Aufgabe 37: Sei $x_0 \in \mathbb{R}^3$ und

$$Z = \{x \in \mathbb{R}^3 \mid x_1^2 + x_2^2 = 1\}.$$

Finden Sie $x_Z \in Z$, so dass

$$\|x_0 - x_Z\| \leq \|x_0 - x\|$$

für alle $x \in Z$.

a) Stellen Sie x_0 und ein beliebiges $x \in Z$ in Zylinderkoordinaten dar.

b) Geben Sie den Abstand $\|x_0 - x\|^2$ als Funktion $d(\varphi, z)$ an.

c) Bestimmen Sie die kritischen Punkte der Funktion $d(\varphi, z)$.

d) Berechnen Sie die Hessematrix von $d(\varphi, z)$.

e) Bestimmen Sie das Minimum der Funktion $d(\varphi, z)$.

LÖSUNG:

a)

$$x_0 = \begin{pmatrix} r_0 \cos\varphi_0 \\ r_0 \sin\varphi_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, \qquad x = \begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \\ z \end{pmatrix}$$

b)

$$\begin{aligned} d(\varphi, z) &= \|x_0 - x\|^2 \\ &= \left\| \begin{pmatrix} r_0 \cos\varphi_0 - \cos\varphi \\ r_0 \sin\varphi_0 - \sin\varphi \\ z_0 - z \end{pmatrix} \right\|^2 \\ &= (r_0 \cos\varphi_0 - \cos\varphi)^2 + (r_0 \sin\varphi_0 - \sin\varphi)^2 + (z_0 - z)^2 \end{aligned}$$

c)

$$\begin{aligned} \partial_\varphi d(\varphi, z) &= 2\,(r_0 \cos\varphi_0 - \cos\varphi)\sin\varphi + 2\,(r_0 \sin\varphi_0 - \sin\varphi)\,(-\cos\varphi) \\ &= 2r_0 \cos\varphi_0 \sin\varphi - 2\cos\varphi\sin\varphi - 2r_0 \sin\varphi_0 \cos\varphi + 2\sin\varphi\cos\varphi \\ &= 2r_0\,(\cos\varphi_0 \sin\varphi - \sin\varphi_0 \cos\varphi) \\ &= 2r_0\,(\cos(-\varphi_0)\sin\varphi + \sin(-\varphi_0)\cos\varphi) \\ &= 2r_0 \sin(\varphi - \varphi_0) \\ \partial_z d(\varphi, z) &= -2\,(z_0 - z) \end{aligned}$$

Betrachte nun

$$\nabla d(\varphi, z) = 0.$$

Für $r_0 \neq 0$ ist dies äquivalent zu

$$\begin{pmatrix} 2r_0 \sin(\varphi - \varphi_0) \\ 2\,(z - z_0) \end{pmatrix} = 0 \qquad \Leftrightarrow \qquad \varphi = \varphi_0 \text{ oder } \varphi_0 + \pi \text{ und } z = z_0$$

$\Rightarrow (\varphi_0, z_0)$ und $(\varphi_0 + \pi, z_0)$ sind kritische Punkte der Funktion $d(\varphi, z)$.

Im Fall $r_0 = 0$ gilt

$$\begin{pmatrix} 2r_0 \sin(\varphi - \varphi_0) \\ 2(z - z_0) \end{pmatrix} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 2(z - z_0) \end{pmatrix} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad z = z_0$$

Kritische Punkte sind in diesem Fall also alle Punkte (φ, z_0) mit $\varphi \in [0, 2\pi]$.

d)

$$D^2 d(\varphi, z) = \begin{pmatrix} 2r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

e) $\underline{r_0 \neq 0}$

$$D^2 d(\varphi_0, z_0) = \begin{pmatrix} 2r_0 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \qquad \text{ist positiv definit} \Rightarrow \text{Minimum}$$

$$D^2 d(\varphi_0 + \pi, z_0) = \begin{pmatrix} -2r_0 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \qquad \text{ist indefinit} \Rightarrow \text{Sattelpunkt}$$

Im Fall $r_0 \neq 0$ gilt

$$x_Z = \begin{pmatrix} \cos\varphi_0 \\ \sin\varphi_0 \\ z_0 \end{pmatrix}.$$

Im Fall $r_0 = 0$ ist die Matrix $D^2 d$ positiv semidefinit, so dass wir keine allgemeine Aussage machen können. Allerdings gilt in diesem Fall

$$\begin{aligned} d(\varphi, z) &= \cos^2\varphi + \sin^2\varphi + (z_0 - z)^2 \\ &= 1 + (z_0 - z)^2, \end{aligned}$$

d.h. der Abstand hängt nicht mehr von φ sondern nur noch von z ab. Da für $d(z) = d(\varphi, z)$ die zweite Ableitung $d''(z) = 2$ größer Null ist, handelt es sich bei allen kritischen Punkten um Minima. Es gibt in diesem Fall also nicht nur einen Punkt x_z, der auf dem Zylinder Z liegt und minimalen Abstand zum Punkt x_0 hat sondern eine Menge M_Z von Punkten, die alle auf Z liegen und minimalen Abstand zum Punkt x_0 haben.

$$M_Z = \{(\varphi, z_0) \,|\, \varphi \in [0, 2\pi]\}$$

Aufgabe 38: a) Bestimmen Sie für die Funktion

$$f : x \mapsto f(x) = \cos(x)$$

die Taylor-Entwicklung an der Stelle $x_0 = \frac{\pi}{2}$ mit Restglied $O(|x - x_0|^{2n})$.

b) Bestimmen Sie für die Funktion

$$g : (x, y) \mapsto g(x, y) = \cos(x)\cos(y)$$

die Taylor-Entwicklung an der Stelle $(x_0, y_0) = (0, 0)$ mit Restglied der Ordnung 3.

Lösung:

a) Die Formel für die Taylor-Entwicklung bis Ordnung n an einem Punkt x_0 ist:

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum_{i=0}^{n} \frac{1}{i!} f^{(i)}(x_0)(x-x_0)^i + O(|x-x_0|^{n+1}) \\ &= f(x_0) + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i!} f^{(i)}(x_0)(x-x_0)^i + O(|x-x_0|^{n+1}) \end{aligned}$$

wobei $f^{(i)}(x_0)$ die $i$te Ableitung an der Stelle x_0 ist.

$$\begin{aligned} f'(x_0) = f^{(1)}(x_0) &= -\sin(x_0) \\ f''(x_0) = f^{(2)}(x_0) &= -\cos(x_0) \\ f^{(3)}(x_0) &= \sin(x_0) \\ f^{(4)}(x_0) &= \cos(x_0) \end{aligned}$$

und dann für alle $t \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} f^{(2t-1)}(x_0) &= (-1)^t \sin(x_0) \\ f^{(2t)}(x_0) &= (-1)^t \cos(x_0) \end{aligned}$$

Für $x_0 = \frac{\pi}{2}$,

$$\begin{aligned} f^{(2t-1)}(\frac{\pi}{2}) &= (-1)^t \\ f^{(2t)}(\frac{\pi}{2}) &= 0 \end{aligned}$$

und die Taylor-Entwicklung bis Ordnung $(2n-1)$ an der Stelle $x = \frac{\pi}{2}$ ist:

$$f(x) = \sum_{t=1}^{n} \frac{1}{(2t-1)!}(-1)^t (x-\frac{\pi}{2})^{(2t-1)} + O\left(\left|x-\frac{\pi}{2}\right|^{2n}\right)$$

b) Die Taylor-Entwicklungsformel für g an der Stelle x_0 ist:

$$g(x_0+\xi, y_0+\zeta) = g(x_0,y_0) + \sum_{n} \sum_{|\alpha|=n} \frac{1}{\alpha!} \frac{\partial^\alpha g}{\partial(x,y)^\alpha}(x_0,y_0)(\xi,\zeta)^\alpha + O\left(\left\| \begin{pmatrix} \xi \\ \zeta \end{pmatrix} \right\|^{n+1}\right)$$

wobei

$$\begin{aligned} \alpha &= (\alpha_1, \alpha_2) \\ \alpha! &= \alpha_1! \alpha_2! \\ \frac{\partial^\alpha g}{\partial(x,y)^\alpha} &= \frac{\partial^{|\alpha|} g}{\partial x^{\alpha_1} y^{\alpha_2}} \\ (\xi,\zeta)^\alpha &= \xi^{\alpha_1}\zeta^{\alpha_2} \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} g(\xi,\zeta) = g(0,0) &+ \frac{\partial}{\partial x} g(0,0)\xi + \frac{\partial}{\partial y} g(0,0)\zeta \\ &+ \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(0,0)\xi^2 + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} g(0,0)\xi\zeta + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial y^2} g(0,0)\zeta^2 + O\left(\left\| \begin{pmatrix} \xi \\ \zeta \end{pmatrix} \right\|^{3}\right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x}(0,0) = 0$$
$$\frac{\partial g}{\partial y}(0,0) = 0$$
$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}(0,0) = -1$$
$$\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y}(0,0) = 0$$
$$\frac{\partial^2 g}{\partial^2 y}(0,0) = -1$$

und somit

$$g(\xi, \zeta) = 1 - \frac{1}{2}\xi^2 - \frac{1}{2}\zeta^2 + O\left(\left\| \begin{pmatrix} \xi \\ \zeta \end{pmatrix} \right\|^3 \right)$$

Aufgabe 39: Sei $a \in \mathbb{R}^n$ gegeben. Entwicklen Sie die Funktion $f(x) = \|x - a\|$ nach Taylor an der Stelle x_0 bis einschließlich Terme zweiter Ordnung.

LÖSUNG:

$$f(x) = \|x - a\| = \left((x_1 - a_1)^2 + (x_2 - a_2)^2 + \ldots + (x_n - a_n)^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

setze $x = x_0 + h, h \in \mathbb{R}^n$

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \text{grad } f(x_0) \cdot h + \frac{1}{2} D^2 f(x_0) h \cdot h + O(\|h\|^3)$$

$$\begin{aligned} \text{grad } f(x) &= \left(\frac{\partial}{\partial x_1} f(x), \frac{\partial}{\partial x_2} f(x), \ldots, \frac{\partial}{\partial x_n} f(x) \right)^T \\ &= \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\|x - a\|} \cdot 2(x_1 - a_1), \ldots, \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\|x - a\|} \cdot 2(x_n - a_n) \right)^T \\ &= \left(\frac{x_1 - a_1}{\|x - a\|}, \ldots, \frac{x_n - a_n}{\|x - a\|} \right)^T = \frac{1}{\|x - a\|}(x - a) \end{aligned}$$

$$H(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} f(x) & \ldots & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_n} f(x) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \frac{\partial^2}{\partial x_n^2} f(x) \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{(x_i - a_i)}{f(x)} \\ &= \frac{1}{f(x)} - \frac{(x_i - a_i)(x_i - a_i)}{f^3(x)} \\ &= \frac{1}{\|x - a\|} - \frac{1}{\|x - a\|^3}(x_i - a_i)^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x_i^2} f(x) = \frac{1}{f(x)} - \frac{1}{f(x)^3}(x_i - a_i)^2$$

$$i \neq j : \qquad \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x) = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{(x_i - a_i)}{f(x)}$$

$$= -\frac{1}{f^3(x)}(x_i - a_i)(x_j - a_j)$$

$$= -\frac{(x_i - a_i)(x_j - a_j)}{\|x - a\|^3}$$

$$\Rightarrow H(x) = \frac{1}{\|x - a\|} \left(\mathbb{1} - \frac{(x-a)}{\|x-a\|} \frac{(x-a)^T}{\|x-a\|} \right)$$

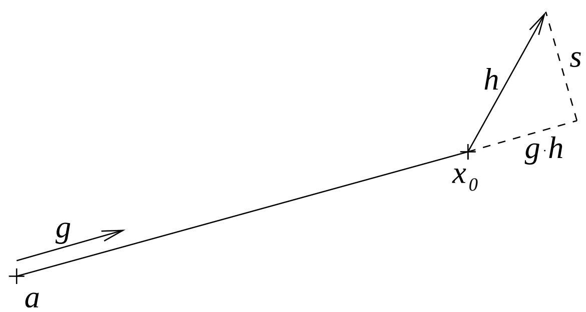
Insgesamt ergibt sich

$$f(x_0 + h) = \|x_0 - a\| + \frac{(x_0 - a)}{\|x_0 - a\|} \cdot h + \frac{1}{2\|x_0 - a\|} \left(\mathbb{1} - \frac{(x-a)}{\|x-a\|} \frac{(x-a)^T}{\|x-a\|} \right) h \cdot h + O(\|h\|^3)$$

Zusätzliche Erläuterung: (Nicht Teil der Lösung!)
Mit der Bezeichnung $g = \operatorname{grad} f(x_0)$ erhalten wir

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + g \cdot h + \frac{1}{2\|x_0 - a\|} \left(\|h\|^2 - (g \cdot h)^2 \right) + (\|h\|^3) \,.$$

Dabei ist offenbar $\|g\| = 1$, also ist g der Einheitsvektor, der von a in Richtung x_0 zeigt. Der lineare Term (also die Approximation der Änderung in erster Ordnung) ist daher die Projektion von h auf die Gerade durch x_0 und a. Hier spielt also nur der Anteil von h eine Rolle, der auf a zu oder von a weg zeigt, nicht der Anteil „seitwärts“.
In ähnlicher Weise erklärt sich der quadratische Term: Mit $s^2 = \|h\|^2 - (g \cdot h)^2$ ist s der „Seitwärts-Anteil“ von h (Pythagoras!). Der Term zweiter Ordnung berücksichtigt also die Änderung „seitwärts“.
Die Skalierung überlegt man sich beispielsweise folgendermaßen: Mit $a = (0,0)^T$, $x_0 = (1,0)^T$ und $h = (t,s)^T$ erhält man $f(x_0 + h) = 1 + t + \frac{1}{2}s^2 + O(\|h\|^3)$. Zu $x_0 = (L,0)^T$ erhält man die skalierte Gleichung $\frac{f(x_0+h)}{L} = 1 + \frac{t}{L} + \frac{1}{2}\left(\frac{s}{L}\right)^2 + O(\|h\|^3)$. Multiplikation mit $L = \|x_0 - a\|$ ergibt schließlich die obige Form.



Aufgabe 40: Bestimmen Sie für die Funktion

$$g(x,y) = \sqrt{r^2 - (\sqrt{x^2 + y^2} - R)^2}, \quad 0 < r < R,$$

die Taylor-Entwicklung an der Stelle $(R, 0)$ mit Restglied der Ordnung 3.
Tipp: Finden Sie eine Funktion $h(\cdot)$, so dass $g(x,y) = h(d(x,y))$ mit $d(x,y) = \sqrt{x^2 + y^2}$.

LÖSUNG: $g(x,y) = h(d(x,y))$ mit $d(x,y) = \sqrt{x^2+y^2}$ und $h(\rho) = \sqrt{r^2-(\rho-R)^2} \Rightarrow$

$$\begin{aligned}
g_x(x,y) &= h'(d(x,y))\, d_x(x,y)\\
g_y(x,y) &= h'(d(x,y))\, d_y(x,y)\\
g_{xx}(x,y) &= h''(d(x,y))\, d_x(x,y)^2 + h'(d(x,y))\, d_{xx}(x,y)\\
g_{xy}(x,y) &= h''(d(x,y))\, d_x(x,y)\, d_y(x,y) + h'(d(x,y))\, d_{xy}(x,y)\\
g_{yy}(x,y) &= h''(d(x,y))\, d_y(x,y)^2 + h'(d(x,y))\, d_{yy}(x,y)
\end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned}
d_x(x,y) &= \frac{x}{d(x,y)}\\
d_y(x,y) &= \frac{y}{d(x,y)}\\
d_{xx}(x,y) &= \frac{y^2}{d(x,y)^3}\\
d_{xy}(x,y) &= -\frac{xy}{d(x,y)^3}\\
d_{yy}(x,y) &= \frac{x^2}{d(x,y)^3}
\end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}
h'(\rho) &= \frac{R-\rho}{h(\rho)}\\
h''(\rho) &= -\frac{r^2}{h(\rho)^3}
\end{aligned}$$

An der Stelle $(R,0)$:

$$\begin{aligned}
d(R,0) &= R\\
d_x(R,0) &= 1\\
d_y(R,0) &= 0\\
d_{xx}(R,0) &= d_{xy}(R,0) = 0\\
d_{yy}(R,0) &= \frac{R^2}{R^3} = \frac{1}{R}
\end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}
h(d(R,0)) &= h(R) = r\\
h'(R) &= 0\\
h''(R) &= -\frac{r^2}{r^3} = -\frac{1}{r}
\end{aligned}$$

Es folgt

$$\begin{aligned}
g(R,0) &= h(d(R,0)) = r\\
g_x(R,0) &= h'(R)\, d_x(R,0) = 0\\
g_y(R,0) &= h'(R)\, d_y(R,0) = 0\\
g_{xx}(R,0) &= -\frac{1}{r}\cdot 1^2 + 0\cdot 0 = -\frac{1}{r}\\
g_{xy}(x,y) &= -\frac{1}{r}\cdot 1\cdot 0 + 0\cdot 0 = 0\\
g_{yy}(x,y) &= -\frac{1}{r}\cdot 0^2 + 0\cdot\frac{1}{R} = 0
\end{aligned}$$

Die Taylor-Entwicklung ist dann

$$g(x,y) = r - \frac{1}{2r}(x-R)^2 + \mathrm{O}(\|(x-R,y)\|^3)$$