



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Mathematik Institut für Geometrie, Professur für Nichtlineare Analysis

PARTIELLE DIFFERENTIALGLEICHUNGEN

Übungen

Prof. Dr. Friedemann Schuricht

Sommersemester 2020

Autor : Eric Kunze
E-Mail : eric.kunze@mailbox.tu-dresden.de

Aufgabe 1. Es sei $U \subset \mathbb{R}^n$ ein Gebiet, $u \in C^2(U, \mathbb{R}^n)$, $A \in C^1(U, \mathbb{R}^{m \times n})$, $\varphi \in C^1(U)$ und $c \in \mathbb{R}^m$. Zeigen Sie:

- (a) $\operatorname{div}((Du)^\top) = (D(\operatorname{div} u))^\top$,
- (b) $\operatorname{div}(cA) = c \operatorname{div} A$,
- (c) $\operatorname{div}(\varphi A) = A \cdot D\varphi + \varphi \operatorname{div} A$.

Hinweis: Wir betrachten Vektoren im \mathbb{R}^n als Zeilenvektoren, \cdot ist das Skalarprodukt im \mathbb{R}^n , $Du = (\partial_j u_i)_{i,j=1,\dots,n}$, div und \cdot wirken auf eine Matrix *zeilenweise*.

Es seien nun $u, v: U \rightarrow \mathbb{R}$ hinreichend glatt. Beweisen Sie die **Formel von Leibniz**:

$$D^\alpha(uv) = \sum_{\beta \leq \alpha} \binom{\alpha}{\beta} D^\beta u D^{\alpha-\beta} v$$

wobei für Multiindizes α, β gilt:

$$D^\alpha u = \partial_{x_1}^{\alpha_1} \dots \partial_{x_n}^{\alpha_n} u, \quad \binom{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha!}{\beta!(\alpha-\beta)!}, \quad \alpha! = \alpha_1! \cdot \alpha_2! \cdot \dots \cdot \alpha_n!$$

und $\beta \leq \alpha$ genau dann, wenn $\beta_i \leq \alpha_i$ für $i = 1, \dots, n$.

(zu a) Sei $u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in C^2$. Wir notieren Vektoren verkürzt $(u_i)_i = (u_i)_{i=1,\dots,n} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$. Es ist

$$\begin{aligned} \operatorname{div}((Du)^\top) &= \operatorname{div} \begin{pmatrix} \partial_1 u_1 & \partial_2 u_1 & \cdots & \partial_n u_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial_1 u_n & \partial_2 u_n & \cdots & \partial_n u_n \end{pmatrix}^\top = \operatorname{div} (\partial_j u_i)_{i,j}^\top = \operatorname{div} (\partial_i u_j)_{i,j} \\ &= \begin{pmatrix} \partial_{11} u_1 & \partial_{12} u_2 & \cdots & \partial_{1n} u_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial_{n1} u_1 & \partial_{n2} u_2 & \cdots & \partial_{nn} u_n \end{pmatrix} = \left(\sum_{j=1}^n \partial_{ij} u_j \right)_i \end{aligned}$$

und außerdem

$$(D(\operatorname{div} u))^\top = \left(D \left(\sum_{i=1}^n \partial_i u_i \right) \right)^\top = \begin{pmatrix} \partial_{11} u_1 + \partial_{21} u_2 + \cdots + \partial_{n1} u_n \\ \vdots \\ \partial_{1n} u_1 + \partial_{2n} u_2 + \cdots + \partial_{nn} u_n \end{pmatrix}^\top = \left(\sum_{j=1}^n \partial_{ji} u_j \right)_i$$

Wegen $u \in C^2$ sind alle partiellen Ableitungen stetig und können somit vertauscht

werden. Daraus folgt die (zeilenweise) Gleichheit mit

$$\operatorname{div} \left((Du)^\top \right) = \left(\sum_{j=1}^n \partial_{ij} u_j \right)_i = \left(\sum_{j=1}^n \partial_{ji} u_j \right)_i = (D(\operatorname{div} u))^\top$$

(zu b) Es ist

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(cA) &= \operatorname{div} \left(\sum_{j=1}^n c_j a_{ij} \right)_i = \sum_{i=1}^n \partial_i \sum_{j=1}^n c_j a_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \partial_i c_j a_{ij} \\ c \cdot \operatorname{div}(A) &= c \cdot \left(\sum_{j=1}^n \partial_j a_{ij} \right)_i = \sum_{i=1}^n c_i \sum_{j=1}^n \partial_j a_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \partial_j c_i a_{ij} \end{aligned}$$

und somit $\operatorname{div}(cA) = c \cdot \operatorname{div}(A)$.

(zu c) Man hat

$$\begin{aligned} A \cdot D\varphi &= A \cdot (\partial_i \varphi)_i = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \partial_j \varphi \right)_i \\ \varphi \operatorname{div}(A) &= \varphi \cdot \left(\sum_{j=1}^n \partial_j a_{ij} \right)_i = \left(\sum_{j=1}^n \varphi \partial_j a_{ij} \right)_i \\ \operatorname{div}(\varphi A) &= \operatorname{div} \left((\varphi a_{ij})_{i,j} \right) = \left(\sum_{j=1}^n \partial_j (\varphi a_{ij}) \right)_i \end{aligned}$$

Für fixiertes i (also zeilenweise) erhält man mit der Produktregel für (partielle) Ableitungen

$$\sum_{j=1}^n \partial_j (\varphi a_{ij}) = \sum_{j=1}^n ((\partial_j \varphi) a_{ij} + \varphi (\partial_j a_{ij})) = \sum_{j=1}^n (\partial_j \varphi) a_{ij} + \sum_{j=1}^n \varphi (\partial_j a_{ij})$$

und somit $\operatorname{div}(\varphi A) = A \cdot (D\varphi) + \varphi \cdot \operatorname{div}(A)$.

Leibnitz-Formel: Vollständige Induktion über $|\alpha| = k$.

(IA) $k = 0$: Für $|\alpha| = 0$, also $\alpha = 0$ ist

$$D^0(uv) = uv = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} D^0 u D^0 v$$

(IV) Für $|\alpha| = \sum_{i=1}^n \alpha_i = k$ gilt $D^\alpha(uv) = \sum_{\beta \leq \alpha} \binom{\alpha}{\beta} D^\beta u D^{\alpha-\beta} v$.

(IS) $k \rightarrow k+1$: Seien $|\alpha| = |(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)| = k+1$ und $\alpha' = (\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n - 1)$ sowie $\beta' = (\beta_1, \dots, \beta_{n-1}, \beta_n + 1)$. Dann ist $|\alpha'| = k$ und $|\beta'| = |\beta| + 1$. Es gilt

$$\begin{aligned}
D^\alpha(uv) &= \partial_{x_1}^{\alpha_1} \dots \partial_{x_n}^{\alpha_n}(uv) = \partial_{x_n} \left(\partial_{x_1}^{\alpha_1} \dots \partial_{x_n}^{\alpha_n-1}(uv) \right) \\
&= \partial_{x_n} \left(D^{\alpha'}(uv) \right) \\
&\stackrel{\text{IV}}{=} \partial_{x_n} \left(\sum_{\beta \leq \alpha'} \binom{\alpha'}{\beta} D^\beta u D^{\alpha'-\beta} v \right) \\
&= \sum_{\beta \leq \alpha'} \binom{\alpha'}{\beta} \left(\partial_{x_n}(D^\beta u) D^{\alpha'-\beta} v + D^\beta u \partial_{x_n}(D^{\alpha'-\beta} v) \right) \\
&= \sum_{\beta \leq \alpha'} \binom{\alpha'}{\beta} \left(D^{\beta'} u D^{\alpha'-\beta} v + D^\beta u D^{\alpha-\beta} v \right) \\
&= \dots \\
&= \sum_{\beta \leq \alpha} \binom{\alpha}{\beta} D^\beta u D^{\alpha-\beta} v
\end{aligned}$$

Aufgabe 2. Ermitteln Sie jeweils eine nichttriviale Lösung der folgenden partiellen Differentialgleichungen:

- (a) $v_y(x, y) = xy \cdot v(x, y)$
- (b) $u_x(x, y) + y \cdot u(x, y) = 0$

(zu a) Wir gehen analog zur Vorlesung vor und betrachten die Gleichung für fixiertes $x = \text{const.}$ Dann erhalten wir eine gewöhnliche Differentialgleichung

$$u'(y) = xy \cdot u(y)$$

und lösen entweder durch geübtes Hinschauen oder mit Trennung der Variablen: sei $f(u(y)) = u(y)$ und $g(y) = x \cdot y$. Der Ansatz

$$\int^{u(y)} \frac{1}{f(\xi)} d\xi = \int^y g(\xi) d\xi \Rightarrow \ln(|u(y)|) = \frac{1}{2}xy^2 + C$$

Beachte, dass die unteren Integralgrenzen dabei in der Konstante C zusammengefasst sind, da wir keinen Anfangswert vorgegeben haben. Die Gleichung „umgestellt“ ergibt eine Lösung

$$u(y) = \exp\left(\frac{1}{2}xy^2\right) \quad \text{bzw.} \quad v(x, y) = \exp\left(\frac{1}{2}xy^2\right)$$

Eine kurze Probe ergibt

$$v_y(x, y) = xy \cdot \exp\left(\frac{1}{2}xy^2\right) = xy \cdot v(x, y)$$

(zu b) Wir fixieren erneut eine Variable, diesmal $y = \text{const.}$ Diesmal sehen wir direkt eine Lösung, nämlich

$$u(x, y) = \exp(-xy)$$

Eine kurze Probe ergibt $u_x(x, y) + y \cdot u(x, y) = -y \cdot \exp(-xy) + y \cdot \exp(-xy) = 0$.

Zusatzaufgabe 3. Klassifizieren Sie die nachstehenden partiellen Differentialgleichungen nach folgenden Gesichtspunkten:

- (a) Ist die Differentialgleichung linear, semilinear, quasilinear oder voll nichtlinear?
- (b) Welche Ordnung hat die Differentialgleichung?

$$\Delta u = 0$$

$$-\Delta u = f(u)$$

$$|Du| = 1$$

$$u_t + \sum_{i=1}^n b^i u_{x_i} = 0$$

$$\det(D^2 u) = f$$

$$\operatorname{div} \left(\frac{Du}{\sqrt{1 + |Du|^2}} \right) = 0$$

$$u_t - \Delta u = f(u)$$

$$u_{tt} - \Delta u = 0$$

$$u_t + \operatorname{div} F(u) = 0$$

$$u_t + uu_x + u_{xxx} = 0$$

$$au_t + \Delta u = 0$$

$$u_t + H(Du, x) = 0$$

$$u_t - \Delta(u^\gamma) = 0$$

$$-\Delta u = \lambda u$$

$$\operatorname{div}(|Du|^{p-2} Du) = 0$$

$$u_t + uu_x = 0$$

Thema: Charakteristikenmethode

Ich bitte um Entschuldigung, dass meine Lösung so lang geworden ist. Aber ich habe mich bemüht mein Vorgehen detailliert zu beschreiben. ☺

Aufgabe 4. Finden Sie Lösungen $u \in C^1$ der folgenden linearen Randwertprobleme:

- (a) $-3u_x + 2u_y = 0$ mit $u(x, y) = y^2 + 1$ auf $\Gamma = \{(1, s) \in \mathbb{R}^2 \mid s \in \mathbb{R}\}$
- (b) $u_x + u_y - u_z = xe^{y-z}$ mit $u(0, y, z) = g(y, z)$ für alle $y, z \in \mathbb{R}$, wobei $g \in C^1(\mathbb{R}^2)$ beliebig ist
- (c) $2u_x - u_y = 2u - xe^x$ mit $u(0, y) = y^2$ für alle $y \in \mathbb{R}$

Erläutern Sie dabei Ihr Vorgehen und überprüfen Sie abschließend, ob die von Ihnen gefundene Lösung wirklich das Problem löst.

(zu a) Wir betrachten die Charakteristiken

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Sei $\alpha(t) := u(x(t), y(t))$, d.h. α beschreibt u entlang der Charakteristiken. Es gilt

$$\alpha'(t) = u_x \cdot \dot{x}(t) + u_y \cdot \dot{y}(t) = -3u_x + 2u_y = 0$$

und somit ist u konstant entlang der Charakteristiken. Parametrisiere die Kurve Γ durch $x_0(s) = 1$ und $y_0(s) = s$. Dann ergibt sich die Randwertbedingung zu $g(s) = s^2 + 1$. Wir prüfen nun die nichtcharakteristische Bedingung, d.h. ob die Kurve Γ auch alle Charakteristiken $\Xi_{(x_0, y_0)}$ durchläuft. Dazu prüfen wir den Tangentenvektor von Γ , nämlich $\begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, und den Tangentenvektor der Charakteristik $\Xi_{(x_0, y_0)}$, nämlich $\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \end{pmatrix}$, auf lineare Unabhängigkeit:

$$\det \begin{pmatrix} 0 & -3 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} = 3 \neq 0$$

Somit schneidet Γ alle Charakteristiken $\Xi_{(x_0, y_0)}$. Somit können wir die Schar der Charakteristiken beschreiben durch

$$\begin{aligned} x(s, t) = x_0(s) - 3t = 1 - 3t &\Rightarrow t(x, y) = \frac{1 - x}{3} \\ y(s, t) = y_0(s) + 2t = s + 2t &\Rightarrow s(x, y) = y - 2t = y - \frac{2}{3}(1 - x) = y + \frac{2}{3}x - \frac{2}{3} \end{aligned}$$

Nach Konstruktion in der Vorlesung erhalten wir damit eine Lösung

$$u(x, y) = g(s(x, y)) = \left(y + \frac{2}{3}x - \frac{2}{3}\right)^2 + 1$$

Die Probe liefert mit den partiellen Ableitungen

$$\left. \begin{aligned} u_x(x, y) &= \frac{4}{3} \left(y + \frac{2}{3}x - \frac{2}{3} \right)^2 \\ u_y(x, y) &= 2 \left(y + \frac{2}{3}x - \frac{2}{3} \right)^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow -3 \cdot \frac{4}{3} \left(y + \frac{2}{3}x - \frac{2}{3} \right)^2 + 4 \left(y + \frac{2}{3}x - \frac{2}{3} \right)^2 = 0$$

und außerdem $u(1, y) = y^2 + 1$ für den Anfangswert. Somit ist u also Lösung der Differentialgleichung.

(zu b) Wir betrachten die partielle Differentialgleichung $u_x + u_y - u_z = x \cdot e^{y-z}$ mit der Randbedingung $u(0, y, z) = g(y, z)$ für beliebiges $g \in C^1(\mathbb{R}^2)$. Definieren wir den „Rand“ als die Fläche $\Gamma = \{(0, y, z) \in \mathbb{R}^3 : y, z \in \mathbb{R}\}$. Diese lässt sich parametrisieren mit

$$\gamma(\sigma, \tau) = \begin{pmatrix} x_0(\sigma, \tau) \\ y_0(\sigma, \tau) \\ z_0(\sigma, \tau) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sigma \\ \tau \end{pmatrix}$$

Für die Tangentialebene erhalten wir die Spannvektoren

$$\gamma_\sigma(\sigma, \tau) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \gamma_\tau(\sigma, \tau) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{\gamma}(\sigma, \tau) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Betrachten wir die Charakteristiken $\Xi_{\sigma, \tau} = \text{Im}(\xi)$ mit

$$\xi(t, \sigma, \tau) = \begin{pmatrix} x(t, \sigma, \tau) \\ y(t, \sigma, \tau) \\ z(t, \sigma, \tau) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0(\sigma, \tau) + t \\ y_0(\sigma, \tau) + t \\ z_0(\sigma, \tau) - t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t \\ \sigma + t \\ \tau - t \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Prüfen wir die nichtcharakteristische Bedingung um sicherzustellen, dass auch jede Charakteristik $\Xi_{\sigma, \tau}$ von Γ durchlaufen wird:

$$\det(\dot{\gamma} \mid \dot{\xi}) = \det \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} = 1 \neq 0$$

Bezeichne mit $f(u, x, y, z) = x \cdot e^{y-z}$ die rechte Seite der Differentialgleichung. Schreibe $\xi(t) = \xi(t, \sigma, \tau)$ für fixiertes σ und τ (x, y, z analog). Sei $\alpha(t) := u(\xi(t))$ die Funktion u entlang einer Charakteristik $\Xi_{\sigma, \tau}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}(t) &= Du \cdot \dot{\xi} = f(u(\xi(t)), \xi(t)) = f(\alpha(t), t, \sigma + t, \tau - t) = t \cdot e^{(\sigma+t)-(\tau-t)} \\ &= t \cdot e^{\sigma-\tau+2t} \end{aligned} \quad (2.2)$$

und dem Anfangswert $\alpha(0) = \alpha(0, \sigma, \tau) = g(\sigma, \tau)$. Lösen wir also dieses Anfangswert-

problem und integrieren dazu die rechte Seite in Gleichung (2.2) partiell:

$$\begin{aligned}\alpha(t) &= \int t \cdot e^{\sigma-\tau+2t} dt = \left(\frac{1}{2}e^{\sigma-\tau+2t}\right)t - \int \frac{1}{2}e^{\sigma-\tau+2t} dt \\ &= \frac{1}{2}t \cdot e^{\sigma-\tau+2t} - \frac{1}{4}e^{\sigma-\tau+2t} + C(\sigma, \tau) \\ &= \left(\frac{1}{2}t - \frac{1}{4}\right)e^{\sigma-\tau+2t} + C(\sigma, \tau)\end{aligned}$$

Mit dem Anfangswert $\alpha(0) = g(\sigma, \tau)$ ergibt sich die Konstante

$$\alpha(0) = \frac{1}{4}e^{\sigma-\tau} + C(\sigma, \tau) \stackrel{!}{=} g(\sigma, \tau) \Rightarrow C(\sigma, \tau) = \frac{1}{4}e^{\sigma-\tau} + g(\sigma, \tau)$$

und somit die konkrete Lösung

$$\alpha(t) = \left(\frac{1}{2}t - \frac{1}{4}\right)e^{\sigma-\tau+2t} + \frac{1}{4}e^{\sigma-\tau} + g(\sigma, \tau)$$

Aus Gleichung (2.1) erhalten wir die Inverse von ξ als

$$\xi^{-1}(x, y, z) = \begin{pmatrix} t(x, y, z) \\ \sigma(x, y, z) \\ \tau(x, y, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y - x \\ z + x \end{pmatrix}$$

Nach Konstruktion in der Vorlesung erhalten wir die Lösung

$$\begin{aligned}u(x, y, z) &= \alpha(\xi^{-1}(x, y, z)) \\ &= \left(\frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\right)e^{(y-x)-(z+x)+2x} + \frac{1}{4}e^{(y-x)-(z+x)} + g(y-x, z+x) \\ &= \left(\frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\right)e^{y-z} + \frac{1}{4}e^{y-z-2x} + g(y-x, z+x)\end{aligned}$$

Nun prüfen wir noch, dass die gefundene Funktion auch wirklich eine Lösung der Differentialgleichung ist. Für die partiellen Ableitungen gilt

$$\begin{aligned}u_x(x, y, z) &= \frac{1}{2}e^{y-z} - \frac{1}{2}e^{y-z-2x} - \partial_1 g(y-x, z+x) + \partial_2 g(y-x, z+x) \\ u_y(x, y, z) &= \left(\frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\right)e^{y-z} + \frac{1}{4}e^{y-z-2x} + \partial_1 g(y-x, z+x) \\ u_z(x, y, z) &= -\left(\frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\right)e^{y-z} - \frac{1}{4}e^{y-z-2x} + \partial_2 g(y-x, z+x)\end{aligned}$$

Einsetzen liefert

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2}e^{y-z} - \frac{1}{2}e^{y-z-2x} - \partial_1 g(y-x, z+x) + \partial_2 g(y-x, z+x) \\
& + \left(\frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\right)e^{y-z} + \frac{1}{4}e^{y-z-2x} + \partial_1 g(y-x, z+x) \\
& + \left(\frac{1}{2}x + \frac{1}{4}\right)e^{y-z} + \frac{1}{4}e^{y-z-2x} - \partial_2 g(y-x, z+x) \\
& = e^{y-z} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}x - \frac{1}{4} + \frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\right) - e^{y-z-2x} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} - \frac{1}{4}\right) \\
& = x \cdot e^{y-z}
\end{aligned}$$

Außerdem ist die Randwertbedingung erfüllt, denn

$$u(0, y, z) = -\frac{1}{4}e^{y-z} + \frac{1}{4}e^{y-z} + g(y, z) = g(y, z)$$

und somit u tatsächlich Lösung der partiellen Differentialgleichung.

(zu c) Gegeben sei die partielle Differentialgleichung $2u_x - u_y = 2u + x \cdot e^x$ und die Randwertbedingung $u(0, y) = y^2$ für alle $y \in \mathbb{R}$. Bezeichnen wir mit $f(u, x, y) = 2u - x e^x$ die rechte Seite. Die Randwerte werden auf der Kurve $\Gamma = \{(0, y) \in \mathbb{R}^2 : y \in \mathbb{R}\}$ angenommen. Diese können wir parametrisieren mit

$$\gamma(s) = \begin{pmatrix} x_0(s) \\ y_0(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ s \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{\gamma}(s) = \begin{pmatrix} \dot{x}_0(s) \\ \dot{y}_0(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Damit wird die Randwertbedingung zu $g(s) = s^2$. Betrachten wir die Charakteristiken Ξ_s mit

$$\xi(t, s) = \begin{pmatrix} x(t, s) \\ y(t, s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0(s) + 2t \\ y_0(s) - t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2t \\ s + t \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Die nichtcharakteristische Bedingung ist hier erfüllt, denn

$$\det \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = -2 \neq 0$$

Betrachte nun die Funktion u entlang der Charakteristiken Ξ_s für fixiertes s beschrieben durch $\alpha(t) = u(\xi(t))$. Differenzieren ergibt

$$\dot{\alpha}(t) = u_x \cdot \dot{x} + u_y \cdot \dot{y} = f(u(\xi(t)), \xi(t)) = f(\alpha(t), 2t, s+t) = 2\alpha - 2t \cdot e^{2t} \quad (2.4)$$

bei $\alpha(0, s) = g(s) = s^2$. Dieses Anfangswertproblem lösen wir mit Variation der Konstanten. Das zugehörige homogene Problem besitzt offensichtlich die Lösung $\alpha(t) = c(t) \cdot e^{2t}$. Differenzieren wir diese Gleichung erhalten wir $\dot{\alpha}(t) = \dot{c}(t) \cdot e^{2t} + 2c(t) \cdot e^{2t}$. Setzen wir dies nun in Gleichung (2.4) ein, dann erhalten wir für ein $\hat{c} \in \mathbb{R}$

$$\dot{c}(t) \cdot e^{2t} + 2c(t) \cdot e^{2t} = 2c(t) \cdot e^{2t} - 2t \cdot e^{2t} \Rightarrow \dot{c}(t) = -2t \Rightarrow c(t) = \hat{c} - t^2$$

Damit ergibt sich die allgemeine Lösung $\alpha(t) = e^{2t}(\hat{c} - t^2)$. Durch den Anfangswert gilt $\alpha(0) = \hat{c} = s^2$ und somit ist $\alpha(t) = e^{2t}(s^2 - t^2)$ konkrete Lösung des Anfangswertproblems, was sich auch leicht überprüfen lässt:

$$\dot{\alpha}(t) = 2 \underbrace{e^{2t}(s^2 - t^2)}_{=\alpha(t)} - 2t \cdot e^{2t} = 2\alpha(t) - 2t \cdot e^{2t} \quad \text{und} \quad \alpha(0) = s^2$$

Aus Gleichung (2.3) erhalten wir

$$\xi^{-1}(x, y) = \begin{pmatrix} t(x, y) \\ s(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}x \\ \frac{1}{2}x + y \end{pmatrix}$$

Damit folgt nach Konstruktion in der Vorlesung eine Lösung

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \alpha(s(x, y)) = e^x \left(\left(\frac{1}{2}x + y \right)^2 - \frac{1}{4}x^2 \right) \\ &= e^x \left(\frac{1}{4}x^2 + xy + y^2 - \frac{1}{4}x^2 \right) \\ &= e^x (y^2 + xy) \end{aligned}$$

Dann gilt für die partiellen Ableitungen

$$\begin{aligned} u_x &= e^x (y^2 + xy) + y \cdot e^x \\ u_y &= e^x (2y + x) \end{aligned}$$

und somit

$$\begin{aligned} 2u_x - u_y &= 2e^x(y^2 + xy) + 2y \cdot e^x - e^x(2y + x) \\ &= 2u + e^x(2y - 2y - x) \\ &= 2u - x \cdot e^x \end{aligned}$$

und $u(0, y) = e^0(y^2 + 0 \cdot y) = y^2$. Damit ist also u tatsächlich Lösung der partiellen Differentialgleichung.

Aufgabe 6. Bestimmen Sie eine Lösung $u \in C^1(U)$ des quasilinearen Randwertproblems

$$\begin{aligned} uu_x + u_y &= 1 \\ u(x, x) &= \frac{1}{2}x \quad \forall x \in \mathbb{R} \setminus \{\xi\} \end{aligned}$$

wobei $\xi \in \mathbb{R}$ geeignet gewählt und U eine geeignet gewählte Umgebung der Menge ist, auf der u vorgegeben ist. Nutzen Sie dazu die Methode der Charakteristiken, überprüfen Sie Ihr Ergebnis und skizzieren Sie einige Charakteristiken in der Nähe des Punktes (ξ, ξ) .

Aus der Vorlesung kennen wir die Notation $a(u(x), x) \cdot Du + b(u(x), x) = 0$. Wir notieren $a(u(x, y), x, y) = (u(x, y), 1)$ und $b(u(x, y), x, y) = -1$. Aus der Randwertbedingung erhalten wir eine Kurve $\Gamma = \{(x, x) \in \mathbb{R}^2 : x \in \mathbb{R} \setminus \{\xi\}\}$ mit Parametrisierung $\gamma(s) = \begin{pmatrix} x_0(s) \\ y_0(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s \\ s \end{pmatrix}$, auf der $g(s) = \frac{1}{2}s$ gilt. Wir überprüfen die nichtcharakteristische Bedingung gemäß Konstruktion in der Vorlesung als

$$\det(\dot{\gamma} \mid a(g(s), \gamma(s))) = \det \begin{pmatrix} 1 & g(s) \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2}s \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = 1 - \frac{1}{2}s \neq 0 \quad \forall s \neq 2$$

Wähle somit also $\xi = 2$, um die Regularität zu sichern. Betrachten wir $\alpha(t, s) = u(x(t, s), y(t, s))$ als die Funktion u entlang der Charakteristiken. Da die partielle Differentialgleichung quasilinear ist, reichen die beiden folgenden charakteristischen Gleichungen zu lösen aus:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} &= a(\alpha, x, y) = \begin{pmatrix} \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \\ \dot{\alpha} &= -b(\alpha, x, y) = 1 \end{aligned}$$

mit den Anfangswerten $\alpha(0, s) = \frac{1}{2}s$, $x(0, s) = s$ und $y(0, s) = s$. Lösen wir diese gewöhnlichen Differentialgleichungen:

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= t + c(s) & \xrightarrow{\text{AW}} c(s) &= \frac{1}{2}s & \Rightarrow \alpha(t, s) &= t + \frac{1}{2}s \\ y(t) &= t + c(s) & \xrightarrow{\text{AW}} c(s) &= s & \Rightarrow y(t, s) &= t + s \\ x(t) &= \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}st + c(s) & \xrightarrow{\text{AW}} c(s) &= s & \Rightarrow x(t, s) &= \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}st + s \end{aligned}$$

Wegen der charakteristischen Bedingung können wir dieses Gleichungssystem nach t und s auflösen:

$$\begin{aligned} y(t, s) &= t + s \Rightarrow s = y - t \\ x(t, s) &= \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}st + s = \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}(y - t)t + y - t = t \left(\frac{1}{2}y - 1 \right) + y \end{aligned}$$

also

$$t(x, y) = \frac{x - y}{\frac{1}{2}y - 1} \quad \text{und} \quad s(x, y) = y - \frac{x - y}{\frac{1}{2}y - 1}$$

Setzen wir dies als Lösung $u(x, y) = \alpha(t(x, y), s(x, y))$ zusammen, erhalten wir

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \alpha\left(\frac{x-y}{\frac{1}{2}y-1}, y - \frac{x-y}{\frac{1}{2}y-1}\right) \\ &= \frac{x-y}{\frac{1}{2}y-1} + \frac{1}{2}y - \frac{1}{2}\frac{x-y}{\frac{1}{2}y-1} \\ &= \frac{x-y}{y-2} + \frac{1}{2}y \quad \forall x, y \in \mathbb{R}, y \neq 2 \end{aligned}$$

Überprüfen wir unser Ergebnis: Es gilt

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \frac{x-y}{y-2} + \frac{1}{2}y \\ u_x(x, y) &= \frac{1}{y-2} \\ u_y(x, y) &= \frac{-1}{y-2} - \frac{x-y}{(y-2)^2} + \frac{1}{2} = \frac{2-x}{(y-2)^2} + \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Setzen wir dies in die partielle Differentialgleichung ein, so erhalten wir

$$\begin{aligned} u(x, y) \cdot u_x(x, y) + u_y(x, y) &= \left(\frac{x-y}{y-2} + \frac{1}{2}y\right) \cdot \frac{1}{y-2} + \frac{2-x-2y}{(y-2)^2} + \frac{1}{2} \\ &= \frac{x-y}{(y-2)^2} + \frac{1}{2}y \frac{1}{y-2} + \frac{2-x}{(y-2)^2} + \frac{1}{2} \\ &= \frac{2-y}{(y-2)^2} + \frac{1}{2}y \frac{1}{y-2} + \frac{1}{2} \\ &= \left(\frac{1}{2}y - 1\right) \frac{1}{y-2} + \frac{1}{2} \\ &= 1 \end{aligned}$$

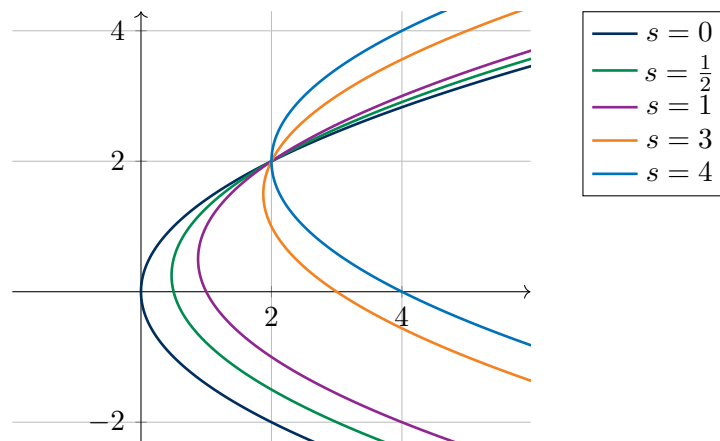
und für die Randwerte $u(x, x) = \frac{1}{2}x$ für alle $x \neq 2$.

Betrachten wir die Charakteristiken beschrieben mit einer Parametrisierung für fixiertes $s \neq 2$ und betrachten das Gleichungssystem

$$x(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}st + s \\ t + s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \Rightarrow t = 2 - s \Rightarrow 2 = \frac{1}{2}(2-s)^2 + \frac{1}{2}s(2-s) + s = 2$$

Somit sind die Gleichungen unabhängig von $s \in \mathbb{R} \setminus \{2\}$ erfüllt und alle Charakteristiken gehen durch den Punkt $(2, 2)$.

Charakteristiken $x(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}st + s \\ t + s \end{pmatrix}$



Aufgabe 7. Wir betrachten die *Burgers-Gleichung*

$$\begin{aligned}u_t + uu_x &= 0 && \text{für } (x, t) \in \mathbb{R} \times (0, \infty) \\ u(x, 0) &= g(x) && \text{für alle } x \in \mathbb{R}\end{aligned}$$

(a) Es sei zuerst g gegeben durch

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \geq 0, \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases}$$

Zeigen Sie, dass die Funktionen

$$v(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \geq \frac{1}{2}t, \\ 0 & \text{für } x < \frac{1}{2}t \end{cases} \quad \text{und} \quad w(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \geq t, \\ \frac{x}{t} & \text{für } x \in [0, t), \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases}$$

schwache Lösungen sind.

Hinweis: Es genügt, die Randwerte, die Rankine-Hugoniot-Bedingung auf Sprungkurven und die Differentialgleichung abseits dieser Kurven zu überprüfen.

(b) Es sei nun g gegeben durch

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \leq 0 \\ 1 - x & \text{für } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{für } x \geq 1 \end{cases}$$

- i. Offenbar ist $g \notin C^1(\mathbb{R})$. Stellen Sie dennoch die charakteristischen Gleichungen auf und ermitteln Sie, welche Lösung man formal für $t < 1$ erwarten würde.
- ii. In welchen Punkten $(x, t) \in \mathbb{R} \times (0, 1)$ gilt $u_t + uu_x = 0$?
- iii. Setzen Sie u derart auf $\mathbb{R} \times (0, \infty)$ fort, dass nur eine Sprungkurve existiert und dass entlang dieser die Rankine-Hugoniot-Bedingung erfüllt ist.

Hinweis: Es bietet sich an, dass u für $t \geq 1$ nur die Werte 0 und 1 annimmt.

Für die Burgers-Gleichung gilt in Anlehnung an die Notation der Vorlesung $F(u)_x = uu_x$ und damit $F(u) = \frac{1}{2}u^2$.

(zu a) Wir betrachten die Funktion v . Für die Randwerte, d.h. für $y = 0$ gilt

$$v(x, 0) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \geq 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases} = g(x) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}$$

Die Sprungkurve ist gegeben durch $s(t) = \frac{1}{2}t$ mit $\dot{s} = \frac{1}{2}$. Es gilt $[[v]] = -1$ und $[[F(v)]] = 0 - \frac{1}{2} = -\frac{1}{2}$, also ist mit $[[F(v)]] = \dot{s} \cdot [[v]]$ die Rankine-Hugoniot-Bedingung erfüllt. Betrachte die Differentialgleichung abseits der Sprungkurve:

- Sei $x > \frac{1}{2}t$. Dann ist v gegeben durch $v(x, t) = 1$ und somit $v_t = v_x \equiv 0$. Eingesetzt in die PDE ergibt dies $v_t + vv_x = 0 + 1 \cdot 0 = 0$. ✓
- Sei $x < \frac{1}{2}t$. Dann ist v gegeben durch $v(x, t) = 0$ und somit $v_t = v_x \equiv 0$. Eingesetzt in die PDE ergibt dies $v_t + vv_x = 0 + 0 \cdot 0 = 0$. ✓

Betrachten wir nun die Funktion w . Die Randwerte werde wegen

$$w(x, 0) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \geq 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases} = g(x) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}$$

erfüllt. Wir erhalten hier zwei Sprungkurven:

- Die Winkelhalbierende können wir durch $s_1(t) = t$ parametrisieren, also ist $\dot{s} = 1$. Dann ergibt sich für die Differenzen

$$[[F(w)]] = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0 \quad \text{und} \quad [[w]] = 1 - \frac{t}{t} = 0 \quad \Rightarrow \quad [[F(w)]] = \dot{s}_1 \cdot [[w]]$$

- Für die andere Sprungkurve, die wir mit $s_2(t) = 0$ parametrisieren ($\dot{s} = 0$), erhalten wir

$$[[F(w)]] = 0 - 0 = 0 \quad \text{und} \quad [[w]] = \frac{0}{t} - 0 = 0 \quad \Rightarrow \quad [[F(w)]] = \dot{s}_2 \cdot [[w]]$$

Die Differentialgleichung wird abseits der Sprungkurven auch erfüllt:

- Sei $x > t$. Dann ist w gegeben durch $w(x, t) = 1$ und somit $w_t = w_x \equiv 0$. Eingesetzt in die PDE ergibt dies $w_t + ww_x = 0 + 1 \cdot 0 = 0$. ✓
- Sei $x \in [0, t)$. Dann ist w gegeben durch $w(x, t) = \frac{x}{t}$ und somit $w_t = \frac{-x}{t^2}$ und $w_x = \frac{1}{t}$. Eingesetzt in die PDE ergibt dies $w_t + ww_x = \frac{-x}{t^2} + \frac{x}{t} \frac{1}{t} = 0$. ✓
- Sei $x < 0$. Dann ist w gegeben durch $w(x, t) = 0$ und somit $w_t = w_x \equiv 0$. Eingesetzt in die PDE ergibt dies $w_t + ww_x = 0 + 0 \cdot 0 = 0$. ✓

Damit sind also v und w schwache Lösungen der partiellen Differentialgleichung.

(zu b) Mit $y := (x, t)$, $a(u, y) = \begin{pmatrix} u \\ 1 \end{pmatrix}$ und $b(u, y) = 0$ hat die Burgersgleichung die quasilineare

Form der Vorlesung. Dann sind die charakteristischen Gleichungen gegeben durch

$$\begin{aligned}\dot{y}(\tau, \sigma) &= \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{t} \end{pmatrix} = a(\alpha, y) = \begin{pmatrix} \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \\ \dot{\alpha}(\tau, \sigma) &= a(\alpha, y) \cdot Du = -b(u, y) = 0 \quad \text{mit} \quad \alpha(0, \sigma) = g(\sigma)\end{aligned}$$

Aus der zweiten Gleichung erhalten wir die Lösung $\alpha(\tau, \sigma) = g(\sigma)$, d.h. u ist entlang der Charakteristiken konstant. Aus der ersten Gleichung erhalten wir zum einen die Identifizierung $\tau = t$, d.h. die Charakteristiken können durch die Zeit t parametrisiert werden. Zum anderen die gewöhnliche Differentialgleichung $\dot{x} = \alpha$ mit der Lösung $x(\tau, \sigma) = \alpha(\tau, \sigma) \cdot \tau + s = g(\sigma) \cdot \tau + s$ bzw. mit der Identifizierung dann $x(t) = g(\sigma) \cdot t + \sigma$. Setzen wir die Definition von g ein, so erhalten wir

$$x(t) = \begin{cases} t + s & s \leq 0 \\ (1-s)t + s & 0 \leq s \leq 1 \\ s & s \geq 1 \end{cases}$$

Für $t \leq 1$ können wir jeden Fall umstellen und erhalten

$$s = \begin{cases} x - t & x - t \leq 0 \\ \frac{x-t}{1-t} & x - t \geq 0 \wedge x \leq 1 \\ x & x \geq 1 \end{cases}$$

Nach Konstruktion erhalten wir dann die Lösung

$$u(x, t) = \alpha(\tau, \sigma) = g(s(t, x)) = \begin{cases} 1 & x - t \leq 0 \\ 1 - \frac{x-t}{1-t} & x - t \geq 0 \wedge x \leq 1 \\ 0 & x \geq 1 \end{cases}$$

Sei nun $t \in (0, 1)$. Wir prüfen die Gültigkeit der Differentialgleichung:

- Sei $x - t \leq 0$. Dann ist also $u(x, t) = 1$ und $u_x = u_t \equiv 0$ und die Differentialgleichung erfüllt.
- Ist $x - t \geq 0$ und $x \leq 1$, dann ist $u(x, t) = 1 - \frac{x-t}{1-t}$ und $u_x(x, t) = \frac{1}{1-t}$ sowie $u_t(x, t) = \frac{(t-1)+(x-t)}{(1-t)^2}$. In die Differentialgleichung eingesetzt ergibt dies

$$u_t + uu_x = \frac{(t-1)+(x-t)}{(1-t)^2} + \frac{1}{1-t} - \frac{x-t}{(1-t)^2} = 0 \quad \checkmark$$

- Sei $x \geq 1$. Dann ist $u = u_x = u_t \equiv 0$ und die Differentialgleichung damit erfüllt.

Somit ist u Lösung der Differentialgleichung für alle $x \in \mathbb{R}$ und $t \in (0, 1)$.