



## Höhere Mathematik II

### 4. Übung mit Lösungshinweisen

Abgabe Hausübungen: W. 21

#### Gruppenübungen

(G 8)

Bestimmen Sie ob folgende Funktionen ein lokales Extremum in  $(0,0)$  haben:

$$g(x,y) = 4x^2 + 12xy + 9y^2 + x^4,$$

$$f(x,y) = (1 + \sin(x+y)) \ln(1 + 2x + y) - 2x - y,$$

LÖSUNG:

(a) Wir haben

$$\frac{\partial g}{\partial x} = 8x + 12y + 4x^3,$$

$$\frac{\partial g}{\partial y} = 12x + 18y,$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} = 8 + 12x^2,$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial y^2} = 18,$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} = 12.$$

Damit gilt  $\nabla g(0,0) = (0,0)$  und

$$H(f,0,0) = \begin{pmatrix} 8 & 12 \\ 12 & 18 \end{pmatrix}.$$

Die Determinante der Hessematrix ist

$$\det H = 18 \cdot 8 - 12^2 = 0.$$

Somit ist die Matrix positiv-semidefinit im Punkt  $(0,0)$ . Zur Bestimmung, ob der Punkt ein Extremum ist reicht dieses Kriterium also nicht aus. Es gilt aber, dass  $4x^2 + 12xy + 9y^2 + x^4 = (2x + 3y)^2 + x^4$  ist. Somit gilt  $g(x,y) \geq 0$  für alle  $(x,y)$ . Der Punkt  $(0,0)$  ist also ein globales Minimum.

(b) Wir haben

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= \cos(x+y) \ln(1+2x+y) + (1 + \sin(x+y)) \frac{2}{1+2x+y} - 2 \text{ und} \\ \frac{\partial f}{\partial y} &= \cos(x+y) \ln(1+2x+y) + (1 + \sin(x+y)) \frac{1}{1+2x+y} - 1. \end{aligned}$$

Es folgt, dass  $\frac{\partial f}{\partial x}(0,0) = \cos(0) \ln(1) + (1 + \sin(0)) \frac{2}{1+0} - 2 = 0$  und  $\frac{\partial f}{\partial y}(0,0) = \cos(0) \ln(1+0) + (1+0) \frac{1}{1+2x+y} - 1 = 0$ . Damit ist es möglich, dass die Funktion ein Extremum im  $(0,0)$  hat. Wir müssen jetzt die Hessematrix untersuchen.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= -\sin(x+y) \ln(1+2x+y) + \cos(x+y) \frac{2}{1+2x+y} \\ &\quad + 2 \frac{\cos(x+y)(1+2x+y) - (1 + \sin(x+y))2}{(1+2x+y)^2} \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(0,0) &= 0 + 1 \cdot \frac{2}{1} + 2 \cdot \frac{1 \cdot 1 - 2}{1^2} = 2 - 2 = 0, \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} &= -\sin(x+y) \ln(1+2x+y) + \cos(x+y) \frac{1}{1+2x+y} \\ &\quad + \frac{\cos(x+y)(1+2x+y) - (1 + \sin(x+y))}{(1+2x+y)^2} \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(0,0) &= 0 + 1 + \frac{1-1}{1} = 1, \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} &= -\sin(x+y) \ln(1+2x+y) + \cos(x+y) \frac{2}{1+2x+y} \\ &\quad + \frac{\cos(x+y)(1+2x+y) - 2(1 + \sin(x+y))}{(1+2x+y)^2} \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(0,0) &= 0 + 2 + \frac{1-2}{1} = 1. \end{aligned}$$

Damit gilt

$$H(f,0,0) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

und diese Matrix ist weder positiv noch negativ definit. Zum Beispiel gilt  $\langle \mathbf{x}, H\mathbf{x} \rangle = 2xy + y^2 = 0$  für alle Punkte der Form  $(x, 0)$ . Es folgt das  $f$  keinen lokalen Extrempunkt im Nullpunkt haben kann.

**(G 9)**

(a) Zeigen Sie mit Hilfe der Definition, dass  $A_1$  positiv definit ist und dass  $A_2$  und  $A_3$  indefinit sind.

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix},$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} 2 & -2 & -2 \\ -2 & 4 & 6 \\ -2 & 6 & 8 \end{pmatrix}.$$

(b) Bestimmen Sie alle kritische Stellen und ihre Art für

$$f(x, y) = 3x^2 + 3xy + y^2 + y^3,$$

$$h(x, y, z) = 1 + x^2 + 2y^2 + 4z^2 - 2xy + 6yz - 2xz.$$

LÖSUNG:

(a) Nach Definition heißt  $A$  pos. bzw. neg. definit falls  $\langle \mathbf{x}, A\mathbf{x} \rangle > 0$  bzw.  $< 0$  ( $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ ) und pos. bzw. neg. semidefinit falls  $\langle \mathbf{x}, A\mathbf{x} \rangle \geq 0$  bzw.  $\leq 0$ . um das zu zeigen benutzen wir die Quadratkomplettierung.

(1) Für  $A_1$  haben wir:

$$\begin{aligned} Q_1(x, y) &= \langle \mathbf{x}, A\mathbf{x} \rangle = \mathbf{x}^t A_1 \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x+y \\ x+2y \end{pmatrix} = x(x+y) + y(x+2y) = x^2 + 2y^2 + 2xy \\ &= (x+y)^2 + y^2. \end{aligned}$$

Es ist dann klar das  $Q_1(x, y) > 0$  falls  $(x, y) \neq (0, 0)$  und  $Q_1(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y = 0$ .

(2) Für  $A_2$  haben wir:

$$\begin{aligned}
 Q_2(x,y) &= \langle \mathbf{x}, A_2 \mathbf{x} \rangle = \mathbf{x}^t A_2 \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2x+3y \\ 3x+1y \end{pmatrix} = x(2x+3y) + y(3x+1y) = 2x^2 + y^2 + 6xy \\
 &= 2 \left( x + \frac{3}{2}y \right)^2 - 2 \left( \frac{9}{4} \right) y^2 + y^2 \\
 &= 2 \left( x + \frac{3}{2}y \right)^2 - \frac{7}{2}y^2
 \end{aligned}$$

und somit ist es klar, dass  $A_2$  ist indefinit, z.B. gilt  $Q_2(x,0) \geq 0$  und  $Q_2\left(-\frac{3}{2}, 1\right) = 0 - \frac{7}{2} < 0$ .

(3) Für  $A_3$  haben wir

$$\begin{aligned}
 Q_3(x,y,z) &= \langle \mathbf{x}, A_3 \mathbf{x} \rangle = \mathbf{x}^t A_3 \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & -2 & -2 \\ -2 & 4 & 6 \\ -2 & 6 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \\
 &= 2x^2 - 4xy + 4y^2 - 4xz + 8z^2 + 12yz \\
 &= 2(x - (y+z))^2 - 2(y+z)^2 + 4y^2 + 8z^2 + 12yz \\
 &= 2(x - (y+z))^2 + 2y^2 + 6z^2 + 8yz \\
 &= 2(x - (y+z))^2 + 2(y+2z)^2 - 8z^2 + 6z^2 \\
 &= 2(x - (y+z))^2 + 2(y+2z)^2 - 2z^2.
 \end{aligned}$$

Damit sieht man einfach, dass für  $z$   $Q_3(x,y,0) \geq 0$  ist aber fuer z.B.  $z = 1, y = -2$  und  $x = -1$  haben wir  $Q_3(-1, -2, 1) = 0 + 0 - 2 < 0$ . Es folgt, dass  $A_3$  indefinit ist.

(b) (1) Wir müssen alle Nullstellen vom Gradienten von  $f$  finden. Der Gradient von  $f$  ist

$$\nabla f(x,y) = \left( \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) = (6x + 3y, 3x + 2y + 3y^2)$$

und  $\nabla f(x,y) = (0,0) \Leftrightarrow 6x + 3y = 0$  und  $3x + 2y + 3y^2 = 0$ . Aus der ersten Gleichung folgt  $x = -\frac{1}{2}y$  und das setzen wir in die zweite Gleichung ein:  $-\frac{3}{2}y + 2y + 3y^2 = \frac{1}{2}y + 3y^2 = 0 \Leftrightarrow y = 0$  oder  $3y + \frac{1}{2} = 0 \Leftrightarrow (x,y) = (0,0)$  oder  $(x,y) = \left(\frac{1}{12}, -\frac{1}{6}\right)$ . Die kritische Stellen sind damit

$$\mathbf{x}_0 = (0,0) \text{ und } \mathbf{x}_1 = \left(\frac{1}{12}, -\frac{1}{6}\right).$$

Jetzt müssen wir diese zwei Punkten untersuchen. Die Hessematrix ist

$$H(f, x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & 3 \\ 3 & 2 + 6y \end{pmatrix}.$$

Wenn wir die beide Punkten einsetzen bekommen wir:

$$H_1 = H(f, 0, 0) = \begin{pmatrix} 6 & 3 \\ 3 & 2 \end{pmatrix},$$

$$H_2 = H\left(f, \frac{1}{12}, -\frac{1}{6}\right) = \begin{pmatrix} 6 & 3 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}.$$

Also gilt:  $\det H_1 = 12 - 9 = 3$  und  $\det H_2 = 6 - 9 = -3$ . Aus dem Hurwitzkriterium folgt, dass  $H_1$  positiv definit ist und das  $H_2$  indefinit ist. Damit ist der Punkt  $(0, 0)$  ein isolierte lokales Minimum und  $\left(\frac{1}{12}, -\frac{1}{6}\right)$  ein Sattelpunkt (aber keine Extremstelle).

(2) Wir haben  $h(x, y, z) = 1 + x^2 + 2y^2 + 4z^2 - 2xy + 6yz - 2xz$ .

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 2x - 2y - 2z,$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 4y - 2x + 6z$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 8z + 6y - 2x.$$

Die Gleichung  $\nabla h = \mathbf{0}$  ist dann einfach das lineare Gleichungssystem:

$$\begin{cases} x - y - z = 0, \\ -x + 2y + 3z = 0, \\ -x + 3y + 4z = 0. \end{cases}$$

Dieses System ist einfach zu lösen. Schreiben Sie die zugehörige Matrix als  $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & 3 \\ -1 & 3 & 4 \end{pmatrix}$ .

Dann gilt

$$\begin{aligned} A &\sim \{r_2 \rightarrow R_2 + r_1, r_3 \rightarrow r_3 + r_1\} \\ &\sim \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 3 \end{pmatrix} \sim \{r_1 \rightarrow r_1 + r_2, r_3 \rightarrow r_3 - 2r_2\} \\ &\sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \sim \{r_2 \rightarrow r_2 + 2r_3, r_1 \rightarrow r_1 + r_3\} \\ &\sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Es folgt, dass die Gleichung  $\nabla h = \mathbf{0}$  die eindeutige Lösung  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  hat. Das heißt

$$\mathbf{x}_0 = (0, 0, 0)$$

ist eine kritische Stelle von  $h$ . Für die Untersuchung auf Extrema brauchen wir die zweiten Ableitungen

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial x} &= 2x - 2y - 2z, \\ \frac{\partial h}{\partial y} &= 4y - 2x + 6z \\ \frac{\partial h}{\partial z} &= 8z + 6y - 2x.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} &= 2, \\ \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} &= 4, \\ \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} &= 8, \\ \frac{\partial^2 h}{\partial y \partial x} &= -2, \\ \frac{\partial^2 h}{\partial z \partial x} &= -2, \\ \frac{\partial^2 h}{\partial z \partial y} &= 6.\end{aligned}$$

Damit ist die Hesse Matrix im Nullpunkt

$$H(f, \mathbf{x}_0) = \begin{pmatrix} 2 & -2 & -2 \\ -2 & 4 & 6 \\ -2 & 6 & 8 \end{pmatrix}.$$

Aus (a)(3) folgt, dass die Hessematrix indefinit ist. Es folgt, dass der Nullpunkt keine Extremstelle ist.

### (G 10)

Zwischen Luftdruck  $p$  und Höhe  $h$  (über Meeresniveau) besteht unter Annahme konstanter Lufttemperatur der Zusammenhang (barometrische Höhenformel):

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-h/h_s}$$

(der Skalenhöhe  $h_S \approx 8000m$ .) Leiten Sie einen möglichst guten, angenährten linearen Zusammenhang zwischen den Größen  $p$  und  $h$  her. Bis zu welcher Höhe liefert diese Näherung Werte, die um maximal 1% vom tatsächlichen Luftdruck abweichen?

LÖSUNG:

Aus der Taylorschen Formel mit Rest wissen wir, dass für  $0 \leq x \leq 1$  gilt

$$e^{-x} \approx 1 - x + R_2(x)$$

wobei

$$R_2(x) = -\frac{1}{2}e^{-\xi}x^2$$

für ein  $\xi \in [0, x]$ . Es folgt, dass  $|R_2(x)| \leq \frac{x^2}{2}$ . Sei  $x = \frac{h}{h_S}$ . Dann gilt, falls  $h < h_S$  dass

$$p(h) = p_0(1 - x + R_2(x))$$

oder

$$p(h) = p_0 \left(1 - \frac{h}{h_S}\right) + p_0 R_2\left(\frac{h}{h_S}\right).$$

Der lineare Zusammenhang ist

$$p(h) = p_0 \left(1 - \frac{h}{h_S}\right)$$

und die Abweichung

$$\left|p_0 R_2\left(\frac{h}{h_S}\right)\right| = p_0 \frac{1}{2} \frac{h^2}{h_S^2}$$

ist kleiner als 1% falls  $p_0 \frac{1}{2} \frac{h^2}{h_S^2} < \frac{1}{100} \Leftrightarrow h^2 < p_0^{-1} h_S^2 \frac{1}{50} \Leftrightarrow$

$$h < h_S \sqrt{\frac{1}{50 p_0}}.$$

## Hausübungen

### (H 4) [5+5P]

(a) Sei

$$f(x, y, z) = (x + xy + yz) e^x.$$

Bestimmen Sie alle kritische Stellen von  $f$  und ihre Art.

(b) Sei

$$h(x, y, z) = e^{xyz} (1 - \arctan(x^2 + y^2 + 2z^2)).$$

Hat  $h$  eine lokale Extremstelle im Nullpunkt? Bestimmen Sie in diesem Fall welche Art von Extremstelle.