz \quad \text{für } r \rightarrow \infty$$

Weiter berechnet man

$$\left| \int_{c_2} r(z) dz \right| \leq \max_{|z|=r} |r(z)| \cdot \pi r \leq \pi r \frac{c}{r^2} \longrightarrow 0 \quad \text{für } r \rightarrow \infty$$

Daraus folgt direkt die Behauptung.

Beispiel.

Wir untersuchen das uneigentliche Integral

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{1+x^6}$$

Die Funktion $r(z) = 1/(1+z^6)$ besitzt sechs **Polstellen**, von denen drei in der **oberen Halbebene** liegen, nämlich $e^{i\frac{\pi}{6}}$, $e^{i\frac{\pi}{2}}$, $e^{i\frac{5\pi}{6}}$. Ferner gilt

$$\operatorname{Res}(r; z_k) = \left. \frac{1}{6z^5} \right|_{z=z_k} = -\frac{z_k}{6}$$

Damit folgt

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{1+x^6} &= 2\pi i \left(-\frac{1}{6} e^{i\frac{\pi}{6}} - \frac{1}{6} e^{i\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{6} e^{i\frac{5\pi}{6}} \right) \\ &= \frac{\pi}{3} \left(\sin \frac{\pi}{6} + \sin \frac{\pi}{2} + \sin \frac{5\pi}{6} \right) = \frac{\pi}{3} \left(2 \sin \frac{\pi}{6} + 1 \right) \end{aligned}$$

Beispiel.

Wir untersuchen das Integral

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i\omega x}}{x^2 + a^2} dx \quad \text{mit } a > 0, \omega > 0$$

Der letzte Satz lässt sich nicht direkt anwenden, aber wegen

$$\left| \frac{e^{i\omega z}}{z^2 + a^2} \right| = \frac{e^{-\omega y}}{|z^2 + a^2|} \leq \frac{1}{|z^2 + a^2|} \leq \frac{c}{|z|^2} \quad \text{für } y \geq 0$$

entlang des Weges c_2 , gilt die Aussage **analog**.

Wir erhalten also

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i\omega x}}{x^2 + a^2} dx &= 2\pi i \sum_{\operatorname{Im} z_k > 0} \operatorname{Res} \left(\frac{e^{i\omega z}}{z^2 + a^2}; z_k \right) = 2\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{e^{i\omega z}}{z^2 + a^2}; ia \right) \\ &= 2\pi i \left. \frac{e^{i\omega z}}{2z} \right|_{z=ia} = \frac{\pi}{a} e^{-\omega a} \end{aligned}$$

Weitere Anwendungen.

Satz

Sei $f(z)$ holomorph auf $\{z : \operatorname{Im} z > -\varepsilon\}$, $\varepsilon > 0$, mit Ausnahme endlich vieler Singularitäten in der oberen Halbebene $\operatorname{Im} z > 0$.

Gilt

$$\lim_{|z| \rightarrow \infty, y \geq 0} f(z) = 0,$$

so folgt

$$\text{CHW} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{ix} dx = 2\pi i \sum_{\operatorname{Im} z_k > 0} \operatorname{Res}(f(z) e^{iz}; z_k)$$

Beispiel

Es gilt

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos x}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{e}$$

und

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin x}{1+x^2} dx = 0.$$

Weitere Anwendungen.

Satz

Sei $r(z)$ eine rationale Funktion ohne Polstellen in $0 \leq x < \infty$ und es gelte $\operatorname{grad} q > \operatorname{grad} p$. Für $0 < \alpha < 1$ gilt dann

$$\int_0^{\infty} \frac{r(x)}{x^\alpha} dx = \frac{2\pi i}{1 - e^{-2\pi\alpha i}} \sum_{z_k \in \mathbb{C} \setminus \{0\}} \operatorname{Res} \left(\frac{r(z)}{z^\alpha}; z_k \right)$$

Dabei ist folgender Zweig von z^α zu wählen

$$z = re^{i\phi} \quad \text{mit } 0 < \phi < 2\pi \quad \Rightarrow \quad z^\alpha = r^\alpha e^{i\alpha\phi}$$

Beispiel

Man berechnet

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{x^\alpha(1+x)} dx = \frac{\pi}{\sin(\pi\alpha)}$$

Wiederholung aus Analysis II: Fourier–Reihenentwicklung

Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ eine T –periodische, stückweise stetige Funktion.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t) \right)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) \cos(k\omega\tau) d\tau$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) \sin(k\omega\tau) d\tau$$

Reelle Darstellung der Fourier–Entwicklung von f mit $\omega = 2\pi/T$.

Konvergenzsatz zur Fourier–Entwicklung.

Satz

Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ T –periodisch, stückweise stetig differenzierbar und betrachte die zugehörige Fourier–Reihe

$$F_f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t) \right)$$

Dann gilt:

a) Die Reihe konvergiert punktweise und für alle $t \in \mathbb{R}$ gilt

$$F_f(t) = \frac{1}{2} (f(t^+) + f(t^-))$$

b) In allen kompakten Intervallen $[a, b]$, in denen $f(t)$ stetig ist, ist die Konvergenz gleichmäßig.

Komplexe Darstellung

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k e^{ik\omega t} \quad \text{mit} \quad \gamma_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) e^{-ik\omega\tau} d\tau.$$

Die Fourier–Transformierte und das Fourier–Integral.

Betrachte jetzt den formalen Grenzwert $T \rightarrow \infty$, um eine Fourier–Entwicklung für nicht–periodische Funktionen zu erhalten

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{i\omega_k t} \left(\int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) e^{-i\omega_k \tau} d\tau \right) \Delta\omega$$

Riemannsche Summe mit $\Delta\omega := \omega_{k+1} - \omega_k = 2\pi/T$.

Definition

Die Funktion $F(\omega)$ gegeben durch

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

heißt die **Fourier–Transformierte** oder **Spektralfunktion** von $f(t)$. Die Darstellung

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

nennt man das **Fourier–Integral** oder **Spektrale Zerlegung** von $f(t)$.

Diskretes und kontinuierliches Spektrum.

Bemerkung

- Die Fourierkoeffizienten $(\gamma_k)_{k \in \mathbb{Z}}$ einer periodischen Funktion $f(t)$ bilden das **diskrete Spektrum** von f .
- Die Fourier–Transformation $(F(\omega))_{\omega \in \mathbb{R}}$ einer nicht–periodischen Funktion liefert das **kontinuierliche Spektrum**.

Andere Schreibweisen:

$$\mathcal{F}[f](\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

$$\mathcal{F}^{-1}[F](t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

Fourier–Transformation und inverse Fourier–Transformation.

Reelle Darstellung der Fourier–Transformation.

Bemerkung

Durch Zerlegung in Real– und Imaginärteil erhält man die *reelle Darstellung* der Fourier–Transformation

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) (\cos(\omega\tau) - i \sin(\omega\tau)) d\tau \\ &= a(\omega) - ib(\omega) \end{aligned}$$

mit

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (\text{gerade Funktion})$$

$$b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \quad (\text{ungerade Funktion})$$

Entsprechend gilt folgende reelle Darstellung des Fourier–Integrals.

Reelle Darstellung des Fourier–Integrals.

Dann gilt auch die folgende Darstellung des Fourier–Integrals

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (a(\omega) - ib(\omega)) (\cos(\omega t) + i \sin(\omega t)) d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} (a(\omega) \cos(\omega t) + b(\omega) \sin(\omega t)) d\omega \end{aligned}$$

Zusammenfassung: (Sinus–, Kosinus–Spektrum)

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} (a(\omega) \cos(\omega t) + b(\omega) \sin(\omega t)) d\omega$$

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau$$

$$b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau$$

Beispiel: Fourier–Transformierte des Rechteckimpulses.

Wir betrachten den **Rechteckimpuls** der Form

$$f(t) = \begin{cases} 1 & : -a \leq t \leq a \\ 0 & : |t| > a \end{cases}$$

Dann berechnet man

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt = \int_{-a}^a e^{-i\omega t} dt \\ &= -\frac{1}{i\omega} e^{-i\omega t} \Big|_{-a}^a = -\frac{1}{i\omega} (e^{-i\omega a} - e^{i\omega a}) \\ &= \begin{cases} \frac{2}{\omega} \sin(\omega a) & : \omega \neq 0 \\ 2a & : \omega = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Fortsetzung des Beispiels.

Für die Umkehrung erhalten wir

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^{-1}[F](t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2\sin(\omega a)}{\omega} e^{i\omega t} d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\omega a)}{\omega} \cos(\omega t) d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\omega(a+t))}{\omega} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\omega(a-t))}{\omega} d\omega \end{aligned}$$

Dies sind sogenannte **Dirichlet–Integrale** der Form

$$\text{CHW} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\alpha x)}{x} dx$$

und man verwendet zur Berechnung den **Residuensatz**.

Komplettierung des Beispiels.

Es folgt

$$\text{CHW} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\alpha x)}{x} dx = \begin{cases} \pi & : \alpha > 0 \\ 0 & : \alpha = 0 \\ -\pi & : \alpha < 0 \end{cases}$$

Damit ergibt sich die Umkehrung in der Form

$$\mathcal{F}^{-1}[F](t) = \begin{cases} 1 & : |t| < a \\ \frac{1}{2} & : t = a \\ 0 & : |t| > a \end{cases}$$

Bemerkung

Man beachte insbesondere die *Mittelwerteigenschaft*

$$F_f(t) = \frac{1}{2} (f(t^+) + f(t^-))$$

Ein weiteres Beispiel.

Gegeben sei mit $a > 0$ die Funktion

$$f(t) = \begin{cases} e^{-at} & : t \geq 0 \\ 0 & : t < 0 \end{cases}$$

Dann gilt

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = \int_0^{\infty} e^{-(a+i\omega)t} dt \\ &= -\frac{1}{a+i\omega} e^{-(a+i\omega)t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{a+i\omega} \end{aligned}$$

Umkehrung wieder mit Hilfe des *Residuensatzes*

$$\mathcal{F}^{-1}[F](t) = \begin{cases} e^{-at} & : t > 0 \\ 0 & : t < 0 \end{cases}$$

und $\mathcal{F}^{-1}[F](0) = 1/2$.

Fortsetzung des Beispiels.

Konkrete Berechnung

$$\begin{aligned}\mathcal{F}^{-1}[F](t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a+i\omega} e^{i\omega t} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i\omega t}}{\omega - ia} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{ix}}{x - iat} d\omega \\ &= \sum_{\operatorname{Im} z_k > 0} \operatorname{Res} \left(\frac{e^{iz}}{z - iat}; z_k \right) \\ &= \begin{cases} e^{-at} & : t > 0 \\ 0 & : t < 0 \end{cases}\end{aligned}$$

Ein weiteres Beispiel.

Gegeben sei mit $a > 0$ die Funktion

$$f(t) = e^{-a|t|}$$

Dann gilt

$$\begin{aligned}F(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a|t|} e^{-i\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^0 e^{(a-i\omega)t} dt + \int_0^{\infty} e^{-(a+i\omega)t} dt \\ &= \frac{1}{a-i\omega} + \frac{1}{a+i\omega} \\ &= \frac{2a}{a^2 + \omega^2}\end{aligned}$$

Existenz und Eindeutigkeit der Fourier–Transformierten.

Satz

- a) Ist $f(t)$ stückweise stetig und absolut integrierbar, d.h. $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$, so existiert die Fourier–Transformierte

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

für alle $\omega \in \mathbb{R}$. Das Integral konvergiert gleichmäßig und $F(\omega)$ ist stetig.

- b) Ist $f(t)$ eine stückweise \mathcal{C}^1 –Funktion und absolut integrierbar, so gilt für alle $t \in \mathbb{R}$

$$\frac{1}{2} \left(f(t^-) + f(t^+) \right) = CHW \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \frac{e^{i\omega t}}{2\pi} d\omega$$

- c) Sind f_1, f_2 wie in b) mit $F_1(\omega) = F_2(\omega)$ für alle $\omega \in \mathbb{R}$, so folgt $f_1(t) = f_2(t)$ in allen Punkten t , in denen f_1 und f_2 stetig sind.

Rechenregeln der Fourier–Transformation.

Im Folgenden seien $f, g, \dots : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ stückweise stetig und absolut integrierbar. Mit $F(\omega), G(\omega), \dots$ bezeichnen wir die entsprechenden Fourier–Transformierten.

■ Linearität

$$\mathcal{F}[f + g](\omega) = \mathcal{F}[f](\omega) + \mathcal{F}[g](\omega)$$

$$\mathcal{F}[\alpha f](\omega) = \alpha \mathcal{F}[f](\omega) \quad (\alpha \in \mathbb{C})$$

■ Konjugation

$$\mathcal{F}[\bar{f}](\omega) = \overline{F(-\omega)}$$

denn

$$\mathcal{F}[\bar{f}](\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{f(t)} e^{-i\omega t} dt = \overline{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i(-\omega)t} dt}$$

■ Streckung

$$\mathcal{F}[f(ct)](\omega) = \frac{1}{|c|} F\left(\frac{\omega}{c}\right)$$

Rechenregeln der Fourier–Transformation.

■ Streckung

$$\mathcal{F}[f(ct)](\omega) = \frac{1}{|c|} F\left(\frac{\omega}{c}\right)$$

denn

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} f(ct) e^{-i\omega t} dt &= \operatorname{sgn}(c) \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega \frac{\tau}{c}} \frac{1}{c} d\tau \\ &= \frac{1}{|c|} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\frac{\omega}{c}\tau} d\tau \end{aligned}$$

■ Verschiebungssätze

$$\mathcal{F}[f(t-a)](\omega) = e^{-i\omega a} F(\omega)$$

$$\mathcal{F}[e^{iat} f(t)](\omega) = F(\omega - a)$$

Folgt durch direktes Einsetzen

Rechenregeln der Fourier–Transformation.

■ Faltungssatz

Man nennt

$$(f * g)(t) := \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau) g(\tau) d\tau$$

die **Faltung** der Funktionen f und g . Es gilt

$$\mathcal{F}[f * g](\omega) = F(\omega) \cdot G(\omega) \quad \text{und} \quad \mathcal{F}[f \cdot g](\omega) = \frac{1}{2\pi} (F * G)(\omega)$$

denn

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[f * g] &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau) g(\tau) d\tau \right) e^{-i\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau) e^{-i\omega(t-\tau)} dt \right) g(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= F(\omega) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = F(\omega) \cdot G(\omega) \end{aligned}$$

Ein Beispiel für den Faltungssatz.

Für die Faltung $g = f * f$ des **Rechteck-Impulses**

$$f(t) = \begin{cases} 1 & : -1 \leq t \leq 1 \\ 0 & : |t| > 1 \end{cases}$$

gilt

$$g(t) = \int_{-1}^1 f(t-\tau) d\tau = \begin{cases} 2-|t| & : -2 \leq t \leq 2 \\ 0 & : |t| > 2 \end{cases}$$

Nach dem **Faltungssatz** folgt mit dem vorherigen Beispiel direkt

$$G(\omega) = F(\omega) \cdot F(\omega) = \begin{cases} \frac{4}{\omega^2} \sin^2 \omega & : \omega \neq 0 \\ 4 & : \omega = 0 \end{cases}$$

Rechenregeln der Fourier-Transformation.

■ Differentiation

Ist $f(t)$ eine stückweise \mathcal{C}^1 -Funktion mit endlich vielen Unstetigkeitsstellen τ_1, \dots, τ_m und sind $f(t)$, $f'(t)$ absolut integrierbar, so gilt

$$\mathcal{F}[f'](\omega) = i\omega F(\omega) - \sum_{k=1}^m \left(f(\tau_k^+) - f(\tau_k^-) \right) e^{-i\omega\tau_k}$$

Beweis mittels partieller Integration.

Ist $f(t)$ sogar stetig, so folgt

$$\mathcal{F}[f'](\omega) = i\omega F(\omega)$$

und unter entsprechenden Voraussetzungen gilt sogar

$$\mathcal{F}[f^{(r)}](\omega) = (i\omega)^r F(\omega)$$

Wesentliche Eigenschaft zum Einsatz der Fourier-Transformation bei Differentialgleichungen.

Beispiel.

Wir betrachten die **gewöhnliche Differentialgleichung**

$$y''(t) + ay'(t) + by(t) = c(t)$$

mit den Grenzbedingungen

$$\lim_{|t| \rightarrow \infty} y(t) = 0, \quad \lim_{|t| \rightarrow \infty} y'(t) = 0$$

Man berechnet nun die **Fourier–Transformation** der Differentialgleichung

$$\mathcal{F}[y](\omega) = Y(\omega)$$

$$\mathcal{F}[y'](\omega) = -i\omega Y(\omega)$$

$$\mathcal{F}[y''](\omega) = -\omega^2 Y(\omega)$$

Die Fourier–Transformation der Differentialgleichung lautet damit

$$(-\omega^2 + i\omega a + b)Y(\omega) = C(\omega)$$

Fortsetzung des Beispiels.

Die **Fourier–Transformation** der Differentialgleichung lautet damit

$$(-\omega^2 + i\omega a + b)Y(\omega) = C(\omega)$$

und es ergibt sich

$$Y(\omega) = \frac{C(\omega)}{-\omega^2 + i\omega a + b}$$

Nach **Rücktransformation** ergibt sich

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C(\omega)}{-\omega^2 + i\omega a + b} e^{i\omega t} d\omega$$

und damit

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c(\tau)}{-\omega^2 + i\omega a + b} e^{i\omega(t-\tau)} d\tau d\omega$$

Anwendung der Fourier–Transformation bei partiellen Differentialgleichungen.

Wir betrachten das Anfangswertproblem für die **Wärmeleitungsgleichung**

$$\begin{cases} u_t = u_{xx} & \text{für } (x, t) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+ \\ u(x, 0) = u_0(x) & \text{für } x \in \mathbb{R} \end{cases}$$

Eine Fourier–Transformation bezüglich der **x -Variablen** liefert

$$U(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) e^{-i\omega x} dx$$

Damit folgt für die Wärmeleitungsgleichung

$$U_t = (i\omega)^2 U, \quad \text{für } t > 0, \omega \in \mathbb{R}$$

Dies ist eine gewöhnliche Differentialgleichung in t mit Parameter ω .

Anwendung der Fourier–Transformation bei partiellen Differentialgleichungen.

Daraus folgt

$$U(\omega, t) = U(\omega, 0) e^{-\omega^2 t} \quad \text{mit} \quad U(\omega, 0) = U_0(\omega)$$

und damit

$$U(\omega, t) = U_0(\omega) e^{-\omega^2 t}$$

Rücktransformation: Mit der gegebenen Anfangsbedingung haben wir die Beziehung

$$\mathcal{F}^{-1}[U_0] = u_0(x)$$

Weiter gilt

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^{-1}[e^{-\omega^2 t}] &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\omega^2 t} e^{i\omega x} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\omega^2 t + i\omega x} d\omega \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{x^2}{4t}} \end{aligned}$$

Anwendung der Fourier–Transformation bei partiellen Differentialgleichungen.

Aus dem Faltungssatz folgt dann

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \mathcal{F}^{-1}[U_0 e^{-\omega^2 t}] = u_0 * \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{x^2}{4t}} \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4t}} u_0(\xi) d\xi \end{aligned}$$

Weiteres Beispiel: Potentialproblem für die Halbebene

$$\begin{cases} u_{xx} + u_{yy} = 0 & \text{für } (x, y) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+ \\ u(x, 0) = u_0(x) & \text{für } x \in \mathbb{R} \end{cases}$$

Fourier–Transformation bezüglich x (bei festem y) liefert die **Poissonsche Integralformel** für die Halbebene

$$u(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{y^2 + (x - \xi)^2} u_0(\xi) d\xi$$

Ende der Vorlesung.