Zusammenfassung Partielle DGLn

Tim Baumann, http://timbaumann.info/uni-spicker

1. Einleitung

Def. Eine **partielle Differentialgleichung** (PDGL) hat die Form

$$E(x, u(x), Du(x), ..., D^k u(x)) = 0 \quad \text{in } \Omega \subset \mathbb{R}^n \text{ offen}, \qquad (\star)$$

wobei $E : \Omega \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times ... \times \mathbb{R}^{n^k} \to \mathbb{R}$ gegeben und $u : \Omega \to \mathbb{R}$ gesucht ist. Die höchste Ableitungsordnung von u, die in E vorkommt, heißt **Ordnung** der PDGL.

Def. Eine PDGL von der Ordnung k heißt

- **linear**, falls sie folgende Form besitzt:
$$\sum_{|\alpha| \leq k} a_\alpha(x) D^\alpha u(x) - f(x) = 0$$
- **semilinear**, falls sie linear in der höchsten Ableitungsordnung ist, man sie also schreiben kann als
$$\sum_{|\alpha|=k} a_\alpha(x) D^\alpha u(x) + E_{k-1}(x, u(x), Du(x), ..., D^{k-1}u(x)) = 0.$$
- **quasilinear**, falls sie sich schreiben lässt als
$$\sum_{|\alpha|=k} a_\alpha(x, u(x), Du(x), ..., D^{k-1}u(x)) D^\alpha u(x) + E_{k-1}(x, u(x), Du(x), ..., D^{k-1}u(x)) = 0.$$
- sonst **voll nichtlinear**.

Bemerkung. $\{$ lineare PDGLn $\} \subsetneq \{$ semilineare PDGLn $\} \subsetneq \{$ quasilineare PDGLn $\} \subsetneq \{$ PDGLn $\}$

Def (Typeinteilung für lineare PDGLn 2. Ordnung)**.** Seien $a_{ij}, b_i, c, f : \Omega \to \mathbb{R}$ $(i, j \in \{1, ..., n\})$ vorgegebene Fktn. auf $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen.

- Die lineare PDGL
$$\sum_{1 \leq i,j \leq n} a_{ij}(x) D_i D_j u(x) + \sum_{1 \leq j \leq n} b_j(x) D_j u(x) + c(x)u(x) + f(x) = 0$$
heißt **elliptisch**, falls die $(n \times n)$-Matrix $(a_{ij})_{1 \leq i,j \leq n}$ für alle $x \in \Omega$ positiv definit ist.
- Die lineare PDGL
$$D_1 D_1 u(x) - \sum_{2 \leq i,j \leq n} a_j(x) D_i D_j u(x) + \sum_{1 \leq i \leq n} b_i(x) D_i u(x) + c(x)u(x) + f(x) = 0$$
heißt **hyperbolisch**, falls die $(n-1) \times (n-1)$-Matrix $(a_{ij})_{2 \leq i,j \leq n}$ für alle $x \in \Omega$ positiv definit ist.
- Die lineare PDGL
$$D_1 u(x) - \sum_{2 \leq i,j \leq n} a_{ij}(x) D_i D_j u(x) + \sum_{2 \leq i \leq n} b_i(x) D_i u(x) + c(x)u(x) + f(x) = 0$$
heißt **parabolisch**, falls die $(n-1) \times (n-1)$-Matrix $(a_{ij})_{2 \leq i,j \leq n}$ für alle $x \in \Omega$ positiv definit ist.

Def. Eine Funktion $u : \Omega \to \mathbb{R}$ heißt **klassische Lösung**, falls $u \in \mathcal{C}^k(\Omega)$ und die Differentialgleichung $(\star)$ überall in Ω erfüllt ist.

Grundlagen

Notation. Für $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ schreibe

$$V \Subset \Omega \quad \text{für} \quad V \subset \mathbb{R}^n \text{ mit } \overline{V} \text{ kompakt und } \overline{V} \subset \Omega^\circ.$$

Notation. Seien $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ und $F = (F_1, ..., F_n)^T : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ Funktionen. Dann heißt

- $\operatorname{div} F \coloneqq \sum_{i=1}^n D_i F_i : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ **Divergenz** von F,
- $\operatorname{grad} f \coloneqq \nabla f \coloneqq (\partial_1 f, ..., \partial_n f)^T : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ **Gradient** von f,
- Δ mit $\Delta f = \operatorname{div}(\operatorname{grad} f) = \sum_{i=1}^n D_i D_i f$ **Laplace-Operator**.

Satz (Transformationssatz)**.** Sei $T : \Omega \to T(\Omega)$ für $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein $\mathcal{C}^1$-Diffeo, dann gilt für $f : T(\Omega) \to \overline{\mathbb{R}}$

$$f \in L^1(T(\Omega)) \iff (f \circ T) \circ |\det(DT)| \in L^1(\Omega) \quad \text{mit}$$

$$\int_{T(\Omega)} f \,\mathrm{d}x = \int_\Omega (f \circ T) \cdot |\det(DT)| \,\mathrm{d}x.$$

Bsp (Polarkoordinaten)**.** Sei $f \in L^1(B_r(K))$. Dann ist f auf fast jeder Sphäre $\partial B_\rho(K)$ für $\rho \in [0, r]$ integrierbar und es gilt

$$\int_{B_r(x)} f(x) \,\mathrm{d}x = \int_0^r \int_{\partial B_\rho(x_0)} f \,\mathrm{d}S \,\mathrm{d}\rho$$

Satz (Gauß)**.** Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt, offen mit $\mathcal{C}^1$-Rand $\partial\Omega$. Ist $F \in \mathcal{C}^0(\overline{\Omega}, \mathbb{R}^n) \cap \mathcal{C}^1(\Omega, \mathbb{R}^n)$ mit $\operatorname{div} F \in L^1(\Omega)$, so gilt

$$\int_\Omega \operatorname{div} F \,\mathrm{d}x = \int_{\partial\Omega} (F \circ \nu) \,\mathrm{d}S,$$

wobei ν der äußere Einheitsnormalenvektor ist.

Korollar. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt, offen mit $\mathcal{C}^1$-Rand $\partial\Omega$. Sind $f, g \in \mathcal{C}^1(\overline{\Omega})$, dann gilt die partielle Integrationsregel

$$\int_\Omega D_i f g \,\mathrm{d}x = -\int_\Omega f D_i g \,\mathrm{d}x + \int_{\partial\Omega} f g \nu^i \,\mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}$$

Sind $f, g \in \mathcal{C}^2(\overline{\Omega})$, dann gelten die Greenschen Formeln

$$\int_\Omega Df \cdot Dg \,\mathrm{d}x = -\int_\Omega f \Delta g \,\mathrm{d}x + \int_\Omega f D_\nu g \,\mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}$$

$$\int_\Omega (f \Delta g - g \Delta f) \,\mathrm{d}x = \int_{\partial\Omega} (f D_\nu g - g D_\nu f) \,\mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}$$

Proposition (Diff. parameterabh. Integrale)**.** Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ messbar mit $|\Omega| < \infty$, $I = (a, b) \subset \mathbb{R}$ und $f : \Omega \times I \to \mathbb{R}$. Angenommen,

- $f(x, -) \in \mathcal{C}^1(I)$ für fast alle $x \in \Omega$,
- $f(-, t) \in L^1(\Omega) \frac{\partial f}{\partial t}(-, t) \in L^1(\Omega)$ für alle $t \in I$ und
- für alle $t \in I$ gibt es $\epsilon > 0$ sodass $(t - \epsilon, t + \epsilon) \subset I$ und
$$\sup_{s \in (t-\epsilon, t+\epsilon)} |\tfrac{\partial f}{\partial t}(-, s)| \in L^1(\Omega).$$

Dann ist die Abbildung

$$g : I \to \mathbb{R}, \qquad t \mapsto \int_\Omega f(x, t) \,\mathrm{d}x$$

wohldefiniert und stetig differenzierbar mit

$$\tfrac{\partial g}{\partial t}(t) = \int_\Omega \tfrac{\partial f}{\partial t}(x, t) \,\mathrm{d}x.$$

Bemerkung. Die Voraussetzungen sind erfüllt, wenn Ω offen und beschränkt ist, $f(x, -) \in \mathcal{C}^1(I)$ für alle $x \in \Omega$ und $f, \frac{\partial f}{\partial t} \in \mathcal{C}(\overline{\Omega} \times I)$.

Notation. Bezeichne mit $\mathcal{L}^n$ das Lebesgue-Maß auf dem $\mathbb{R}^n$. Für messbare Teilmengen $A \subset \mathbb{R}^n$ schreibe $|A| \coloneqq \mathcal{L}^n(A)$.

Bsp. Zwischen dem Volumen von Kugeln und Sphären im $\mathbb{R}^n$ bestehen folgende Zusammenhänge:

$$|B_r(0)| = r^n \cdot |B_1(0)| \quad \text{und} \quad |B_r(0)| = \tfrac{r}{n} \cdot \int_{\partial B_r(0)} 1 \,\mathrm{d}S$$

Notation. $\omega_n \coloneqq \mathcal{L}^n(B_1(0)) = \dfrac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2} + 1)}$

Notation. Sei $f : \Omega/M \to \mathbb{R}$ integrierbar für $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ messbar mit $\mathcal{L}^k(\Omega) \in (0, \infty)$ bzw. $M \subset \mathbb{R}^n$ eine k-dimensionale Untermannigfaltigkeit mit $\int_M 1 \,\mathrm{d}S \in (0, \infty)$

$$\fint_\Omega f(x) \,\mathrm{d}x \coloneqq \tfrac{1}{|\Omega|} \int_\Omega f(x) \,\mathrm{d}x \quad \text{bzw.} \quad \fint_M f(x) \,\mathrm{d}x \coloneqq \tfrac{1}{|M|} \int_M f(x) \,\mathrm{d}x$$

heißen **Mittelwerte** von f auf Ω bzw. M.

Funktionenräume

Def. Eine Funktion $f : S \to \mathbb{R}$, $S \subset \mathbb{R}^n$ heißt (lokal) **Hölder-stetig** in $x_0 \in S$ zum Exponenten $\alpha \in (0, 1]$ mit Hölderkonstante $C_{x_0} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, falls für alle $x \in S$ (bzw. $x \in K$ für ein $K \Subset S$) gilt:

$$|f(x) - f(x_0)| \leq C_{x_0} |x - x_0|^\alpha$$

Def. Die **Hölder-Seminorm** von $f : S \to \mathbb{R}$ ist

$$[f]_{\mathcal{C}^{0,\alpha}(S)} \coloneqq \sup_{x, x_0 \in S} \frac{|f(x_0) - f(x)|}{|x - x_0|^\alpha}.$$

Def (**Hölder-Räume**)**.** Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $\alpha \in (0, 1]$.

- $\mathcal{C}^{0,\alpha}(\Omega) \coloneqq \{f \in \mathcal{C}(\Omega) \mid [f]_{\mathcal{C}^{0,\alpha}(K)} < \infty$ für alle komp. $K \Subset S\}$
- $\mathcal{C}^{0,\alpha}(\overline{\Omega}) \coloneqq \{f \in \mathcal{C}(\overline{\Omega}) \mid [f]_{\mathcal{C}^{0,\alpha}(\overline{\Omega})} < \infty\}$.
- $\mathcal{C}^{k,\alpha}(\Omega) \coloneqq \{f \in \mathcal{C}^k(\Omega) \mid [D^\beta f]_{\mathcal{C}^{0,\alpha}(K)} < \infty$ für alle kompakten $K \Subset \Omega$ und Multiindizes β mit $|\beta| = k\}$
- $\mathcal{C}^{k,\alpha}(\overline{\Omega}) \coloneqq \{f \in \mathcal{C}^k(\overline{\Omega}) \mid$ alle Ableitungen bis zur Ordnung k von f sind beschränkt und $[D^\beta f]_{\mathcal{C}^{0,\alpha}(\overline{\Omega})} < \infty$ für alle Multiindizes β mit $|\beta| = k\}$

Bemerkung. Es gelten die Inklusionen $\mathcal{C}(\Omega) \supsetneq \mathcal{C}^{0,\alpha}(\Omega) \supsetneq \mathcal{C}^1(\Omega)$, aber i. A. $\mathcal{C}^1(\overline{\Omega}) \not\subset \mathcal{C}^{0,1}(\overline{\Omega})$.

Bemerkung. Die Räume $\mathcal{C}^k(\overline{\Omega})$ und $\mathcal{C}^{k,\alpha}$ sind Banachräume bzgl.

$$\|f\|_{\mathcal{C}^k(\overline{\Omega})} := \sum_{0\leq|\beta|\leq k} \sup_{\overline{\Omega}}|D^\beta f|,$$
$$\|f\|_{\mathcal{C}^{k,\alpha}(\overline{\Omega})} := \|f\|_{\mathcal{C}^k(\overline{\Omega})} + \sum_{|\beta|=k} [D^\beta f]_{\mathcal{C}^{0,\alpha}(\overline{\Omega})}.$$

Def. Sei $A \subseteq \mathbb{R}^n$ messbar und $p \in [1,\infty]$. Für $f : A \to I$ messbar sei

$$\|f\|_{L^p(A)} := \begin{cases} \left(\int_A |f|^p \, \mathrm{d}\right)^{1/p} & \text{falls } p < \infty, \\ \operatorname{ess\,sup}_A |f| & \text{falls } p = \infty. \end{cases}$$

Der **Lebesgue-Raum** $L^p(A)$ ist der Raum aller Äquivalenzklassen von fast-überall übereinstimmenden Funktionen, für die $\|-\|_{L^p(A)}$ endlich ist. Der Raum $L^p_{\mathrm{loc}}(A)$ ist der Raum aller Funktionen $A \to \mathbb{R}^n$, die für alle offenen $O \Subset A$ zu $L^p(O)$ gehören.

Bemerkung. $L^p(A)$ ist ein Banachraum mit der Norm $\|-\|_{L^p(A)}$.

Glättungen

Def. Ein **Glättungskern** auf $\mathbb{R}^n$ ist eine nicht-negative, radialsymmetrische Funktion $\eta \in \mathcal{C}_0^\infty(B_1(0))$ mit $\int_{\mathbb{R}^n} \eta \, \mathrm{d}x = 1$.

Def. Der **Standardglättungskern** ist die Funktion

$$\eta(x) := C \cdot \exp\left(\frac{1}{|x|^2 - 1}\right) \cdot \mathbb{1}_{B_1(0)}(x)$$

mit Normierungskonstante C. Für $\epsilon > 0$ ist der dazugehörige skalierte Glättungskern gegeben durch

$$\eta_\epsilon(x) := \epsilon^{-n}\eta(x/\eta).$$

Alle Glättungskern-Eigenschaften bleiben bei Skalierung erhalten.

Notation. $\Omega_\epsilon := \{x \in \Omega \mid \operatorname{dist}(x, \partial\Omega) > \epsilon\}$

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $\epsilon > 0$. Für $f \in L^1_{\mathrm{loc}}$ heißt die Funktion

$f_\epsilon : \Omega_\epsilon \to \mathbb{R}, \quad x \mapsto \eta_\epsilon * f(x) := \int_{B_\epsilon(x)} \eta_\epsilon(x-y) f(y) \, \mathrm{d}y$ **ϵ-Glättung** von f

Satz (Eigenschaften von Glättungen). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $\epsilon > 0$ und $f \in L^1_{\mathrm{loc}}(\Omega)$. Dann gilt

- Regularität: $f_\epsilon \in \mathcal{C}^\infty(\Omega_\epsilon)$ mit $D^\alpha f_\epsilon = (D^\alpha \eta_\epsilon) * f$ für beliebige Multiindizes $\alpha \in \mathbb{N}^n$.
- Ist $D_i f$ stetig auf Ω, so gilt $D_i(f_\epsilon) = (D_i f)_\epsilon$ auf Ω_ϵ.
- Falls $f \in \mathcal{C}^\alpha(\Omega)$ für ein $\alpha \in (0,1]$, so gilt $f_\epsilon \in \mathcal{C}^\alpha(\Omega_\epsilon)$ mit derselben Hölderkonstante.
- Falls $f \in L^p(\Omega)$ für $p \in [0,\infty]$, so gilt $\|f_\epsilon\|_{L^p(\Omega_\epsilon)} \leq \|f\|_{L^p(\Omega)}$.
- $f_\epsilon \xrightarrow{\epsilon\to 0} f$ fast-überall in Ω.
- Falls $f \in \mathcal{C}(\Omega)$, so konvergiert f_ϵ gleichmäßig gegen f für $\epsilon \to 0$ auf kompakten Teilmengen von Ω,
- Falls $f \in L^p_{\mathrm{loc}}(\Omega)$ für $p \in [1,\infty)$, so gilt $f_\epsilon \xrightarrow{\epsilon\to 0} f$ in $L^p_{\mathrm{loc}}(\Omega)$.
- Abschätzung der Approximationsgüte: Ist $Du \in L^p(\Omega)$, so gilt
$$\|f - f_\epsilon\|_{L^p(\Omega_\epsilon)} \leq \epsilon \cdot \|Df\|_{L^p\Omega}.$$

Hausdorff-Maß

Def. Sei $A \subset \mathbb{R}^n$, $k \in [0,\infty)$, $\delta > 0$. Das **approximierende Maß** H^k_δ von A ist definiert als

$$\mathcal{H}^k_\delta(A) := \inf\{\sum_{i=1}^\infty \omega_k r_i^k \mid A \subset \bigcup_{i=1}^\infty \overline{B_{r_i}(x_i)}, r_i < \delta\}$$

Bemerkung. $\mathcal{H}^k_\delta(A)$ ist monoton fallend in δ.

Def. Das **k-dimensionale Hausdorff-Maß** $\mathcal{H}^k$ von A ist

$$\mathcal{H}^k(A) := \lim_{\delta\to 0} \mathcal{H}^k_\delta(A).$$

Proposition.
- Für $\delta > 0$ ist $\mathcal{H}^k_\delta$ ein Maß auf $\mathbb{R}^n$.
- $\mathcal{H}^k$ ist ein Maß auf $\mathbb{R}^n$
- Bewegungsinvarianz: $\mathcal{H}^k(x + T(A)) = \mathcal{H}^k(A)$ für $x \in \mathbb{R}^n$, $T \in O(n)$.
- Ist $f : A \to \mathbb{R}^m$ Lipschitz-stetig mit Konstante L_f, so gilt
$$\mathcal{H}^k(f(A)) \leq L_f^k \mathcal{H}^k(A).$$
- Skalierungsverhalten: $\mathcal{H}^k(\lambda A) = \lambda^k \mathcal{H}^k(A)$
- Spezialfälle: $\mathcal{H}^0$ ist ein Zählmaß, $\mathcal{H}^n = \mathcal{L}^n$ und $\mathcal{H}^k \equiv 0$.

Lemma. Sei $A \subset \mathbb{R}^n$ und $0 \leq k < k' < \infty$.

- Ist $\mathcal{H}^k(A) < \infty$, so gilt $\mathcal{H}^{k'}(A) = 0$.
- Ist $\mathcal{H}^{k'}(A) > 0$, so gilt $\mathcal{H}^k(A) = \infty$.

Def. Die **Hausdorff-Dimension** von $A \subset \mathbb{R}^n$ ist

$$\begin{aligned} \dim_H(A) &:= \inf\{k \in \mathbb{R}_{\geq 0} \mid \mathcal{H}^k(A) = 0\} \\ &= \sup\{k \in \mathbb{R}_{\geq 0} \mid \mathcal{H}^k(A) = \infty\}. \end{aligned}$$

Proposition. Für die Cantor-Menge $C \subset \mathbb{R}$ gilt $\dim_H(C) = \dfrac{\log 2}{\log 3}$.

2. Laplace- und Poisson-Gleichung

Def. Die **Laplace-** bzw. **Poisson-Gleichung** ist die Gleichung

$$\Delta u = 0 \quad \text{bzw.} \quad \Delta u = f \qquad \text{auf } \Omega \subset \mathbb{R}^n.$$

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $u \in \mathcal{C}^2(\Omega)$. Man nennt u

- **harmonisch**, falls $\Delta u = 0$ in Ω gilt.
- **subharmonisch**, falls $\Delta u \geq 0$ in Ω gilt.
- **superharmonisch**, falls $\Delta u \leq 0$ in Ω gilt.

Bspe.
- Affine Funktionen sind harmonisch.
- Sei $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$. Definiere $u(x) := x \cdot Ax$. Dann gilt $\Delta u = \operatorname{spur} A$, also $\Delta u = 0 \iff \operatorname{spur} A = 0$.
- Real- und Imaginärteil von holomorphen Fktn. sind harmonisch.

Def. Die Funktion $\Phi : \mathbb{R}^n \setminus \{0\} \to \mathbb{R}$, definiert durch

$$\Phi(x) := \begin{cases} -(2\pi)^{-1} \log|x|, & \text{wenn } n = 2 \\ (n(n-2)\,\omega_n)^{-1}|x|^{2-n}, & \text{wenn } n \geq 3 \end{cases}$$

heißt **Fundamentallösung** der Laplacegleichung.

Bemerkung.
- Φ ist radialsymmetrisch, d. h. für alle $x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ mit $\|x_1\| = \|x_2\|$ gilt $\Phi(x_1) = \Phi(x_2)$.
- Φ, $|D\Phi| \in L^1(B_R(0))$ für alle $R > 0$ aber $|D^2\phi| \notin L^1(B_1(0))$.
- Die Konstanten wurden so gewählt, dass gilt:
$$-\int_{\partial B_r(0)} D\Phi \cdot \nu \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1} = 1 \quad \text{für alle } r > 0.$$

Lemma. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $B_R(x_0) \subset \Omega$, $u \in \mathcal{C}^2(\Omega)$. Für

$$\phi : (0,R) \to \mathbb{R}, \quad r \mapsto \fint_{\partial B_r(x_0)} u \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1} \qquad \text{gilt dann}$$

- $\lim_{r\to 0} \phi(r) = u(x_0)$
- $\phi'(r) = \frac{r}{n} \fint_{B_r(x_0)} \Delta u(x) \, \mathrm{d}x$

Korollar (Mittelwertseigenschaft). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $B_r(x_0) \Subset \Omega$ und $u \in \mathcal{C}^2(\Omega)$. Dann gilt:

$$0 = \Delta u \implies u(x_0) = \fint_{\partial B_r(x_0)} u \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1} \quad \text{und} \quad u(x_0) = \fint_{B_r(x_0)} u \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}$$

In diesen Gleichungen darf man $=$ durch $\leq$, $<$, $\geq$ oder $>$ ersetzen.

Satz. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen. Dann sind äquivalent:

- u ist harmonisch, d. h. es gilt $\Delta u = 0$ in Ω.
- u erfüllt die sphärische Mittelwertseigenschaft, d. h. es gilt
$$u(x_0) = \fint_{\partial B_r(x_0)} u \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1} \qquad \text{für alle Kugeln } B_r(x_0) \Subset \Omega.$$
- u erfüllt die Mittelwertseigenschaft auf Kugeln, d. h. es gilt
$$u(x_0) = \fint_{B_r(x_0)} u \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1} \qquad \text{für alle Kugeln } B_r(x_0) \Subset \Omega.$$

Bemerkung. Die Äquivalenz gilt auch unter den schwächeren Voraussetzungen $u \in \mathcal{C}(\Omega)$ oder $u \in L^1(\Omega)$.

Satz. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt und $u \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}^0(\overline{\Omega})$ subharmonisch in Ω, d. h. $\Delta u \geq 0$ in Ω. Dann gilt

- Das **schwache Maximumsprinzip**: $\max_{\overline{\Omega}} u = \max_{\partial\Omega} u$
- Das **starke Maximumsprinzip**: Ist Ω zusammenhängend und existiert $x_0 \in \Omega$ mit $u(x_0) = \max_{\overline{\Omega}} u$, so ist u konstant.

Bemerkung. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt, offen, zusammenhängend und $u \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$ harmonisch. Dann gilt

$$\min_{\partial\Omega} u < \max_{\partial\Omega} u \implies \min_{\partial\Omega} u < u < \max_{\partial\Omega} u \text{ auf } \Omega.$$

Korollar (Eindeutigkeit). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt und $u, v \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$. Dann ist $u = v$, falls gilt:

$$\begin{cases} \Delta u = \Delta v & \text{in } \Omega \\ u = v & \text{auf } \partial\Omega \end{cases}$$

Bemerkung (Stetige Abhängigkeit von Randwerten). Gilt lediglich $\Delta u = \Delta v$ in Ω, aber nicht $u = v$ auf $\partial\Omega$, so gilt immerhin

$$\max_{\overline{\Omega}} |u-v| = \max_{\partial\Omega}|u-v|.$$

Satz (Harnack-Ungleichung). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $V \Subset \Omega$ offen, zusammenhängend. Dann gibt es eine Konstante $c = c(\Omega, V)$, sodass

$$\sup_V u \le c\cdot \inf_V u \qquad \text{für alle harmonischen Fktn. } u:\Omega\to\mathbb{R}_{\ge 0}.$$

Satz. Sei $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen und erfülle $u\in\mathcal{C}(\Omega)$ die Mittelwert-Eigenschaft auf Sphären, d. h.

$$u(x_0) = \fint_{\partial B_r(x_0)} u \, d\mathcal{H}^{n-1} \qquad \text{für alle Kugeln } B_r(x_0)\Subset\Omega.$$

Dann gilt $u(x) = u_\epsilon(x)$ für alle $x\in\Omega$ und $\epsilon < \mathrm{dist}(x,\partial\Omega)$. Insbesondere ist $u\in\mathcal{C}^\infty(\Omega)$ und harmonisch.

Korollar. Obiger Satz gilt auch, wenn $u \in \mathcal{C}(\Omega)$ die Mittelwert-Eigenschaft auf Kugeln erfüllt, d. h.

$$u(x_0) = \fint_{B_r(x_0)} u \, d\mathcal{H}^{n-1} \qquad \text{für alle Kugeln } B_r(x_0)\Subset\Omega.$$

Def. Eine Folge von Funktionen $(f_n)_{n\in\mathbb{N}}$ auf einem topologischen Raum X **konvergiert lokal gleichmäßig** gegen $f: X\to\mathbb{R}$, falls es zu jedem Punkt $x\in X$ eine Umgebung U_x von x gibt, sodass f_n auf U_x gleichmäßig gegen f konvergiert.

Korollar (Konvergenzsatz von Weierstraß). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, zusammenhängend und $(u_k)_{k\in\mathbb{N}}$ eine Folge harmonischer Funktionen auf Ω, die lokal gleichmäßig gegen eine Funktion u konvergiert. Dann ist u harmonisch auf Ω.

Korollar (Harnackscher Konvergenzsatz). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und $(u_k)_{k\in\mathbb{N}}$ eine monoton wachsende Folge harmonischer Funktionen auf Ω. Gibt es ein $x_0 \in \Omega$, sodass $(u_k(x_0))_{k\in\mathbb{N}}$ beschränkt (und damit konvergent) ist, so konvergiert (u_k) lokal gleichmäßig gegen eine harmonische Funktion auf Ω.

Satz (von Hermann Weyl). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und $u \in L^1_{\mathrm{loc}}(\Omega)$ mit

$$\int_\Omega u\cdot\Delta\phi\,dx = 0 \qquad \text{für alle } \phi\in\mathcal{C}_0^\infty(\Omega).$$

Dann gibt es eine harmonische Funktion $\tilde u:\Omega\to\mathbb{R}$ mit $u(x)=\tilde u(x)$ für fast alle $x\in\Omega$.

Satz (Innere Abschätzung für Ableitungen harmonischer Fktn). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und $u\in\mathcal{C}^2(\Omega)$ harmonisch. Dann gilt für jeden Multiindex α mit $|\alpha| = k\in\mathbb{N}_0$ und jede Kugel $B_r(x_0)\Subset\Omega$:

$$|D^\alpha u(x_0)| \le C(n,k) r^{-n-k}\|u\|_{L^1(B_r(x_0))} \qquad \text{mit } C(n,k) := \frac{(2^{n+1}nk)^k}{\omega_n}.$$

Satz (Liouville). Sei $u\in\mathcal{C}^2(\Omega)$ harmonisch.

- Ist u beschränkt, so ist u konstant.
- Gilt $\limsup_{|x|\to\infty} \frac{|u(x)|}{|x|^{k+1}} = 0$, so ist u ein Polynom, dessen Grad $\le k$ ist.

Def. Sei $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen. Eine Funktion $f:\Omega\to\mathbb{R}$ heißt **analytisch** in $x\in\Omega$, falls f sich lokal durch ihre Taylorreihe darstellen lässt, also ein $r\in(0,\mathrm{dist}(x,\partial\Omega))$ existiert mit

$$f(y) = \sum_{\alpha\in\mathbb{N}^n}\frac{1}{\alpha!}D^\alpha f(x)(y-x)^\alpha \qquad \text{für alle } y\in B_r(x).$$

Satz. Sei $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen und $u\in\mathcal{C}^2(\Omega)$. Wenn u harmonisch ist, dann auch analytisch.

Problem. Sei $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen, (beschränkt), regulär und $f:\Omega\to\mathbb{R}$ und $g:\partial\Omega\to\mathbb{R}$ stetig. Gesucht ist $u:\overline\Omega\to\mathbb{R}$ mit

$$(2.1)\begin{cases} -\Delta u = f & \text{in } \Omega\subset\mathbb{R}^n,\\ u = g & \text{auf }\partial\Omega.\end{cases}$$

Satz (Greensche Darstellungsformel). Sei $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ beschränkt, offen mit $\mathcal{C}^1$-Rand und $h\in\mathcal{C}^2(\Omega)\cap\mathcal{C}^1(\overline\Omega)$ mit $\Delta h\in L^1(\Omega)$. Es gilt für $x\in\Omega$:

$$h(x) = -\int_\Omega \Phi(x-y)\Delta h(y)\,dy + \int_{\partial\Omega}\Phi(x-y)\cdot Dh(y)\cdot\nu\,dS(y) - \int_{\partial\Omega} h(y)D_y\Phi(x-y)\cdot\nu\,dS(y)$$

Bemerkung. Für Randpunkte $x\in\partial\Omega$ gilt:

$$\frac12 h(x) = -\int_\Omega \Phi(x-y)\Delta h(y)\,dy + \int_{\partial\Omega}\Phi(x-y)\cdot Dh(y)\cdot\nu\,dS(y) - \int_{\partial\Omega} h(y)D_y\Phi(x-y)\cdot\nu\,dS(y)$$

Korollar (Darstellungsformel für Lsgn in $\mathbb{R}^n$). Sei $f\in\mathcal{C}_0^2(\mathbb{R}^n)$, setze

$$u:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R},\qquad x\mapsto(\Phi*f)(x) := \int_{\mathbb{R}^n}\Phi(x-y)f(y)\,dy.$$

Dann gilt: $u\in\mathcal{C}^2(\mathbb{R}^n)$ und $-\Delta u = f$ in $\mathbb{R}^n$.

Bemerkung.
- Für $n=2$ ist die Lösung potentiell unbeschränkt.
- Für $n\ge3$ ist diese Lsg beschränkt und erfüllt $\lim_{|x|\to\infty}u(x)=0$.

Proposition. Jede andere beschränkte Lösung von $-\Delta u = f$ auf $\mathbb{R}^n$ unterscheidet sich nur durch eine additive Konstante.

Def. Sei $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen. Eine **Greensche Funktion** für Ω ist eine Funktion $G:\{(x,y)\in\Omega\times\Omega\mid x\ne y\}\to\mathbb{R}$, falls für alle $x\in\Omega$ gilt:

- Die **Korrektorfunktion** $y\mapsto G(x,y)-\Phi(x-y)$ ist von der Klasse $\mathcal{C}^2(\Omega)\cap\mathcal{C}^1(\overline\Omega)$ und ist harmonisch in Ω.
- Die Funktion $G(x,-)$ hat Nullrandwerte auf $\partial\Omega$, d. h. es gilt $\lim_{y\to y_0}G(x,y)=0$ für alle $y_0\in\partial\Omega\cup\{\infty\}$.

Bemerkung.
- Ist Ω beschränkt, so ist die Greensche Funktion eindeutig.
- Die Funktion $G(x,-)$ ist in $\mathcal{C}^2(\Omega\setminus\{x\})\cap\mathcal{C}(\overline\Omega\setminus\{x\})$ und hat die gleiche Singularität wie $y\mapsto\Phi(x-y)$.

Satz. Sei $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen, beschränkt, mit $\mathcal{C}^1$-Rand $\partial\Omega$. Ist $u\in\mathcal{C}^2(\Omega)\cap\mathcal{C}^1(\overline\Omega)$ eine Lösung von (2.1) und ist G die Greensche Funktion für Ω (falls existent), dann gilt für alle $x\in\Omega$:

$$u(x) = \int_\Omega G(x,y)f(y)\,dy - \int_{\partial\Omega} g(y)\cdot D_yG(x,y)\cdot\nu\,dS(y).$$

Lemma. Sei $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen, G die Greensche Funktion für Ω und $B_r(x)\Subset\Omega$. Für $f\in\mathcal{C}^2(\Omega)\cap\mathcal{C}^1(\overline\Omega)$ gilt dann:

$$\lim_{\epsilon\to0}\int_{\partial B_\epsilon(x)}(G(x,y)Df(y) - f(y)D_yG(x,y))\cdot\nu(y)\,d\mathcal{H}^{n-1}(y) = f(x).$$

Satz. Ist G die Greensche Funktion zu $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen, beschränkt mit $\mathcal{C}^1$-Rand $\partial\Omega$, so gilt $G(x,y)=G(y,x)$ für alle $x,y\in\Omega$ mit $x\ne y$.

Korollar. Sei G die Greensche Funktion zu $\Omega\subset\mathbb{R}^n$ offen, beschränkt mit $\mathcal{C}^1$-Rand $\partial\Omega$, so ist die Funktion $x\mapsto G(x,y)$ harmonisch auf $\Omega\setminus\{y\}$.

Def. Sei $B_r(a)\subset\mathbb{R}^n$ eine Kugel, $x\in\mathbb{R}^n\setminus\partial B_r(a)$. Dann heißt

$$x^* := a + r^2\frac{x-a}{\|x-a\|^2}\in\mathbb{R}^n\setminus\partial B_r(a) \qquad \textbf{Spiegelungspunkt} \text{ von } x.$$

Bemerkung. Es gilt:
- $\|x-a\|\cdot\|x^*-a\| = r^2$
- $(x^*)^* = x$
- $\forall y\in\partial B_r(a): \|x^*-y\|^2 = r^2\|x-a\|^{-2}\|y-x\|^2$.

Notation. Für $B_r(a)\subset\mathbb{R}$ sei $g: B_r(a)\times B_r(a)\to\mathbb{R}$ definiert durch

$$g(x,y) := \begin{cases}-\Phi\left(\frac{|x-a|}{r}(y-x^*)\right) & \text{für } x\in B_r(a)\setminus\{a\}\\ -\Phi(re_1) & \text{für } x = a.\end{cases}$$

Proposition. Für die Funktion g gilt:

- $g(x,y)-\Phi(x-y) = 0$ für alle $y\in\partial B_r(a)$ und $x\in B_r(a)$.
- $y\mapsto g(x,y)$ ist glatt und harmonisch in $B_r(a)$ für alle $x\in B_r(a)$.

Korollar. Die Greensche Funktion für $B_r(a)\subset\mathbb{R}^n$ lautet

$$G_{B_r(a)}(x,y) := \Phi(x-y)+g(x,y) = \begin{cases}\Phi(x-y)-\Phi\left(\frac{|x-a|}{r}(y-x^*)\right) & \text{für } x\in B_r(a)\setminus\{a\}\\ \Phi(a-y)-\Phi(re_1) & \text{für } x=a.\end{cases}$$

Def. Der **Poisson-Kern für die Kugel** $B_r(a)\subset\mathbb{R}^n$ ist

$$K_{B_r(a)}(x,y) := \frac{1}{n\omega_n}\cdot\frac{r^2-|x-a|^2}{r|x-y|^n}.$$

Satz (Poisson-Integralformel für Kugeln). Sei $B_r(a)\subset\mathbb{R}^n$ und $g:\partial B_r(a)$ stetig.

- Für $u\in\mathcal{C}^2(B_r(a))\cap\mathcal{C}(\overline{B_r(a)})$ harmonisch mit $u=g$ auf $\partial B_r(a)$ gilt
$$u(x) = \int_{\partial B_r(a)} K_{B_r(a)}(x,y)g(y)\,d\mathcal{H}^{n-1}(y)\qquad\text{für alle } x\in B_r(a). \qquad (2.8)$$
- Umgekehrt definiert (2.8) die eindeutige harmonische Funktion $u\in\mathcal{C}^2(B_r(a))\cap\mathcal{C}^1(\overline{B_r(a)})$ mit $u=g$ auf $\partial B_r(a)$.

Notation. $\mathbb{R}^n_+ := \{(x_1,...,x_n)\in\mathbb{R}^n\mid x_n>0\}$ heißt **Halbraum**.

Def. Für $x=(x_1,...,x_n)\in\mathbb{R}^n$ heißt $\overline{x} := (x_1,...,x_{n-1},-x_n)$ **Spiegelpunkt** von x bzgl. $\partial\mathbb{R}^n_+$.

Satz. Die Greensche Funktion für $\mathbb{R}^n_+$ lautet

$$G_{\mathbb{R}^n_+}(x,y) := \Phi(x-y)-\Phi(x^*-y)\qquad\text{für } x,y\in\mathbb{R}^n_+ \text{ mit } x\ne y.$$

Def. Der **Poisson-Kern für den Halbraum** $\mathbb{R}^n_+$ ist definiert als

$$K_{\mathbb{R}^n_+}(x,y) := \frac{1}{n\omega_n} \cdot \frac{2x_n}{|x-y|^n} \quad \text{für } x \in \mathbb{R}^n_+ \text{ und } y \in \partial\mathbb{R}^n_+.$$

Satz (Poisson-Integralformel für den Halbraum)**.** Sei $g \in \mathcal{C}(\mathbb{R}^{n-1}) \cap L^\infty(\mathbb{R}^{n-1})$. Dann definiert

$$u(x) := \int_{\partial\mathbb{R}^n_+} K_{\mathbb{R}^n_+}(x,y) g(y) \,\mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}(y) \quad \text{für } x \in \mathbb{R}^n_+$$

eine beschränkte, harmonische Funktion $u \in \mathcal{C}(\mathbb{R}^n_+) \cap \mathcal{C}^1(\overline{\mathbb{R}^n_+})$ mit $u = g$ auf $\partial\mathbb{R}^n_+$.

Notation. Für $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ schreibe

- $\Omega^+ := \{(x_1,...,x_n) \in \Omega \mid x_n > 0\} = \Omega \cap \mathbb{R}^n_+$
- $\Omega^0 := \{(x_1,...,x_n) \in \Omega \mid x_n = 0\} = \Omega \cap \partial\mathbb{R}^n_+$
- $\Omega^- := \{(x_1,...,x_n) \in \Omega \mid x_n < 0\} = \Omega \setminus \overline{\mathbb{R}^n_+}$

Satz. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und symmetrisch bzgl. $\partial\mathbb{R}^n_+$, d. h. für alle $x \in \mathbb{R}^n$ gilt $x \in \Omega \iff \overline{x} \in \Omega$.

- Ungerades Spiegelungsprinzip: Ist $u \in \mathcal{C}^2(\Omega^+) \cap \mathcal{C}(\Omega^+ \cup \Omega^0)$ harmonisch auf Ω^+ mit $u = 0$ auf Ω^0, so ist die ungerade Fortsetzung

$$\overline{u}(x) := \begin{cases} u(x) & \text{für } x \in \Omega^+ \cup \Omega^0, \\ -u(\overline{x}) = -u(x_1,...,-x_n) & \text{für } x \in \Omega^- \end{cases}$$

  harmonisch auf Ω.
- Gerades Spiegelungsprinzip: Ist $u \in \mathcal{C}^2(\Omega^+) \cap \mathcal{C}^1(\Omega^+ \cup \Omega^0)$ mit $D_n u = 0$ auf Ω^0, so ist die gerade Fortsetzung

$$\overline{u}(x) := \begin{cases} u(x) & \text{für } x \in \Omega^+ \cup \Omega^0, \\ u(\overline{x}) = u(x_1,...,x_{n-1},-x_n) & \text{für } x \in \Omega^- \end{cases}$$

  harmonisch auf Ω.

Bemerkung. Aus dem Spiegelungsprinzip und dem Satz von Liouville folgt die Eindeutigkeit beschränkter harmonischer Funktionen auf dem Halbraum mit vorgegebenen Randwerten.

Problem (Dirichlet-RWP)**.** Für $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ und $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$ ist $u \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$ gesucht mit

$$(2.9)\left\{ \begin{array}{rcll} \Delta u & = & 0 & \text{in } \Omega, \\ u & = & g & \text{in } \partial\Omega. \end{array}\right.$$

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen. Eine Funktion $u \in \mathcal{C}(\Omega)$ heißt **$\mathcal{C}^0$-subharmonisch**, falls die MW-Ungleichung auf Sphären erfüllt ist, d. h.

$$u(x_0) \leq \fint_{\partial B_r(x_0)} u \,\mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1} \quad \text{für alle } x_0 \in \Omega \text{ und } r \in (0, \operatorname{dist}(x_0, \partial\Omega)).$$

Die Funktion heißt **$\mathcal{C}^0$-superharmonisch**, falls $-u$ $\mathcal{C}^0$-subharmonisch ist und **$\mathcal{C}^0$-harmonisch**, falls u sowohl subharmonisch als auch harmonisch ist.

Notation.
$$\begin{aligned} H^-(\Omega) &:= \{u \in \mathcal{C}(\Omega) \mid u \text{ ist subharmonisch auf } \Omega\} \\ H^+(\Omega) &:= \{u \in \mathcal{C}(\Omega) \mid u \text{ ist superharmonisch auf } \Omega\} \\ H^0(\Omega) &:= \{u \in \mathcal{C}(\Omega) \mid u \text{ ist harmonisch auf } \Omega\} \end{aligned}$$

Bemerkung. $\mathcal{C}^0$-harmonische Funktionen sind glatt und harmonisch.

Lemma. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen. Für $u \in \mathcal{C}(\Omega)$ sind äquivalent:

- u ist $\mathcal{C}^0$-subharmonisch auf Ω.
- u erfüllt die MW-Ungleichung auf Kugeln, d. h. für alle $x_0 \in \Omega$ gilt

$$u(x_0) \leq \fint_{B_r(x_0)} u(x) \,\mathrm{d}x \quad \text{für alle } r \in (0, \operatorname{dist}(x_0, \partial\Omega)).$$

- u erfüllt die MW-Ungleichung auf kleinen Kugeln, d. h. für alle $x_0 \in \Omega$ gibt es ein $R(x_0) \in (0, \operatorname{dist}(x_0, \partial\Omega))$ mit

$$u(x_0) \leq \fint_{B_r(x_0)} u(x) \,\mathrm{d}x \quad \text{für alle } r \in (0, R(x_0)).$$

- Für alle Kugeln $B_r(x_0) \Subset \Omega$ gilt das Vergleichsprinzip mit harmonischen Funktionen, d. h. für jede harmonische Funktion $h \in \mathcal{C}(\overline{B_r(x_0)})$ gilt: $u \leq h$ auf $\partial B_r(x_0) \implies u \leq h$ in $B_r(x_0)$.

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und $B_r(x_0) \Subset \Omega$. Der **Perron-Projektor** $P_{x_0,r} : \mathcal{C}(\Omega) \to \mathcal{C}(\Omega)$ ist definiert durch

$$(P_{x_0,r}u)(x) := \begin{cases} u(x), & x \in \Omega \setminus B_r(x_0) \\ \int_{\partial B_r(x_0)} K_{B_r(x_0)}(x,y) u(y) \,\mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}(y), & x \in B_r(x_0). \end{cases}$$

Bemerkung. Die Funktion $P_{x_0,r}(u)$ wird **harmonische Fortsetzung** von u auf $B_r(x_0)$ genannt.

Lemma. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen. Dann gilt:

- Sind $v \in H^-(\Omega)$ und $w \in H^+(\Omega)$, so gilt $v - w \in H^-(\Omega)$.
- Sind $v_1, v_2 \in H^-(\Omega)$, $w_1, w_2 \in H^+(\Omega)$ und $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$, so ist

$$\{\max(v_1, v_2), \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2\} \subset H^-(\Omega),$$
$$\{\min(w_1, w_2), \lambda_1 w_1 + \lambda_2 w_2\} \subset H^+(\Omega).$$

- Sind $v \in H^-(\Omega), w \in H^+(\Omega)$ und $B_r(x_0) \Subset \Omega$, so gelten

$$P_{x_0,r}v \geq v \text{ in } \Omega \quad \text{und} \quad P_{x_0,r}v \in H^-(\Omega),$$
$$P_{x_0,r}w \leq w \text{ in } \Omega \quad \text{und} \quad P_{x_0,r}w \in H^+(\Omega).$$

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt und $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$. Dann heißt $u \in \mathcal{C}(\overline{\Omega})$ **Sublösung** des Dirichletproblems (2.9), falls $u \leq g$ auf $\partial\Omega$ gilt und **Superlösung** von (2.9), falls $u \geq g$ auf $\partial\Omega$ gilt.

Notation.
$$\begin{aligned} H^-_g(\Omega) &:= \{u \in \mathcal{C}(\overline{\Omega}) \cap H^-(\Omega) \mid u \leq g \text{ auf } \partial\Omega\}, \\ H^+_g(\Omega) &:= \{u \in \mathcal{C}(\overline{\Omega}) \cap H^+(\Omega) \mid u \geq g \text{ auf } \partial\Omega\}, \\ u^-(x) &:= \sup\{v(x) \mid v \in H^-_g(\Omega)\}, \\ u^+(x) &:= \sup\{v(x) \mid v \in H^+_g(\Omega)\}. \end{aligned}$$

Methode (Perron)**.** Zeige zunächst, das u^- und u^+ harmonisch sind. Zeige dann unter gewissen Regularitätsvoraussetzungen an Ω, dass $u^- = u^+$ gilt und die vorgegebenen Randwerte annimmt.

Lemma. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt, $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$. Dann sind u^- und u^+ wohldefiniert und es gilt

$$\inf_{\partial\Omega} g \leq u^- \leq u^+ \leq \sup_{\partial\Omega} g.$$

Bemerkung. Falls eine Lösung u des Dirichlet-Problems existiert, so gilt $u = u^- = u^+$.

Satz. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt und $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$. Dann sind u^- und u^+ harmonisch in Ω.

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt, $x_0 \in \partial\Omega$. Eine Funktion $b : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}^+_0$ heißt (obere) **Barriere** zu Ω in x_0, falls

- $b \in \mathcal{C}(\overline{\Omega}) \cap H^+(\Omega)$
- $b(x_0) = 0$ und $b(x) > 0$ für alle $x \in \overline{\Omega} \setminus \{x_0\}$

Falls eine solche Barriere existiert, so heißt x_0 **regulärer Randpunkt**.

Bemerkung. Eine Funktion $b : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}^-_0$ heißt untere Barriere, falls $(-b) : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}^+_0$ eine obere Barriere ist.

Def. Eine **lokale Barriere** zu Ω in $x_0 \in \partial\Omega$ ist eine Barriere $\tilde{b} : B_r(x_0) \cap \Omega \to \mathbb{R}^+_0$ zu $B_r(x_0) \cap \Omega$ in x_0.

Bemerkung. Aus jeder lokalen Barriere lässt sich eine globale Barriere konstruieren.

Lemma. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt. Falls das Dirichlet-Problem (2.9) für jede Funktion $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$ eine Lösung $u \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$ besitzt, so sind alle Randpunkte $x_0 \in \partial\Omega$ regulär.

Lemma. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt, $x_0 \in \partial\Omega$. Ist x_0 regulär, dann gilt für jede stetige Funktion $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$:

$$\lim_{\Omega \ni x \to x_0} u^-(x) = g(x_0) = \lim_{\Omega \ni x \to x_0} u^+(x).$$

Satz (Perron)**.** Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt. Dann sind äquivalent:

- Der Rand $\partial\Omega$ ist regulär.
- Das Dirichlet-Problem (2.9) besitzt eine eindeutige Lösung $u \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$ für alle $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$.

Def. Eine offene Menge $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ erfüllt die **äußere Kugelbedingung** in $x_0 \in \partial\Omega$ an Ω, falls ein Ball $B_r(a) \subset \mathbb{R}^n \setminus \Omega$ mit $\overline{\Omega} \cap \overline{B_r(a)} = \{x_0\}$ existiert.

Lemma. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen. Erfüllt Ω die äußere Kugelbedingung in $x_0 \in \partial\Omega$ an Ω, dann ist x_0 ein regulärer Randpunkt.

Bemerkung. Beschränkte Gebiete mit $\mathcal{C}^2$-Rand und strikt konvexe Gebiete erfüllen die äußere Kugelbedingung.

Problem. Seien $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, $f : \Omega \to \mathbb{R}$, $g : \partial\Omega \to \mathbb{R}$ gegeben. Gesucht ist eine Lösung $u \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$ der Poisson-Gleichung

$$(2.10)\left\{\begin{array}{rcll} -\Delta u &=& f & \text{in } \Omega \\ u &=& g & \text{auf } \partial\Omega. \end{array}\right.$$

Proposition. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt, offen und $\partial\Omega$ regulär. Sind $f \in \mathcal{C}_0^2(\mathbb{R}^n)$, $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$, so besitzt (2.10) eine eindeutige Lösung $u \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$.

Bemerkung. Die Behauptung folgt leicht aus den vorherigen Sätzen, aber die Voraussetzung $f \in \mathcal{C}_0^2(\Omega)$ ist zu stark.

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und beschränkt. Das **Newton-Potential** $N_f : \Omega \to \mathbb{R}$ einer Funktion $f \in L^\infty(\Omega)$ ist die Faltung

$$N_f(x) := \int_\Omega \Phi(x-y) f(y)\,\mathrm{d}y.$$

Bemerkung. Die Fktn f wird außerhalb von Ω durch 0 fortgesetzt.

Lemma. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt und $f \in L^\infty(\Omega)$. Dann gilt $N_f \in \mathcal{C}^1(\Omega)$ mit $DN_f(x) = \int_\Omega D_x\Phi(x-y)f(y)\,\mathrm{d}y$ für alle $x \in \Omega$.

Korollar. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt und $f \in L^\infty(\Omega)$. Dann gilt $N_f \in \mathcal{C}^{1,\alpha}(\Omega)$ für alle $\alpha \in (0,1)$.

Satz (Hölder). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschr. und $f \in \mathcal{C}^{0,\alpha}(\Omega) \cap L^\infty(\Omega)$ für ein bel. $\alpha \in (0,1)$. Dann gilt $N_f \in \mathcal{C}^2(\Omega)$ mit $-\Delta N_f = f$ in Ω und für jede Kugel B mit $\Omega \Subset B$ gilt die Darstellung

$$\begin{aligned} D_iD_jN_f(x) =& \int_B D_{x_i}D_{x_j}\Phi(x-y)(f(y)-f(x))\,\mathrm{d}y \\ &- f(x)\cdot \int_{\partial B} D_{x_j}\Phi(x-y)\nu_i(y)\,\mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}(y). \end{aligned}$$

Satz. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt und $\partial\Omega$ regulär. Sind $f \in \mathcal{C}^{0,\alpha}(\Omega) \cap L^\infty(\Omega)$ für ein $\alpha \in (0,1)$ und $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$, so besitzt (2.10) eine eindeutige Lösung $u \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$.

Bemerkung. Für das Newtonpotential überträgt sich die Regularität von f wie folgt: Ist $\alpha \in (0,1)$ und $f \in \mathcal{C}^{k,\alpha}(\overline{B_{2R}})$, so ist $N_f \in \mathcal{C}^{k+2,\alpha}(\overline{B_R})$ für alle $R > 0$. Im Allgemeinen gilt:

$$f\in L^\infty \not\Rightarrow N_f \in \mathcal{C}^2, \quad f\in\mathcal{C}^k \not\Rightarrow N_f \in \mathcal{C}^{k+2}, \quad f\in\mathcal{C}^{k,1} \not\Rightarrow N_f \in \mathcal{C}^{k+2,1}$$

Problem. Gesucht sind Lösungen des Eigenwertproblems mit Dirichlet-Randwert 0 für den Laplaceoperator, also Eigenwerte $\lambda \in \mathbb{R}$ und Eigenfunktionen $u_\lambda \in \mathcal{C}^2(\Omega)$ mit

$$\left\{\begin{array}{rcll} -\Delta u_\lambda &=& \lambda u_\lambda & \text{in } \Omega \\ u_\lambda &=& 0 & \text{auf } \partial\Omega. \end{array}\right.$$

Bemerkungen.
- Es sind nur nichtnegative EWe möglich.
- Es gibt höchstens abzählbar viele EWe.
- Die zugehörigen Eigenräume sind endlich-dimensional.
- Eigenfunktionen zu unterschiedlichen EWen sind orthogonal bzgl.

$$\langle u, v\rangle_{L^2} := \int_\Omega u\cdot v\,\mathrm{d}x.$$

- Eigenfunktionen sind glatt.

3. Wärmeleitungsgleichung

Notation. Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall, $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. Wir suchen $u : I \times \Omega \to \mathbb{R}, (t,x) \mapsto u(t,x)$ und schreiben $u_t := \frac{\partial u}{\partial t}$ für die Zeitableitung, $Du(t,x) := D_xu(t,x)$ für die Ortsableitung und $\Delta u(t,x) := \Delta_x u(t,x)$.

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ und $T > 0$.
- Der **parabolische Zylinder** ist $\Omega_T := (0,T] \times \Omega \subset \mathbb{R}^{n+1}$.
- Der **parabolische Rand** von Ω_T ist

$$\partial_p\Omega_T := (\{0\}\times\Omega) \cup ([0,T]\times\partial\Omega) \subset \partial\Omega_T.$$

Notation. Wir benötigen untersch. Regularitäten in Ort und Zeit:

$$\mathcal{C}_1^2(\Omega_T) := \{f \in \mathcal{C}^1(\Omega_T) \mid f \text{ ist zweimal stetig nach } x \text{ ableitbar}\}$$

Problem. Wärmeleitungsgleichung (WLG): $u_t - \Delta u = 0$

Def. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $T > 0$ und $u \in \mathcal{C}_1^2(\Omega_T)$. Dann heißt u

$$\left.\begin{array}{l} \text{subkalorisch} \\ \text{kalorisch} \\ \text{superkalorisch} \end{array}\right\} \text{ falls } \left\{\begin{array}{l} u_t - \Delta u \le 0 \\ u_t - \Delta u = 0 \\ u_t - \Delta u \ge 0 \end{array}\right\} \text{ in } \Omega_T \text{ gilt.}$$

Bemerkung (Invarianzen der Lösungseigenschaft). Wenn $u \in \mathcal{C}_t^2(\Omega_T)$ kalorisch, dann auch (auf geeigneten Zylindern):

$$\begin{array}{ll} u_{0,x_0}(t,x) := u(t, x-x_0) & \text{für } x_0 \in \mathbb{R}^n \\ u_{\mathcal{T},0}(t,x) := u(t-\mathcal{T}, x) & \text{für } \mathcal{T} \in \mathbb{R} \\ u_R(t,x) := u(t, Rx) & \text{für } R \in SO(n) \\ u_\lambda(t,x) := \lambda^n u(\lambda^2 t, \lambda x) & \text{für } \lambda > 0 \end{array}$$

Es gilt $\int_{\mathbb{R}^n} u_\lambda(t,y)\,\mathrm{d}y = \int_{\mathbb{R}^n} u(\lambda^2 t, y)\,\mathrm{d}y$.

Bspe.
- Sei v harmonisch auf $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. Dann ist $(t,x) \mapsto v(x)$ kalorisch auf Ω_T.
- Für $n = 1$ und $c_1, c_2, a \in \mathbb{R}$ sind kalorisch:

$$\begin{aligned} &(t,x) \mapsto \exp(a^2t)\cdot(c_1\sinh(ax) + c_2\cosh(ax)) \\ &(t,x) \mapsto \exp(-a^2t)\cdot(c_1\sin(ax) + c_2\cos(ax)) \\ &(t,x) \mapsto c_1x + c_2 \end{aligned}$$

Def. Die **Fundamentallösung der WLG** ist die Funktion

$$\Psi : (0,\infty)\times\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}, \quad (t,x) \mapsto \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}}\exp\left(-\frac{|x|^2}{4t}\right).$$

Bemerkungen.
- $\Psi_t(t,x) - \Delta_x\Psi(t,x) = 0$ für alle $t > 0$ und $x \in \mathbb{R}^n$.
- $\Psi(t,0) \xrightarrow{t\to 0} \infty$,
- $\Psi(t,x) \xrightarrow{t\to 0} 0$ bei $x \neq 0$ fest.
- Für alle $t \in \mathbb{R}$ gilt $\int_{\mathbb{R}^n} \Psi(t,x)\,\mathrm{d}x = 1$.
- Raum- und Zeitableitungen lassen sich explizit berechnen.
- $\|\Psi(t,-)\|_{L^\infty(\mathbb{R}^n)} \xrightarrow{t\to\infty} 0$,
- $\|D\Psi(t,-)\|_{L^1(\mathbb{R}^n)} + \|\Psi_t(t,-)\|_{L^1(\mathbb{R}^n)} \xrightarrow{t\to\infty} 0$,
- $\Psi(t,-) * \Psi(s,-) = \Psi(t+s,-)$

Bemerkung. Für die Fundamentallösung der Laplace-Gleichung gilt:

$$\forall x_0 \in \mathbb{R}^n \ : \ B_1(x_0) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \Phi(x_0 - x) > \Phi(re_1)\}$$

Def. Die **Wärmeleitungskugel** um $(t_0, x_0) \in \mathbb{R}\times\mathbb{R}^n$ mit $r > 0$ ist

$$\begin{aligned} W_r(t_0,x_0) &:= \{(t,x) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid t < t_0 \text{ und } \Psi(t_0 - t, x_0 - x) > r^{-n}\} \\ &\subseteq (-\infty, t_0)\times\mathbb{R}^n \end{aligned}$$

Notation. $W_r := W_r(0,0)$

Notation. Für $r > 0$ setze

$$b_r : \mathbb{R}^-\times\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}, \quad (t,x) \mapsto \tfrac{|x|^2}{4t} + n\log r - \tfrac{n}{2}\log(-4\pi t).$$

Bemerkungen.
- Monotonie: Für $r \le \tilde r$ gilt $W_r(x_0) \subseteq W_{\tilde r}(x_0)$
- Translationsinvarianz: $W_r(t_0,x_0) = (t_0,x_0) + W_r(0,0)$
- Parabolische Reskalierung: $(t,x) \in W_r \iff (r^{-2}t, r^{-1}x) \in W_1$
- Explizite Darstellung: Für $r > 0$ gilt

$$\begin{aligned} W_r(0,0) &= \{(t,x) \in \mathbb{R}^-\times\mathbb{R}^n \mid b_r(t,x) > 0\} \\ \partial W_r(0,0) &= \{(0,0)\} \cup \{(t,x) \in \mathbb{R}^-\times\mathbb{R}^n \mid b_r(t,x) = 0\} \\ W_r(0,0) &= \{(t,x) \in \mathbb{R}^-\times\mathbb{R}^n \mid -\tfrac{r^2}{4\pi} < t < 0 \text{ und} \\ &\qquad |x|^2 < 4t(-n\log r + \tfrac{n}{2}\log(-4\pi t))\} \end{aligned}$$

- Es gilt $\int_{W_r} \frac{|x|^2}{t^2}\,\mathrm{d}(t,x) = 4r^n$

Lemma. Sei $R > 0$ und $u \in \mathcal{C}_1^2(W_R)$. Für

$$\phi : (0,R) \to \mathbb{R}, \quad r \mapsto \frac{1}{4r^n}\int_{W_r} u(t,x)\frac{|x|^2}{t^2}\,\mathrm{d}(t,x) \qquad \text{gilt dann}$$

- $\lim_{r\to 0}\phi(r) = u(0,0)$
- $\phi'(r) = \dfrac{n}{r^{n+1}}\int_{W_r}(-u_t(t,x) + \Delta u(t,x))\cdot b_r(t,x)\,\mathrm{d}(t,x)$

Satz (MWE). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, $T > 0$, $u \in \mathcal{C}_1^2(\Omega_T)$ und $W_r(t_0,x_0) \Subset \Omega_T$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} & u_t - \Delta u = 0 \text{ in } \Omega_T \\ \implies & u(t_0,x_0) = \frac{1}{4r^n}\int_{W_r(t_0,x_0)} u(t,x)\cdot\frac{|x-x_0|^2}{(t-t_0)^2}\,\mathrm{d}(t,x) \end{aligned}$$

In diesen Gleichungen darf man $=$ durch $\le, <, \ge$ oder $>$ ersetzen.

Korollar. Für $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, $T{>}0$ und $u \in \mathcal{C}_1^2(\Omega_T)$ sind äquivalent:
- u ist kalorisch
- u erfüllt die MWE auf WL-Kugeln, d. h. f. a. $W_r(t_0,x_0) \Subset \Omega_T$ gilt

$$u(t_0,x_0) = \frac{1}{4r^n}\int_{W_r(t_0,x_0)} u(t,x)\cdot\frac{|x-x_0|^2}{(t-t_0)^2}\,\mathrm{d}(t,x)$$

Satz. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt, offen, $T > 0$ und $u \in \mathcal{C}_1^2(\Omega_T) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega_T})$ subkalorisch. Dann gilt:

- Das schwache Maximumsprinzip: $\max_{\overline{\Omega_T}} u = \max_{\partial_p \Omega_T} u$
- Das starke Maximumsprinzip: Ist Ω zshgd und gibt es $(t_0, x_0) \in \Omega_T$ mit $u(t_0, x_0) = \max_{\overline{\Omega_T}} u$, so ist u konstant auf Ω_{t_0}.

Bemerkung. Es gelten auch entsprechende Minimumsprinzipien für superkalorische Funktionen.

Bemerkung („unendliche Ausbreitungsgeschwindigkeit“).
Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt, offen, zusammenhängend, $T > 0$ und $u \in \mathcal{C}^2_1(\Omega_T) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega_T})$ eine kalorische Funktion, die auf $[0,T] \times \partial\Omega$ verschwindet. Dann gilt

$$\min_{\{0\}\times\partial\Omega} u < \max_{\{0\}\times\partial\Omega} u \implies \min_{\partial\{0\}\times\Omega} u < u < \max_{\{0\}\times\partial\Omega} u \text{ in } \Omega_T.$$

Korollar (Eindeutigkeit)**.** Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen, beschränkt, $T > 0$, $u, v \in \mathcal{C}^2_1(\Omega_T) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega_T})$ mit

$$\begin{cases} u_t - \Delta u = v_t - \Delta v & \text{in } \Omega_T \\ u = v & \text{auf } \partial_p \Omega_T \end{cases}$$

Dann gilt $u \equiv v$ in Ω_T.

Proposition. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt, offen mit regulären Randpunkten und $f \in \mathcal{C}^{0,\alpha}(\Omega) \cap L^\infty(\Omega)$ für ein $\alpha \in (0,1)$ und $g \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$. Dann gilt für jede Lösung $u \in \mathcal{C}^2_1(\Omega \times (0,\infty)) \cap \mathcal{C}(\Omega \times [0,\infty))$ von

$$\begin{cases} u_t - \Delta u = f & \text{in } (0,\infty) \times \Omega \\ u = g & \text{auf } \partial_p \Omega_T \end{cases}$$

mit beliebigen Anfangswerten auf $\{0\} \times \Omega$:

$$\lim_{t\to\infty} u(t, -) = v,$$

wobei $v \in \mathcal{C}^2(\Omega) \cap \mathcal{C}(\overline{\Omega})$ die eindeutige Lösung der folgender Poisson-Gleichung ist:

$$\begin{cases} \Delta u = f & \text{in } \Omega, \\ u = g & \text{auf } \partial\Omega. \end{cases}$$

Satz. Sei $g \in L^p(\mathbb{R}^n)$ für ein $p \in [1, \infty]$. Dann ist die Funktion $u : (0,\infty) \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ definiert durch

$$u(t,x) := (\Psi(t,-) * g)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} \Psi(t, x-y) \cdot g(y) \, \mathrm{d}y$$

in $\mathcal{C}^\infty((0,\infty) \times \mathbb{R}^n)$ und erfüllt

$$\begin{cases} u_t - \Delta u &= 0 & \text{in } (0,\infty) \times \mathbb{R}^n, \\ u &= g & \text{auf } \{0\} \times \mathbb{R}^n. \end{cases}$$

Satz. Für die Funktion u aus dem vorherigen Satz gilt:
- Ist $g \in \mathcal{C}(\mathbb{R}^n) \cap L^\infty(\mathbb{R}^n)$, so konvergiert
$$u(t,x) \xrightarrow{t\to 0, x \to x_0} g(x_0) \quad \text{für alle } x_0 \in \mathbb{R}^n.$$
Die Konvergenz ist gleichmäßig auf kompakten Mengen.
- Ist $g \in L^p(\mathbb{R}^n)$ für ein $p \in [1,\infty]$, so ist $\|u(t,-)\|_{L^p(\mathbb{R}^n)} \le \|g\|_{L^p(\mathbb{R}^n)}$ für alle $t > 0$. Ist $p < \infty$, so gilt
$$\|u(t,-) - g\|_{L^p(\mathbb{R}^n)} \xrightarrow{t\to 0} 0.$$

Proposition. Es gilt außerdem

$$\int_{\mathbb{R}^n} u(t,x) \, \mathrm{d}x = \int_{\mathbb{R}^n} g(x) \, \mathrm{d}x \quad \text{für alle } t > 0.$$

Satz. Sei $f \in \mathcal{C}^2_1([0,\infty] \times \mathbb{R}^n)$ mit $\operatorname{supp}(f) \Subset [0,\infty] \times \mathbb{R}^n$. Dann ist die Funktion $u : (0,\infty) \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ definiert durch

$$u(t,x) := \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \Psi(t-s, x-y) \cdot f(s,y) \, \mathrm{d}y \, \mathrm{d}s$$

in $\mathcal{C}^2_1((0,\infty) \times \mathbb{R}^n) \cap \mathcal{C}([0,\infty) \times \mathbb{R}^n)$ und erfüllt die inhomogene WLG

$$\begin{cases} u_t - \Delta u &= f & \text{in } (0,\infty) \times \mathbb{R}^n, \\ u &= 0 & \text{auf } \{0\} \times \mathbb{R}^n. \end{cases}$$

Satz (Allgemeine Lösungsformel)**.** Sei $g \in \mathcal{C}(\mathbb{R}^n) \cap L^\infty(\mathbb{R}^n)$ und $f \in \mathcal{C}^2_1([0,\infty) \times \mathbb{R}^n)$ mit $\operatorname{supp}(f) \Subset [0,\infty) \times \mathbb{R}^n$. Dann ist die Funktion $u : (0,\infty) \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ definiert durch

$$u(t,x) := \int_{\mathbb{R}^n} \Psi(t, x-y) \cdot g(y) \, \mathrm{d}y + \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \Psi(t-s, x-y) \cdot f(s,y) \, \mathrm{d}y \, \mathrm{d}s$$

in $\mathcal{C}^2_1((0,\infty) \times \mathbb{R}^n) \cap \mathcal{C}([0,\infty) \times \mathbb{R}^n)$ und erfüllt

$$\begin{cases} u_t - \Delta u &= f & \text{in } (0,\infty) \times \mathbb{R}^n, \\ u &= g & \text{auf } \{0\} \times \mathbb{R}^n. \end{cases}$$

4. Die Wellengleichung

Notation. $u_{tt} := \partial_t^2 u$

Problem. Seien $g \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R}^n)$, $f \in \mathcal{C}^1(\mathbb{R}^n)$. Gesucht ist eine Lösung der homogenen Wellengleichung (WG)

$$(4.1) \begin{cases} u_{tt} - \Delta u = 0 & \text{in } (0,\infty) \times \mathbb{R}^n \\ u = g, u_t = h & \text{auf } \{0\} \times \mathbb{R}^n \end{cases}$$

Satz. Seien $b \in \mathbb{R}^n$, $\tilde{f} \in \mathcal{C}^1([0,\infty) \times \mathbb{R}^n)$ und $\tilde{g} \in \mathcal{C}([0,\infty) \times \mathbb{R}^n)$. Dann besitzt das AWP für die Transportgleichung

$$\begin{cases} \partial_t u + b \cdot Du &= \tilde{f} & \text{in } (0,\infty) \times \mathbb{R}^n, \\ u &= \tilde{g} & \text{auf } \{0\} \times \mathbb{R}^n. \end{cases}$$

eine eindeutige Lösung $u \in \mathcal{C}^1((0,\infty) \times \mathbb{R}^n) \cap \mathcal{C}([0,\infty) \times \mathbb{R}^n)$, die gegeben ist durch

$$u(t,x) := \tilde{g}(x - tb) + \int_0^t \tilde{f}(s, x + (s-t)b) \, \mathrm{d}s.$$

Satz. Seien $g \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R})$, $h \in \mathcal{C}^1(\mathbb{R})$ und

$$u : [0,\infty) \times \mathbb{R} \to \mathbb{R} \quad (t,x) \mapsto \tfrac{1}{2}\left(g(x+t) + g(x-t)\right) + \tfrac{1}{2} \int_{x-t}^{x+t} h(s) \, \mathrm{d}s.$$

Dann ist $u \in \mathcal{C}^2([0,\infty) \times \mathbb{R})$ die eindt. Lsg von (4.1) auf $(0,\infty) \times \mathbb{R}$.

Bemerkung.
- Es gibt keinen Regularisierungseffekt, d. h. im Allgemeinen ist u nur in $\mathcal{C}^2$, nicht besser.
- „Endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit“: Ist $\operatorname{supp}(g) \cup \operatorname{supp}(f) \subset [x_0 - r, x_0 + r]$ für $x_0 \in \mathbb{R}$, $r > 0$, so gilt $\operatorname{supp}(t,-) \subset [x_0 - (t+r), x_0 + t + r]$.

Korollar. Seien $g \in \mathcal{C}^2([0,\infty))$ mit $\lim_{x\to 0} g''(x) = g(0) = 0$ und $h \in \mathcal{C}([0,\infty))$ mit $h(0) = 0$. Dann ist die Funktion $u : [0,\infty) \times [0,\infty) \to \mathbb{R}$, definiert durch

$$u(t,x) := \begin{cases} \tfrac{1}{2}\left(g(x+t) + g(x-t)\right) + \tfrac{1}{2} \int_{x-t}^{x+t} h(s) \, \mathrm{d}s & \text{für } x \ge t \ge 0, \\ \tfrac{1}{2}\left(g(x+t) - g(t-x)\right) + \tfrac{1}{2} \int_{t-x}^{x+t} h(s) \, \mathrm{d}s & \text{für } t \ge x \ge 0 \end{cases}$$

die $\mathcal{C}^2$-Lösung des AWP der homogenen Wellengleichung

$$\begin{cases} u_{tt} - \Delta u = 0 & \text{in } (0,\infty) \times (0,\infty), \\ u = g, u_t = h & \text{auf } \{0\} \times (0,\infty), \\ u = 0 & \text{auf } (0,\infty) \times \{0\}. \end{cases}$$

Notation. Für $u : [0,\infty) \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ und $g, h : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ definiere

$$U_x(t,r) := \fint_{\partial B_r(x)} u(t,y) \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}(y),$$

$$G_x(r) := \fint_{\partial B_r(x)} g(y) \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}(y), \qquad H_x(r) := \fint_{\partial B_r(x)} h(y) \, \mathrm{d}\mathcal{H}^{n-1}(y)$$

Lemma (Euler-Lagrange-Darboux-Gleichung)**.**
Sei $u \in \mathcal{C}^m([0,\infty) \times \mathbb{R}^n)$ mit $m \ge 2$ eine Lsg von (4.1). Dann gilt $U_x \in \mathcal{C}^m([0,\infty) \times [0,\infty))$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$ und U_x erfüllt das AWP

$$\begin{cases} \partial_t^2 U_x - \partial_r^2 U_x - \frac{n-1}{r} \partial_r U_x = 0 & \text{in } (0,\infty) \times (0,\infty), \\ U_x = G_x, \partial_t U_x = H_x & \text{auf } \{0\} \times \mathbb{R}^n. \end{cases}$$