

1.1 Komplexe Zahlen

Es gilt, alle Lösungen der folgenden Gleichungen über \mathbb{C} zu finden.

(a) $z^2 - 10z + 34 = 0$

Polynom zweiten Grades ermöglicht p-q-Formel:

$$z_{\pm} = 5 \pm \sqrt{25 - 34} = 5 \pm i\sqrt{9} = 5 \pm i3$$

(b) $z^3 - 3z\bar{z} = -2$

Bedingungen an Nullstellen: $z^3 \in \mathbb{R}$, da $-3z\bar{z} + 2 \in \mathbb{R}$

Andererseits für die Beträge ($z = re^{i\varphi}$): $r^3 - 3r^2 + 2 = 0$. Dies ist ein (reelles) Polynom, und die Lösung $r = 1$ kann leicht überprüft werden.

Per Polynomdivision lässt sich ein Linearfaktor $r - 1$ abspalten: $r^3 - 3r^2 + 2 = (r - 1)(r^2 - 2r - 2)$.

Hier lassen sich die anderen Nullstellen per p-q-Formel bestimmen. $r = 1 \pm \sqrt{1 + 2} = 1 \pm \sqrt{3}$

Fall: $r = 1$, dann muss $e^{3i\varphi} = 1$ sein, und es ergeben sich drei Nullstellen:

$$\begin{aligned} e^{i\frac{2\pi}{3}} \\ e^{i2\frac{2\pi}{3}} \\ e^{i3\frac{2\pi}{3}} = 1 \end{aligned}$$

Fall: $r = (1 - \sqrt{3})$, dann muss $r^3 e^{3i\varphi} - 3r^2 + 2 = 0$ sein, also:

$$\begin{aligned} (1 - 3\sqrt{3} + 9 - 3\sqrt{3})e^{3i\varphi} - 3 + 6\sqrt{3} - 9 + 2 &= 0 \\ (10 - 6\sqrt{3})(e^{3i\varphi} - 1) &= 0 \end{aligned}$$

Dafür ergibt sich $e^{3i\varphi} = 1$, also drei Nullstellen

$$\begin{aligned} (1 - \sqrt{3})e^{i\frac{2\pi}{3}} \\ (1 - \sqrt{3})e^{i2\frac{2\pi}{3}} \\ (1 - \sqrt{3})e^{i3\frac{2\pi}{3}} \end{aligned}$$

Fall: $r = (1 + \sqrt{3})$, dann gilt:

$$\begin{aligned} (1 + 3\sqrt{3} + 9 + 3\sqrt{3})e^{3i\varphi} - 3 - 6\sqrt{3} - 9 + 2 &= 0 \\ (10 + 6\sqrt{3})(e^{3i\varphi} - 1) &= 0 \end{aligned}$$

Das ergibt analog:

$$\begin{aligned} (1 + \sqrt{3})e^{i\frac{2\pi}{3}} \\ (1 + \sqrt{3})e^{i2\frac{2\pi}{3}} \\ (1 + \sqrt{3})e^{i3\frac{2\pi}{3}} \end{aligned}$$

(c) $z^4 = 1 - i\sqrt{3}$

Hier lässt sich auch wieder der Betrag und das Argument getrennt betrachten.

$$r^4 = |1 - i\sqrt{3}| = \sqrt{1^2 + (-\sqrt{3})^2} = 2 \quad 4\varphi = \arctan(-\sqrt{3}) = -\frac{\pi}{3} \mod (2\pi)$$

Damit ergeben sich vier Lösungen:

$$\begin{aligned} &\sqrt[4]{2}e^{-i\frac{2\pi}{24}} \\ &\sqrt[4]{2}e^{-i\frac{8\pi}{24}} \\ &\sqrt[4]{2}e^{-i\frac{14\pi}{24}} \\ &\sqrt[4]{2}e^{-i\frac{20\pi}{24}} \end{aligned}$$

1.2 Aufgabe 2

(a)

$f(x, y) = x^3 - 3xy^2 - 2x + i(-y^3 + 3x^2y - 2y)$ ist komplex differenzierbar in $x + iy$ gdw. die Jacobi-Matrix

$$\begin{pmatrix} \frac{d}{dx}x^3 - 3xy^2 - 2x & \frac{d}{dx}(-y^3 + 3x^2y - 2y) \\ \frac{d}{dy}x^3 - 3xy^2 - 2x & \frac{d}{dy}(-y^3 + 3x^2y - 2y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3x^2 - 3y^2 - 2 & 6xy \\ -6xy & -3y^2 + 3x^2 - 2 \end{pmatrix} \text{ schiefsymmetrisch}$$

ist. Dies ist offensichtlich für alle $x + iy \in \mathbb{C}$ erfüllt.

Damit ist f auf ganz \mathbb{C} komplex differenzierbar.

(b)

$g(x, y) = x^3 + xy^2 + i(y^3 + 3x^2y - 2y)$ ist komplex differenzierbar in $x + iy$ gdw. die Jacobi-Matrix

$$\begin{pmatrix} \frac{d}{dx}x^3 + xy^2 & \frac{d}{dx}(y^3 + 3x^2y - 2y) \\ \frac{d}{dy}x^3 + xy^2 & \frac{d}{dy}(y^3 + 3x^2y - 2y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3x^2 + y^2 & 6xy \\ 2xy & 3y^2 + 3x^2 - 2 \end{pmatrix} \text{ schiefsymmetrisch ist.}$$

Aus $-6xy = 2xy$ folgt $x = 0 \vee y = 0$.

Fall $x = 0$: $y^2 \stackrel{!}{=} 3y^2 - 2 \Rightarrow y = \pm 1$

Fall $y = 0$: $3x^2 \stackrel{!}{=} 3x^2 - 2$ Widerspruch!

g erfüllt also nur auf $\{\pm 1\}$ die CRD, g ist demnach nur auf \emptyset komplex differenzierbar.

(c)

$$\begin{aligned} h(x, y) &= \sin(x + y^2 - x^2 + i(y - 2xy)) \\ &= \frac{1}{2i}(e^{i(x+y^2-x^2)-y+2xy} - e^{i(-x-y^2+x^2)+y-2xy}) \\ &= \frac{-i}{2}(e^{-y+2xy}(\cos(x+y^2-x^2) + i\sin(x+y^2-x^2)) - e^{y-2xy}(\cos(-x-y^2+x^2) + i\sin(-x-y^2+x^2))) \\ &= \frac{1}{2}e^{-y+2xy}\sin(x+y^2-x^2) - \frac{1}{2}e^{y-2xy}\sin(-x-y^2+x^2) + \frac{i}{2}(-e^{-y+2xy}\cos(x+y^2-x^2) + e^{y-2xy}\cos(-x-y^2+x^2)) \end{aligned}$$

Jetzt noch die JM aufstellen.

1.3 Komplexe Funktionen

(a) Realteil

$u(x, y) = -\frac{x^3}{3} + yx^2$ ist Realteil einer komplexen Funktion f .

$f(x, y) = u(x, y) + iw(x, y)$ ist komplex differenzierbar in $x + iy$ gdw. $\frac{d}{dx}u = \frac{d}{dy}w$ und $\frac{d}{dy}u = -\frac{d}{dx}w$

Aus $\frac{d}{dx}u = -x^2 + y^2$ folgt $w = \int \frac{d}{dx}u dy = -x^2y + y^3/3 + c(x)$, wobei c eine nur von x abhängige Funktion ist.

Andererseits muss auch gelten $w = - \int \frac{d}{dy}u dx = - \int 2xy dx = -x^2y + c(y)$, d.h. $c(y) = \frac{y^3}{3}$

Zusammengenommen ergibt sich: $w(x, y) = -x^2y + \frac{y^3}{3}$ bzw. $f(x, y) = -\frac{x^3}{3} + x^2y + i(-x^2y + \frac{y^3}{3} + c)$ mit $c \in \mathbb{R}$

Die Funktion f ist dabei sogar auf ganz \mathbb{C} komplex differenzierbar. Gleichzeitig folgt aus der Konstruktion von f , dass jede auf ganz \mathbb{C} komplex differenzierbare Funktion, die u als Realteil besitzt von obiger Form sein muss, d.h.

$$\{f \text{ ganz mit } u \text{ als Realteil}\} = \left\{ x + iy \mapsto -\frac{x^3}{3} + x^2y + i(-x^2y + \frac{y^3}{3} + c) : c \in \mathbb{R} \right\}$$

(b) Konstanter Betrag

Ist f die Nullfunktion auf Ω , so sind sowohl $|f|$ als auch f auf Ω konstant. Sei also im Folgenden f nicht konstant null, dann gilt dies auch für $|f|$.

Sei $|f| = |u + iv|$ konstant auf $\Omega \subset \mathbb{C}$, dann ist auch $|f|^2 = u^2 + v^2$ konstant auf Ω . Ableiten nach x bzw. y liefert:

$$\begin{aligned} 2uu_x + 2vv_x &= 0 \Leftrightarrow uu_x + vv_x = 0 \\ 2uu_y + 2vv_y &= 0 \Leftrightarrow uu_y + vv_y = 0. \end{aligned}$$

Da f nach Voraussetzung komplex differenzierbar auf Ω ist, gelten die Cauchy-Riemannschen Differentialgleichungen:

$$\begin{aligned} uv_y + vv_x &= 0 \Rightarrow 0 = (uv_y + vv_x)^2 = (uv_y)^2 + (vv_x)^2 + 2uvv_xv_y \\ vv_y - uv_x &= 0 \Rightarrow 0 = (vv_y - uv_x)^2 = (vv_y)^2 + (uv_x)^2 - 2uvv_xv_y. \end{aligned}$$

Addition dieser beiden Gleichungen liefert schließlich:

$$\begin{aligned} 0 &= (uv_y)^2 + (vv_x)^2 + (vv_y)^2 + (uv_x)^2 = \underbrace{(u^2 + v^2)}_{=\text{const.} \neq 0} (v_x^2 + v_y^2) \\ &\Rightarrow v_x^2 + v_y^2 = 0 \Rightarrow v_x = v_y = 0 \end{aligned}$$

Die letzte Implikation gilt, da v eine reelle Funktion ist, Quadrate also stets nicht-negativ sind. Aus den Cauchy-Riemannschen Differentialgleichungen erhält man nun, dass

$$\begin{aligned} 0 &= v_x = -u_y \\ 0 &= v_y = u_x \end{aligned}$$

Also sind sowohl Real- als auch Imaginärteil der Funktion f weder von x noch von y abhängig und damit konstant, womit auch f insgesamt konstant auf ganz Ω ist.

1.4 Komplexe Differenzierbarkeit

(a) Differenzenquotient

Komplexe Funktionen werden im Folgenden mit Kleinbuchstaben, die dazu assoziierten Vektorfelder im \mathbb{R}^2 hingegen mit Großbuchstaben gekennzeichnet. Der zu $z \in \mathbb{C}$ assoziierte Vektor im \mathbb{R}^2 wird dabei mit x bezeichnet.

Sei $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^2$ das zu $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ assoziierte Vektorfeld und dessen Differential im Punkt x_0 \mathbb{C} -linear. Dann existiert also eine \mathbb{C} -lineare Abbildung $L : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ mit

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|R(h)\|}{\|h\|} = 0$$

für $R(h) = F(x_0 + h) - F(x_0) - L(h)$. Übersetzt in die komplexe Ebene bedeutet dies:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{|r(h)|}{|h|} = 0 \Rightarrow \lim_{h \rightarrow 0} \frac{r(h)}{h} = 0$$

für $r(h) = f(z_0 + h) - f(z_0) - l(h)$. Dann gilt aber

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + h) - f(z_0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{r(h) + l(h)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{r(h)}{h} + \frac{l(h)}{h} = 0 + \lim_{h \rightarrow 0} \frac{l(h)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} l\left(\frac{h}{h}\right) = l(1).$$

Im letzten Schritt wurde dabei die \mathbb{C} -Linearität von L und damit auch von l ausgenutzt. Der Differenzenquotient existiert also in z_0 . Da x_0 bzw. z_0 beliebig gewählt wurde, folgt dies für jedes $z \in \Omega$.

Sei nun in z_0 der Differenzenquotient existent, d.h.

$$f'(z_0) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + h) - f(z_0)}{h}$$

existiert. Dann gilt obige Gleichung jedoch auch betragsmäßig. Wähle nun $l : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ \mathbb{C} -linear mit $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{l(h)}{h} = l(1) = f'(z_0)$. Diese Eigenschaft gilt dann offensichtlich auch für das assoziierte Vektorfeld L . Ferner ist

$$\|F'(x_0)\| = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|F(x_0 + h) - F(x_0)\|}{\|h\|} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|R(h) + L(h)\|}{\|h\|} \stackrel{*}{\leq} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|R(h)\|}{\|h\|} + \underbrace{\frac{\|L(h)\|}{\|h\|}}_{= \|F'(x_0)\|} \Rightarrow \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|R(h)\|}{\|0\|} = 0.$$

Dabei haben wir bei (*) die Dreiecksungleichung für die Norm $\|\cdot\|$ verwendet. Damit ist also das assoziierte Vektorfeld F im Punkt x_0 total differenzierbar mit \mathbb{C} -linearem Differential. Wieder waren z_0 bzw. x_0 beliebig gewählt, sodass die Aussage für alle $z \in \Omega$ folgt.

(b) Komplexe Konjugation

Sei $f(z) = \bar{z}$. Angenommen der komplexe Differenzenquotient von f existiere für ein $z_0 \in \mathbb{C}$. Dann müssen insbesondere die Grenzwerte für $h \rightarrow 0$ mit $h \in \mathbb{R}$ und $\eta \rightarrow 0$ mit $\eta \in i\mathbb{R}$ identisch sein. Wir überprüfen:

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + h) - f(z_0)}{h} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\bar{z}_0 + h - \bar{z}_0}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h}{h} = 1 \\ \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + \eta) - f(z_0)}{\eta} &= \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\bar{z}_0 - \eta - \bar{z}_0}{\eta} = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{-\eta}{\eta} = -1 \end{aligned}$$

Wir erhalten also einen Widerspruch ($1 \neq -1$) unabhängig vom gewählten $z_0 \in \mathbb{C}$. Folglich kann $f(z) = \bar{z}$ in keiner komplexen Zahl differenzierbar sein.