



**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](mailto: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  $\mathbb{R}^n$ ,  $Du = (\partial_j u_i)_{i,j=1,\dots,n}$ ,  $\operatorname{div}$  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  $\alpha, \beta$  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.  $\alpha$  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  $\Gamma$  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  $\Gamma$  auch alle Charakteristiken  $\Xi_{(x_0, y_0)}$  durchläuft. Dazu prüfen wir den Tangentenvektor von  $\Gamma$ , 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  $\Gamma$  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  $\Gamma$  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  $\sigma$  und  $\tau$  ( $x, y, z$  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  $\xi$  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  $\Xi_s$  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  $\Xi_s$  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  $(\xi, \xi)$ .

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

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

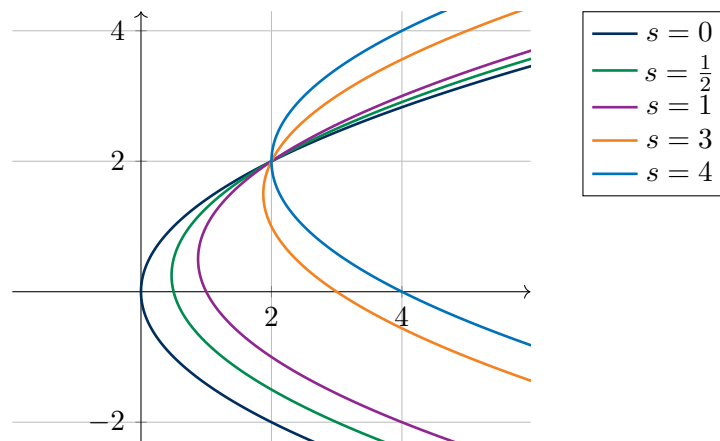
und für die Randwerte  $u(x, x) = \frac{1}{2}x$  für alle  $x \neq 2$ .

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  $x(\tau, \sigma) = g(\sigma) \cdot \tau + s$  bzw. mit der Identifizierung dann  $x(t) = g(\sigma) \cdot t + \sigma$ . Setzen wir die Definition von  $g$  ein, so erhalten wir

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

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

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

Nach Konstruktion erhalten wir dann die Lösung

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

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  $t \in (0, 1)$ .



**Aufgabe 8.** Betrachten Sie das Beispiel „Ampel (von rot auf grün)“ aus der Vorlesung, modelliert durch

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

mit

$$F(u) = u(60 - \frac{2}{5}u) \quad \text{und} \quad g(x) = \begin{cases} 150 & \text{für } x < 0 \\ 0 & \text{für } x \geq 0 \end{cases}$$

- (a) In der Vorlesung wurde in Teil a) eine Funktion  $u_a$  explizit gegeben. In Teil b) wurde eine weitere Lösung  $u_b$  skizziert. Ermitteln Sie  $u_b$  explizit.

*Hinweis:* Die charakteristischen Gleichungen geben  $u_b$  auf eine großen Menge vor. Ermitteln Sie  $u_b$  für die restlichen  $(x, t)$ , indem sie eine differenzierbare reelle Funktion  $v$  derart bestimmen, dass  $u_b(x, t) = v(\frac{x}{t})$  die Differentialgleichung löst.

- (b) Überprüfen Sie für  $u_a$  und  $u_b$  entlang aller Sprungkurven die Rankine-Hugoniot-Bedingung und die Entropiebedingung.

(zu a) Für die skalare Erhaltungsgleichung erhalten wir die aus der Vorlesung bekannten Bezeichnungen mit  $y = (x, t)$ ,  $a(u, y) = (60 - \frac{4}{5}u, 1)$  und  $b \equiv 0$ . Außerdem sind die Startwerte der charakteristischen Gleichungen gegeben durch  $x_0(s) = s$ ,  $t_0(s) = 0$ , und als Randwerte  $g(s) = 150 \cdot \mathbb{1}_{\{s < 0\}}(s)$ . Wir erhalten die charakteristischen Gleichungen

$$\begin{aligned} \dot{y}(\tau, \sigma) &= \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{t} \end{pmatrix} = a(\alpha, y) = \begin{pmatrix} 60 - \frac{4}{5}u \\ 1 \end{pmatrix} \\ \dot{\alpha}(\tau, \sigma) &\stackrel{\text{DGI}}{=} -b(\alpha, y) = 0 \end{aligned}$$

Aus der letzten Zeile der ersten Gleichung erhalten wir dabei die Identifizierung  $t(\tau, \sigma) = \tau$ . Die zweite charakteristische Gleichung löst sich unter Nutzung des Anfangswertes  $\alpha(0, \sigma) = g(\sigma)$  zu  $\alpha(\tau, \sigma) = g(\sigma)$ . Setzen wir dies in die erste Zeile der ersten Gleichung ein, so erhalten wir  $\dot{x}(\tau, \sigma) = 60 - \frac{4}{5}g(\sigma)$ . Dies löst sich mit dem Anfangswert  $x(0, \sigma) = \sigma$  zu

$$x(\tau, \sigma) = 60\tau - \frac{4}{5}g(\sigma) \cdot \tau + \sigma = \begin{cases} -60t + \sigma & \sigma < 0 \\ 60t + \sigma & \sigma \geq 0 \end{cases}$$

Für  $\tau = t > 0$  lässt sich dies umstellen zu

$$\sigma(x, t) = \begin{cases} x + 60t & x < 0 \\ x - 60t & x \geq 0 \end{cases}$$

Damit erhalten wir die Lösung

$$u(x, t) = \alpha(t, \sigma) = \begin{cases} 150 & \sigma(x, t) < 0 \\ 0 & \sigma(x, t) \geq 0 \end{cases}$$

Da  $t \in (0, \infty)$  ist, ist somit  $u$  auf der Menge  $\{(x, t) : t \in (0, \infty), x \notin (-60t, 60t)\}$  eindeutig vorgegeben. Wir erweitern nun auf  $t \in \mathbb{R}$  und betrachte  $x \in (-60t, 60t)$ . Dabei soll eine Funktion  $v$  mit  $u(x, t) = v(\frac{x}{t})$  bestimmt werden, die die PDE erfüllt. Die Funktion  $u$  muss gemäß Vorlesung ihr Maximum auf der  $t$ -Achse, also für  $x = 0$  annehmen. Dementsprechend gilt  $u(0, t) = v(\frac{0}{t}) = v(0) = u_{\text{opt}} = 75$ . Da wir  $x \in (-60t, 60t)$  betrachten, gilt  $\frac{x}{t} \in (-60, 60)$ . Die Randwerte sollten dabei mit minimaler (rechts) bzw. maximaler (links) Dichte gegeben sein, d.h.  $v(-60) = 150$  und  $v(60) = 0$ . Diese drei Punkte definieren uns eine eindeutige Polynomfunktion zweiten Grades:

$$v(\xi) = -\frac{5}{4s}\xi + 75 \quad \text{auf } (-60, 60)$$

Damit können wir  $u$  definieren als

$$u(x, t) = v\left(\frac{x}{t}\right) = -\frac{5}{4} \frac{x}{t} + 75 \quad \text{für } t \in \mathbb{R} \text{ und } x \in (-60t, 60t)$$

Damit gilt  $u_x(x, t) = -\frac{5}{4} \frac{1}{t}$  und  $u_t(x, t) = \frac{5}{4} \frac{x}{t^2}$ . In die PDE eingesetzt liefert dies

$$\begin{aligned} u_t + F(u)_x &= u_t + \left(60 - \frac{4}{5}u\right) u_x \\ &= \frac{5}{4} \frac{x}{t^2} + \left(60 + \frac{x}{t} - 60\right) \left(-\frac{5}{4} \frac{1}{t}\right) = \frac{5}{4} \frac{x}{t^2} - \frac{5}{4} \frac{x}{t^2} = 0 \quad \checkmark \end{aligned}$$

Somit können wir  $u$  schlussendlich definieren als

$$u(t, x) = \begin{cases} 150 & x < -60t \\ -\frac{5}{4} \frac{x}{t} + 75 & -60t \leq x \leq 60t \\ 0 & x > 60t \end{cases}$$

(zu b) Definiere  $u_b := u$  von oben. Man sieht leicht, dass  $u_b$  eine stetige Funktion ist. Daher existieren keine Sprungkurven und die Rankine-Hugoniot- bzw. Entropie-Bedingungen müssen nicht betrachtet werden. (Die Rankine-Hugoniot-Bedingungen werden trivialerweise trotzdem erfüllt, aber die Entropie-Bedingung nicht mehr).

Aus der Vorlesung bekannt ist

$$u_a(x, t) = \begin{cases} 150 & x < 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases}$$

Wir betrachten die Sprungkurve  $x = s(t) = 0$ . Dann ist auch  $\dot{s} = 0$  und mit  $F(u) = u\left(60 - \frac{2}{5}u\right)$  gilt

$$\left. \begin{aligned} [[u]] &= 150 \\ [[F(u)]] &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow [[F(u)]] = \dot{s} \cdot [[u]]$$

Es ist  $F'(u) = 60 - \frac{4}{5}u$  und damit  $F'(u_l) = F'(150) = -60$  sowie  $F'(u_r) = F'(0) = 60$ . Somit ist die Entropie-Bedingung verletzt.

**Aufgabe 12.** Eine Funktion  $u \in C^2(U)$  über einer offenen Menge  $U \subset \mathbb{R}^n$  heißt harmonisch, falls  $\Delta u = 0$  in  $U$ .

(a) Zeigen Sie, dass die durch

$$u(x) = \begin{cases} \ln(|x|) & \text{für } n = 2, \\ \frac{1}{|x|^{n-2}} & \text{für } n \geq 3 \end{cases}$$

definierte Funktion auf  $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$  harmonisch ist.

(b) Es sei  $u: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  harmonisch und  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  orthogonal. Zeigen Sie, dass durch  $v(x) = u(Ax)$  eine harmonische Funktion  $v: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  definiert wird.

(zu a) Sei  $n = 2$  und  $x = (x_1, x_2) \in U$ . Dann ist  $u(x) = \ln|x| = \ln(r(x))$  mit  $r(x) := |x|$ . Mit  $r_{x_i}(x) = \frac{x_i}{|x|}$  ist

$$u_{x_i}(x) = \frac{1}{|x|} \cdot r_{x_i}(x) = \frac{x_i}{|x|^2} = \frac{1}{x_1^2 + x_2^2}$$

Leiten wir weiter nach  $x_i$  ab, dann erhalten wir

$$u_{x_i x_i}(x) = \partial_{x_i} \frac{1}{x_1^2 + x_2^2} = \frac{x_1^2 + x_2^2 - x_i \cdot 2x_i}{|x|^4} = \frac{|x|^2 - 2x_i^2}{|x|^4}$$

und somit für den Laplace-Operator

$$\Delta u(x) = u_{x_1 x_1} + u_{x_2 x_2} = \frac{|x|^2 - 2x_1^2}{|x|^4} + \frac{|x|^2 - 2x_2^2}{|x|^4} = 0 \quad \checkmark$$

Sei  $n \geq 3$ . Dann ist  $u(x) = |x|^{2-n}$ . Es gilt

$$\begin{aligned} u_{x_i}(x) &= (2-n) \cdot |x|^{1-n} \cdot \frac{x_i}{|x|} = (2-n) \cdot |x|^{-n} \cdot x_i \\ u_{x_i x_i}(x) &= (2-n) \cdot \partial_{x_i} \left( x_i \cdot |x|^{-n} \right) \\ &= (2-n) \cdot \left( |x|^{-n} - n \cdot |x|^{-n-1} \frac{x_i}{|x|} \cdot x_i \right) \\ &= (2-n) \cdot \left( |x|^{-n} - n \cdot |x|^{-n-2} \cdot x_i^2 \right) \end{aligned}$$

Damit gilt für den Laplace-Operator

$$\begin{aligned} \Delta u(x) &= \sum_{i=1}^n u_{x_i x_i}(x) = (2-n) \cdot \left( \sum_{i=1}^n |x|^{-n} - n \cdot |x|^{-n-2} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \\ &= (2-n) \left( n \cdot |x|^{-n} - n \cdot |x|^{-n-2} \cdot |x|^2 \right) \\ &= 0 \quad \checkmark \end{aligned}$$

(zu b) Sei  $u: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  harmonisch und  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  orthogonal, d.h.  $A^\top = A^{-1}$ . Betrachte

$$v_{x_i}(x) = Du(Ax) \cdot \partial_i Ax = Du(Ax) \cdot a_i = \sum_{k=1}^n u_{x_k}(Ax) \cdot a_{ki}$$

$$v_{x_i x_i}(x) = \partial_{x_i} \left( \sum_{k=1}^n u_{x_k}(Ax) \cdot a_{ki} \right) = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n u_{x_k x_\ell}(Ax) \cdot a_{ki} a_{\ell i}$$

Aufgrund der Orthogonalität von  $A$  ist  $\sum_{i=1}^n a_{ki} a_{\ell i} = \delta_{k\ell}$ . Somit ist

$$\Delta v(x) = \sum_{i=1}^n v_{x_i x_i}(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n u_{x_k x_\ell}(Ax) \cdot a_{ki} a_{\ell i} = \sum_{i=1}^n u_{x_i x_i}(Ax) = \Delta u(Ax) = 0 \quad \checkmark$$

und daher auch  $v$  harmonisch.

**Aufgabe 13.** Es sei  $\Phi$  die Fundamentallösung der Laplace-Gleichung, d. h.

$$\Phi(x) = \begin{cases} -\frac{1}{2\pi} \ln(|x|) & \text{für } n = 2, \\ \frac{1}{n(n-2)\alpha(n)} \frac{1}{|x|^{n-2}} & \text{für } n \geq 3 \end{cases}$$

für  $x \neq 0$ . Zeigen Sie für  $x \neq 0$  die Abschätzungen  $|D\Phi(x)| \leq c|x|^{1-n}$  und  $|D^2\Phi(x)| \leq c|x|^{-n}$ .

Für  $n = 2$  gilt  $\Phi_{x_i}(x) = -\frac{1}{2\pi} \frac{1}{|x|} \cdot \frac{x_i}{|x|} = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{x_i}{|x|^2}$ . Leiten wir für  $n \geq 3$  nach  $x_i$  ab, so erhalten wir  $\Phi_{x_i}(x) = \frac{2-n}{n(n-2)\alpha(n)} \cdot |x|^{1-n} \frac{x_i}{|x|} = \frac{2-n}{n(n-2)\alpha(n)} \cdot x_i \cdot |x|^{-n}$ . Beide Fälle können wir mit einer universellen Konstante  $c$  zusammenfassen und erhalten mit  $\frac{x_i}{|x|} \leq 1$  auch folgende Abschätzung:

$$\Phi_{x_i}(x) = c \cdot x_i \cdot |x|^{-n} = c \cdot |x|^{1-n} \cdot \frac{x_i}{|x|} \leq c \cdot |x|^{1-n} \quad (i = 1, \dots, n)$$

Damit erhalten wir für die erste Ungleichung

$$|D\Phi(x)| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Phi_{x_i}(x)^2} \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( c \cdot |x|^{1-n} \right)^2} = c \cdot n \cdot |x|^{1-n} = c \cdot |x|^{1-n}$$

Für die zweiten Ableitungen gilt dann entsprechend

$$\Phi_{x_i x_j}(x) = c \left( \delta_{ij} |x|^{-n} - n x_i |x|^{-n-1} \cdot \frac{x_j}{|x|} \right) = c \cdot |x|^{-n} \left( \delta_{ij} - n \cdot x_i x_j \cdot |x|^{-2} \right)$$

$$\Rightarrow \quad |D^2\Phi(x)| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Phi_{x_i x_j}(x)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( |x|^{-n} \right)^2 \cdot \left( c \delta_{ij} - n x_i x_j |x|^{-2} \right)^2}$$

$$= |x|^{-n} \sqrt{nc^2 - 2n|x|^{-2} \sum_{i=1}^n x_i^2 + n^2 |x|^{-4} \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{j=1}^n x_j^2}$$

$$= |x|^{-n} \cdot \sqrt{nc^2 - 2n + n^2}$$

$$\leq c |x|^{-n}$$

**Aufgabe 14.** Es sei  $U \subset \mathbb{R}^n$  ein beschränktes Gebiet und  $u \in C^2(U) \cap C(\bar{U})$  eine Lösung von

$$-\Delta u = f(u, x) \quad \text{in } U, \quad u = g \quad \text{auf } \partial U,$$

wobei  $f$  und  $g$  im Folgenden spezifisch gewählt werden.

- (a) Es sei  $f(u, x) = u - u^3$  und  $g = 0$ . Beweisen Sie *mit elementaren Methoden* die Abschätzung  $-1 \leq u(x) \leq 1$  für alle  $x \in \bar{U}$ .
- (b) Es sei  $U = (-a, a)^n$  für ein  $a > 0$ ,  $f(u, x) = -1$  und  $g = 0$ . Finden Sie möglichst gute obere und untere Schranken für  $u(0)$ , indem Sie eine harmonische Funktion der Form  $v = u + w$  betrachten, wobei  $w$  geeignet zu wählen ist
- (c) Es sei  $U = B_1(0)$ ,  $f(u, x) = h(x)$  mit  $h, g \in C^1(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ . Zeigen Sie, dass es eine von  $n$ ,  $h$ ,  $g$  und  $u$  unabhängige Konstante  $c > 0$  gibt, für die gilt:

$$\max_{\bar{B}_1(0)} |u| \leq c \cdot \left( \max_{\partial B_1(0)} |g| + \max_{\bar{B}_1(0)} |h| \right)$$

*Hinweis:* Betrachten sie  $u - v$ , wobei  $v(x) = \max_{\partial B_1(0)} |g| + (e^2 - e^{x_1+1}) \max_{\bar{B}_1(0)} |h|$ .

(zu a) Es sei  $f(u) = u - u^3$  und  $g \equiv 0$ . Da  $U$  beschränktes Gebiet ist und  $\bar{U}$  eine abgeschlossene Menge, ist also  $\bar{U}$  kompakt. Da  $u$  stetig auf  $\bar{U}$  ist, nimmt  $u$  ein Maximum in einem  $x_0 \in \bar{U}$  an. Nehmen wir an es sei  $u(x_0) > 1$ . Es gilt  $\equiv g \equiv 0$  auf  $\partial U$ , d.h. um ein Maximum  $u(x_0) > 1$  zu besitzen, muss  $x_0 \in \text{int } U$  sein. Da  $u(x_0)$  Maximum ist mit  $u \in C^2(U)$ , gilt  $u_{x_i x_i}(x_0) \leq 0$  für alle  $i = 1, \dots, n$ . Nach Differentialgleichung ist dann also

$$0 \leq -\Delta u(x_0) = -\sum_{i=1}^n u_{x_i x_i}(x_0) = u(x_0) - u^3(x_0) = u(x_0) \left(1 - u(x_0)^2\right) \stackrel{u(x_0) > 1}{<} 0$$

ein Widerspruch. Somit ist dann  $u(x_0) \leq 1$  und aufgrund der Maximalität von  $u(x_0)$  auch  $u(x) \leq u(x_0) \leq 1$  für alle  $x \in \bar{U}$ .

Analog dazu nimmt  $u$  auf  $\bar{U}$  ein globales Minimum in  $x_0 \in \bar{U}$  an, für welches nach gleicher Argumentation wie oben  $x_0 \in \text{int } U$  gilt. Nehmen wir an, es sei  $u(x_0) < -1$ . Als Minimalstelle gilt  $u_{x_i x_i}(x_0) \geq 0$  für alle  $i = 1, \dots, n$ . Nach PDE gilt dann

$$0 \geq -\Delta u(x_0) = -\sum_{i=1}^n u_{x_i x_i}(x_0) = u(x_0) - u^3(x_0) = u(x_0) \left(1 - u(x_0)^2\right) \stackrel{u(x_0) < -1}{<} 0$$

ein Widerspruch. Somit ist  $u(x) \geq u(x_0) \geq -1$  für alle  $x \in \bar{U}$  und schließlich gilt die Einschließung  $-1 \leq u(x) \leq 1$  für alle  $x \in \bar{U}$ .

(zu b) Sei  $a > 0$  und  $U = (-a, a)^n$  ein  $n$ -dimensionaler (offener) Quader. Weiter sei  $f \equiv -1$  und  $g \equiv 0$ . Gesucht sind „gute“ (obere und untere) Schranken von  $u(0)$ . Wir betrachten eine harmonische Funktion  $v$  der Form  $v = u + w$ , d.h.  $0 = \Delta v = \Delta u + \Delta w = -f(u, x) + \Delta w = 1 + \Delta w$ . Somit suchen wir nun eine Funktion  $w$  mit  $\Delta w = -1$ . Eine Lösung dieser PDE erhalten wir beispielsweise mit  $w(x) = -\frac{1}{2n}|x|^2 = -\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^n x_i^2$ .

Wenden wir das Maximumsprinzip auf  $v$  an, dann nimmt damit  $v$  sein Maximum in einem  $x_0 \in \partial U$  an. Aufgrund der Randwertbedingung gilt dort  $u \equiv 0$ . Wir betrachten oBdA den Randpunkt  $x_0 = (a, 0, \dots, 0) \in \partial U$ . Dieser minimiert  $\sum_{i=1}^n x_i^2$ , da jeder andere Randpunkt auch mindestens eine Koordinate  $j \in \{1, \dots, n\}$  mit  $x_j = \pm a$  besitzt. Somit gilt dann schlussendlich

$$u(0) = v(0) - w(0) = v(0) \leq \max_{x \in U} v(x) \leq \max_{x \in \partial U} (u(x) + w(x)) \leq w(x_0) = -\frac{1}{2n}a^2$$

Analog liefert das Minimumsprinzip die Existenz des Minimum in  $x_0 \in \partial U$ . Nach Randwertbedingung gilt dort wieder  $u(x_0) = 0$ . Die Funktion  $w$  wird auf dem Rand minimiert durch den Punkt  $x_0 = (a, \dots, a) \in \partial U$  mit Minimalwert  $w(x_0) = -\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^n a^2 = -\frac{1}{2}a^2$ . Analog zu oben gilt nun

$$u(0) = v(0) - w(0) = v(0) \geq \min_{x \in U} v(x) \geq \min_{x \in \partial U} (u(x) + w(x)) \geq w(x_0) = -\frac{1}{2}a^2$$

Somit ist schließlich  $-\frac{1}{2}a^2 \leq u(0) \leq -\frac{1}{2n}a^2$ .

(zu c) Sei  $U = B_1(0)$  und  $f(u, x) = h(x)$  für  $g, h \in C^1(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ . Gemäß Hinweis betrachten wir  $u - v$  mit  $v(x) := \max_{\partial B_1(0)} |g| + (e^{-e^{x_1+1}}) \cdot \max_{\overline{B_1(0)}} |h|$ . Es ist  $\Delta v(x) = -e^{x_1+1} \cdot \max_{\overline{B_1(0)}} |h| \leq -\max_{\overline{B_1(0)}} |h|$ . Somit ist

$$-\Delta(u-v)(x) = -\Delta u(x) + \Delta v(x) = f(u, x) - \Delta v(x) \leq h(x) - \max_{\overline{B_1(0)}} |h| \leq 0 \quad \forall x \in B_1(0)$$

Damit ist  $u - v$  subharmonisch und mit dem Maximumsprinzip gilt auch hier, dass das Maximum in einem  $x_0 \in \partial B_1(0)$  angenommen wird. Dementsprechend gilt

$$\max_{\overline{B_1(0)}} (u - v) \leq \max_{\partial B_1(0)} (u - v) \leq \max_{\partial B_1(0)} u + \max_{\partial B_1(0)} (-v) = \max_{\partial B_1(0)} |g| - \max_{\partial B_1(0)} |g| = 0$$

sowie daraus folgend

$$\begin{aligned} \max_{\overline{B_1(0)}} u &\leq \max_{\overline{B_1(0)}} (u - v) + \max_{\overline{B_1(0)}} v = \max_{\overline{B_1(0)}} v \\ &= \max_{\partial B_1(0)} |g| + \max_{\overline{B_1(0)}} |h| \cdot \max_{\overline{B_1(0)}} (e^2 - e^{x_1+1}) \\ &= \max_{\partial B_1(0)} |g| + (e^2 - \underbrace{e^0}_{=1}) \cdot \max_{\overline{B_1(0)}} |h| \end{aligned}$$

Die gleiche Rechnung funktioniert auch mit  $-u$  bzw.  $f(u, x) = -h(x)$ , sodass  $c := e^2 - 1$  vollständig unabhängig ist.

**Aufgabe 15.** Für  $t > 0$  ist die Fundamentallösung der Wärmeleitungsgleichung auf  $\mathbb{R}^n$  gegeben durch  $u(x, t) = (ct)^{-n/2} e^{-\frac{|x|^2}{4t}}$  mit einer Konstante  $c > 0$ . Zeigen Sie:

- (a)  $u_t = \Delta u$  auf  $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+$ .
- (b)  $\lim_{t \rightarrow 0+} u(x, t) = 0$  für  $x \neq 0$ ,  $\lim_{t \rightarrow 0+} u(0, t) = \infty$  und  $\lim_{t \rightarrow \infty} u(x, t) = 0$ .
- (c)  $\int_{\mathbb{R}^n} u(x, t) dx = 1$  für alle  $t > 0$  und  $c = 4\pi$ .

(zu a) Es sei  $u(x, t) = (ct)^{-\frac{n}{2}} \cdot e^{-\frac{|x|^2}{4t}}$ . Dann ist

$$\begin{aligned}
 u_t(x, t) &= c^{-\frac{n}{2}} \left( -\frac{n}{2} \right) t^{-\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} + (ct)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \cdot \frac{4|x|^2}{16t^2} \\
 &= (ct)^{-\frac{n}{2}} \cdot e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \cdot \left( -\frac{n}{2} t^{-1} + \frac{|x|^2}{4t^2} \right) \\
 &= (ct)^{-\frac{n}{2}} \cdot e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \cdot \left( \frac{|x|^2 - 2nt}{4t^2} \right) \\
 u_{x_i}(x, t) &= (ct)^{-\frac{n}{2}} \cdot e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \cdot \left( -\frac{2x_i}{4t} \right) = -(ct)^{-\frac{n}{2}} \cdot e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \cdot \frac{x_i}{2t} \\
 u_{x_i x_i}(x) &= (ct)^{-\frac{n}{2}} \left( e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \cdot \frac{x_i}{2t} \cdot \frac{x_i}{2t} - \frac{1}{2t} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \right) \\
 &= (ct)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \left( \frac{x_i^2}{4t^2} - \frac{1}{2t} \right) \\
 \Delta_x u(x, t) &= \sum_{i=1}^n x_{x_i x_i}(x) = (ct)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \left( \frac{1}{4t^2} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{n}{2t} \right) \\
 &= \sum_{i=1}^n x_{x_i x_i}(x) = (ct)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \left( \frac{|x|^2 - 2nt}{4t^2} \right)
 \end{aligned}$$

Somit gilt also  $u_t = \Delta u$  auf  $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+$ .

- (zu b) ■ Sei  $t_k \rightarrow 0+$  für  $k \rightarrow \infty$  und  $x \neq 0$ .
- Sei  $t_k \rightarrow 0+$  für  $k \rightarrow \infty$ . Dann ist

$$\lim_{t \rightarrow 0+} u(0, t) = \lim_{k \rightarrow \infty} (c t_k)^{-\frac{n}{2}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{(c t_k)^{\frac{n}{2}}} = \infty$$

- Sei nun  $t_k \rightarrow \infty$  für  $k \rightarrow \infty$ . Dann ist

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (c t)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{(c t_k)^{\frac{n}{2}}} \cdot \exp \left( \lim_{k \rightarrow \infty} -\frac{|x|^2}{4t_k} \right) = 0 \cdot 1 = 0$$

(zu c) Wir wollen die Substitution  $y_i = \frac{x_i}{2\sqrt{t}}$  verwenden. Dabei ist  $\frac{d}{dx_i}y_i = \frac{1}{2\sqrt{t}}$ . Es gilt

$$\begin{aligned}
 \int_{\mathbb{R}^n} (ct)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \, dx &= (ct)^{-\frac{n}{2}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} \, dx \\
 &= (ct)^{-\frac{n}{2}} \int_{\mathbb{R}} \cdots \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{x_1^2 + \cdots + x_n^2}{4t}} \, dx_1 \dots dx_n \\
 &= (ct)^{-\frac{n}{2}} \int_{\mathbb{R}} \cdots \int_{\mathbb{R}} \prod_{i=1}^n e^{-\frac{x_i^2}{4t}} \, dx_1 \dots dx_n \\
 &= (4\pi t)^{-\frac{n}{2}} \prod_{i=1}^n \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{x_i^2}{4t}} \, dx_i \\
 &= \pi^{-\frac{n}{2}} \prod_{i=1}^n \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{x_i^2}{4t}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{t}} \, dx_i \\
 &\stackrel{\text{subst.}}{=} \pi^{-\frac{n}{2}} \prod_{i=1}^n \int_{\mathbb{R}} e^{-y_i^2} \, dy_i \\
 &= \prod_{i=1}^n \underbrace{\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{-y_i^2} \, dy_i}_{=1} \\
 &= 1
 \end{aligned}$$