

Notizen zur Vorlesung

Variationsrechnung



G. Sweers

Wintersemester 2011/12

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Die Brachystochrone als Beispiel	1
1.1.1	Zweck und Ziel der Variationsrechnung	4
1.2	Räume stetiger Funktionen	5
1.3	Räume differenzierbarer Funktionen	7
1.4	Hölder-Räume	9
1.5	Differenzierbarkeit eines Funktional	10
2	Die erste Variation	11
2.1	Definition der ersten Variation	11
2.2	Das erste Hauptlemma der Variationsrechnung	13
2.3	Satz beim Minimierungsproblem	14
2.4	Minimalfläche	14
2.5	Ein zweites Hauptlemma der Variationsrechnung	15
2.6	Regularität in einer Dimension	16
2.6.1	Ein Satz von C^1 zu C^2	17
2.6.2	Einige Beispiele, mit und ohne Regularität	18
3	Rand- und Nebenbedingungen	21
3.1	Natürliche Randbedingungen	21
3.2	Nebenbedingungen	23
3.2.1	Die Vorhangschiene	23
3.2.2	Ein Funktional als Nebenbedingung	25
3.3	Lagrange-Multiplikator	25
3.4	Beispiele für Randbedingungen	27
3.4.1	Wäscheleine und Membrane oder wie die Dimension eingreift	27
3.4.2	Natürliche Randbedingungen bei einer Plattengleichung	28
4	Die zweite Variation und Konvexität	29
4.1	Rotationsfläche oder mehr als nur Minimum	29
4.2	Lokales und globales Minimum	31
4.3	Konvexität	32
4.3.1	Konvexität in $\mathbb{R}^n$	33
4.3.2	Minimum bei Konvexität	38
4.4	Funktionale für vektorwertige Funktionen	40
4.4.1	Das Stokes-System	40
4.4.2	Konvexität für vektorwertige Funktionen	42

5	Lebesgue-Räume und Funktionalanalysis	45
5.1	Lebesgue-Integrale	45
5.1.1	Integrale	45
5.1.2	Definition der Lebesgue-Räume	47
5.2	Funktionalanalytisches	48
5.2.1	Dualraum	48
5.3	Konvergenz	50
5.3.1	Starke und schwache Konvergenz	50
5.3.2	Einige Konvergenzsätze	53
5.4	Nochmals das erste Hauptlemma	55
6	Sobolev-Räume	57
6.1	Schwache Ableitung	57
6.2	Definition der Sobolev-Räume	60
6.3	Approximationen	64
6.3.1	Konvolution, Faltung	64
6.3.2	Approximieren mit Friedrichs	65
7	Lineare Probleme und schwache Lösungen	69
7.1	Quadratische Funktionale	69
7.2	Hilbert-Räume	69
7.3	Schwache Lösungen	70
7.3.1	Mehr schwache Lösungen	71
7.4	Poincaré, Friedrichs und Wirtinger	73
7.5	Folgen von Poincaré-Friedrichs-Wirtinger	76
7.6	Lax-Milgram	78
8	$W^{k,p}$-Funktionen und Rand	83
8.1	Verhalten am Rand	83
8.1.1	Wie definiert man Regularität vom Rand?	85
8.1.2	Intermezzo zum Träger einer Funktion	87
8.2	Fortsetzen einer Funktion	88
8.3	Einschränken auf dem Rand	91
9	Funktionsräume und ihr Zusammenhang I	97
9.1	Hölder und Sobolev	97
9.1.1	Eine Einbettung in einer Dimension	97
9.1.2	Für $p < n$ von $W^{1,p}(\Omega)$ zu $L^q(\Omega)$	98
9.1.3	Für $p > n$ von $W^{1,p}(\Omega)$ zu $C^{0,\gamma}(\bar{\Omega})$	101
10	Funktionsräume und ihr Zusammenhang II	105
10.1	Morrey, Gagliardo, Sobolev und Nirenberg	105
10.2	Altes und Neues zur Stetigkeit	107
10.3	Kompakte Abbildungen	109
10.4	Kompakte Einbettungen	110
11	Die direkten Methoden	115
11.1	Drei Hauptbestandteile	115
11.1.1	Koerzitiv, reflexiv und schwach unterhalbstetig	115
11.1.2	Anwendung auf ein Dirichlet-Problem	116
11.1.3	Ein semilineares Dirichlet-Problem	118

11.2 A-priori Abschätzungen	120
12 Das Maximumprinzip	123
12.1 Besonderes für Funktionale erster Ordnung	123
12.2 A-priori Abschätzungen und Maximumprinzip	126
12.3 Anwendung auf ein semilineares Problem	129
13 Extrema und Sattelpunkte	131
13.1 Stationäre Stellen	131
13.2 Lokales Minimum	133
13.3 Sattelpunktlösungen	135
13.4 Numerische Approximierungen	136
13.4.1 Konstruktive Approximationen beim Minimum	136
13.4.2 Konstruktive Approximationen beim Sattelpunkt	139
13.5 Ein subkritisches superlineares Problem	140
14 Regularität	143
14.1 Einleitung	143
14.2 Regularität im Innern	146
14.3 Regularität am Rande	151
14.4 Regularitätsätze in Hölder- und Sobolev-Räumen	153
A Integration und Konvergenz	155
B Ungleichungen	157
C Kompaktheit, Abgeschlossenheit	159
Literaturverzeichnis	161

Variationsrechnung

Kapitel 1



Einführung

1.1 Die Brachystochrone als Beispiel

Eine Achterbahn ohne Reibung soll $(0, 0)$ mit $(6, -1)$ verbinden. Man startet mit Geschwindigkeit 0. Welche Kurve sorgt für die schnellste Verbindung?

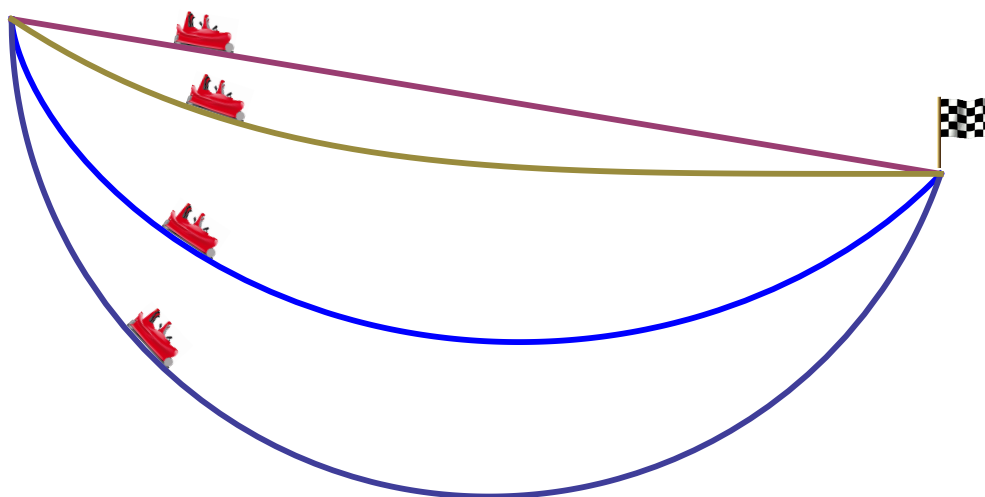


Abbildung 1.1: Welche Achterbahn führt am schnellsten zum Ziel?

Physikalische Herleitung

Die Energiegleichung

$$E_{pot} + E_{kin} = 0$$

bringt

$$mgh + \frac{1}{2}m(v_1^2 + v_2^2) = 0, \quad (1.1)$$

wobei h die Höhe, m die Masse, $\vec{v} = (v_1, v_2)$ die Geschwindigkeit und g die Gravitationskonstante ist.

Weil $v_1 = \frac{dx}{dt}$, gilt für die Zeit von $x = 0$ bis $x = 6$ mit Hilfe der inversen Funktion $x \mapsto t(x)$, dass

$$T = t(6) - t(0) = \int_0^6 t'(x) dx = \int_0^6 \frac{1}{v_1} dx.$$

Schreibt man an der Stelle x für die Höhe $h = -u(x)$, so folgt $v_2 = u'(x)v_1$ und

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{1 + (u'(x))^2} v_1.$$

Mit (1.1) finden wir

$$\frac{1}{v_1} = \frac{\sqrt{1 + (u'(x))^2}}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} = \frac{\sqrt{1 + (u'(x))^2}}{\sqrt{2gu(x)}}.$$

Die Zeit $T(u)$, die man braucht um durch die Kurve $(x, u(x))$ von $(0, 0)$ nach $(6, 1)$ zu kommen, beträgt so

$$T(u) = \int_0^6 \sqrt{\frac{1 + (u'(x))^2}{2gu(x)}} dx, \quad (1.2)$$

wobei man sich beschränkt auf Kurven, für die gilt $u(0) = 0$ und $u(6) = 1$.

Variationelle Betrachtungen

Das Funktional $T(u)$ ist eine Funktion von Funktionen und wir wollen eine Funktion u finden, die dieses T minimal macht. Weil man innerhalb von T eine Ableitung von u findet, nehmen wir an, dass wir differenzierbare Funktionen brauchen. Um sicher zu sein, dass das Integral existiert, nehmen wir sogar an, dass u stetig differenzierbar ist.

Wenn man eine solche minimierende Funktion u hat, kann man versuchen einige Eigenschaften zu finden. Eine grobe Herleitung geht wie folgt. Stört man die minimierende Kurve u ein wenig, sagen wir durch $\tau\varphi(x)$, wobei φ eine Störungsfunktion und $\tau \in \mathbb{R}$ ein Parameter ist, dann soll gelten

$$T(u + \tau\varphi) \geq T(u).$$

Wenn man $\tau \mapsto T(u + \tau\varphi)$ ableiten kann, folgt für dieses u und für alle φ , die erlaubt sind, weil diese Funktion für $\tau = 0$ ein Minimum haben soll, dass

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T(u + \tau\varphi) = 0 \text{ für } \tau = 0.$$

Da $u(0) = 0$ und $u(6) = 1$ erhalten bleiben sollen für $u + \tau\varphi$, müssen die Randwerte $\varphi(0) = \varphi(6) = 0$ gelten. Es folgt

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} T(u + \tau\varphi) &= \frac{1}{\sqrt{2g}} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^6 \sqrt{\frac{1 + (u'(x) + \tau\varphi'(x))^2}{u(x) + \tau\varphi(x)}} dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2g}} \int_0^6 \left(\frac{(u'(x) + \tau\varphi'(x))}{\sqrt{u(x) + \tau\varphi(x)} \sqrt{1 + (u'(x) + \tau\varphi'(x))^2}} \varphi'(x) - \frac{(1 + (u'(x) + \tau\varphi'(x))^2)^{\frac{1}{2}}}{2(u(x) + \tau\varphi(x))^{\frac{3}{2}}} \varphi(x) \right) dx. \end{aligned}$$

Für $\tau = 0$ folgt

$$\int_0^6 \left(\frac{u'(x)}{\sqrt{u(x)} \sqrt{1 + (u'(x))^2}} \varphi'(x) - \frac{(1 + (u'(x))^2)^{\frac{1}{2}}}{2(u(x))^{\frac{3}{2}}} \varphi(x) \right) dx = 0.$$

Wenn wir jetzt annehmen, dass u sogar zweimal stetig differenzierbar ist, können wir partiell integrieren und finden

$$\begin{aligned} 0 &= \int_0^6 \left(\frac{u'(x)}{\sqrt{u(x)} \sqrt{1 + (u'(x))^2}} \varphi'(x) - \frac{\sqrt{1 + (u'(x))^2}}{2(u(x))^{\frac{3}{2}}} \varphi(x) \right) dx \\ &= \left[\frac{u'(x)}{\sqrt{u(x)} \sqrt{1 + (u'(x))^2}} \varphi(x) \right]_0^6 + \int_0^6 \left(- \left(\frac{u'(x)}{\sqrt{u(x)} \sqrt{1 + (u'(x))^2}} \right)' - \frac{\sqrt{1 + (u'(x))^2}}{2(u(x))^{\frac{3}{2}}} \right) \varphi(x) dx. \end{aligned}$$

Verwenden wir $\varphi(0) = \varphi(6) = 0$, so folgt

$$\int_0^6 \left(- \left(\frac{u'(x)}{\sqrt{u(x)} \sqrt{1+(u'(x))^2}} \right)' - \frac{\sqrt{1+(u'(x))^2}}{2(u(x))^{\frac{3}{2}}} \right) \varphi(x) dx = 0. \quad (1.3)$$

Wenn $v \in C[a, b]$ derartig ist, dass

$$\int_a^b v(x) \varphi(x) dx = 0 \text{ für alle } \varphi \in C[a, b], \quad (1.4)$$

dann gilt $v \equiv 0$, und damit folgt, dass

$$- \left(\frac{u'}{\sqrt{u} \sqrt{1+u'^2}} \right)' - \frac{\sqrt{1+u'^2}}{2u^{3/2}} = 0, \quad (1.5)$$

wenn man annimmt, dass der Ausdruck zwischen den Klammern in (1.3) stetig ist.

Wir sehen, dass die Variation des Energiefunktional eine Differentialgleichung liefert.

Lösung der Differentialgleichung

Um die Geschichte zu vervollständigen, zeigen wir hier noch kurz, wie man (1.5) mehr oder weniger explizit lösen kann.

Man kann (1.5) auch schreiben als

$$\left[\frac{\sqrt{1+u'^2}}{\sqrt{u}} - \left(\frac{u'}{\sqrt{u} \sqrt{1+u'^2}} \right) u' \right]' = \left(-\frac{\sqrt{1+u'^2}}{2u^{3/2}} - \left(\frac{u'}{\sqrt{u} \sqrt{1+u'^2}} \right)' \right) u' = 0,$$

und weil

$$\frac{\sqrt{1+u'^2}}{\sqrt{u}} - \left(\frac{u'}{\sqrt{u} \sqrt{1+u'^2}} \right) u' = \frac{1}{\sqrt{u} \sqrt{1+u'^2}},$$

folgt

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{u} \sqrt{1+u'^2}}.$$

Daraus wird eine trennbare Differentialgleichung ($C_2 = C_1^{-2} > 0$)

$$\sqrt{\frac{u}{C_2 - u}} u' = \pm 1$$

mit Anfangswert $u(0) = 0$. Eine Lösung in Parameterform ist eine Zykloide:

$$\begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix} = \frac{1}{2} C_2 \begin{pmatrix} s - \sin(s) \\ 1 - \cos(s) \end{pmatrix}.$$

Kontrolle ergibt

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{u}{C_2 - u}} u' &= \sqrt{\frac{u}{C_2 - u}} \frac{du}{ds} = \sqrt{\frac{1 - \cos(s)}{1 + \cos(s)}} \frac{\sin(s)}{1 - \cos(s)} = \\ &= \frac{\sin(s)}{\sqrt{1 - \cos(s)^2}} = \pm 1. \end{aligned}$$

Witzigerweise haben wir unterwegs einige Annahmen gemacht, nämlich dass die Lösung zweimal stetig differenzierbar ist. Zwar sind $t \mapsto x(t)$ und $t \mapsto u(x(t))$ stetig differenzierbar und das ist sehr angenehm, wenn man auf der Achterbahn fährt, jedoch ist $x \mapsto u(x)$ nicht differenzierbar in 0.

Aufgabe 1 Welche Kurve macht die schnellste Verbindung, wenn man anfängt mit Geschwindigkeit $|\vec{v}| = 1$?

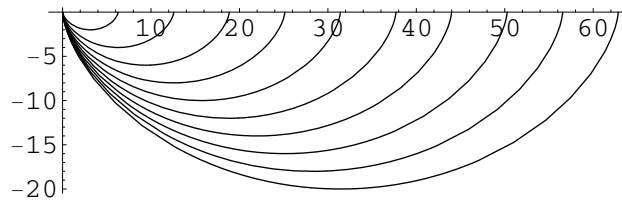


Abbildung 1.2: Aus dieser Familie sucht man sich jetzt die Funktion, bei der die Randbedingung $u(6) = -1$ erfüllt ist ...

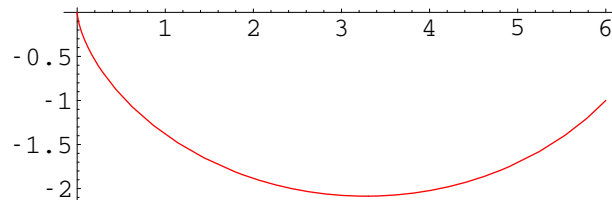


Abbildung 1.3: ... und sollte diese Funktion finden.

1.1.1 Zweck und Ziel der Variationsrechnung

Gegeben sei ein Funktional $J : \mathcal{B} \mapsto \mathbb{R}$

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u(x), Du(x)) \, dx. \quad (1.6)$$

Hier sind $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, $\mathcal{B} = \{u : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \text{ passende Funktionen}\}$ und $F : \Omega \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ eine genügend glatte Funktion. Mit D ist die Ableitung gemeint; im mehr-dimensionalen Fall wäre es der Gradient.

Die generische Aufgabe in der Variationsrechnung ist es, eine solche Funktion u zu finden, dass J in u einen stationären Punkt hat. Meistens sucht man ein Minimum und das passt genau zum Prinzip der minimalen Energie aus der Physik.

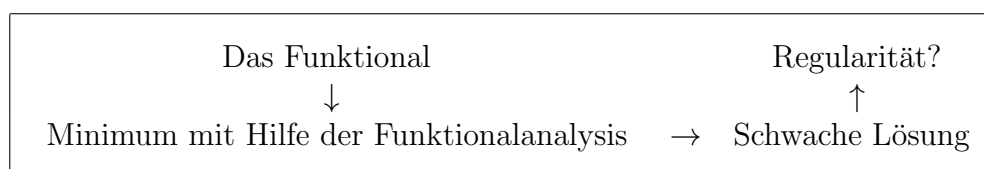
Das Finden einer solchen Funktion besteht meistens nicht aus der Konstruktion einer expliziten Formel, sondern beschäftigt sich eher mit Existenz, Eindeutigkeit und möglichen Regularitätseigenschaften einer solchen Lösung.

Grob gesagt gibt es zwei Richtungen in der Variationsrechnung.

- Die klassische Variationsrechnung.



- Die direkten Methoden.



Eine reguläre Lösung ist eine Funktion, die die Differentialgleichung im klassischen Sinne erfüllt. Bei vielen Anwendungen existiert so eine Lösung nicht. Eine schwache Lösung ist eine Verallgemeinerung, die breitere Anwendungsmöglichkeiten hat.

In der Numerik sind *Finite Differenzen* meistens mit den klassischen Methoden verbunden, während *Finite Elemente* oft die direkten Methoden benutzen.

1.2 Räume stetiger Funktionen

Notation 1.2.1 Sei A eine Menge.

1. $C(A) = \{u : A \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ stetig}\}$ ist der Vektorraum der stetigen Funktionen.
2. $C_b(A) = \{u : A \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ stetig}\}$ ist der Vektorraum der beschränkten stetigen Funktionen.
3. $C_c(A) = \{u : A \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ stetig}\}$ ist der Vektorraum der stetigen Funktionen mit kompaktem Träger K strikt innerhalb A , genauer gesagt,

$$\overline{\{u(x) \neq 0\}} =: K \subset A^\circ.$$

4. $C_0(A) = \{u : A \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ stetig}\}$ ist der Vektorraum der stetigen Funktionen, die am Rand 0 werden, genauer gesagt, für die gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} u(x_n) = 0$$

für alle Folgen $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \Omega$ mit $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x^* \in \partial\Omega$ oder $\lim_{n \rightarrow \infty} \|x_n\| = \infty$.

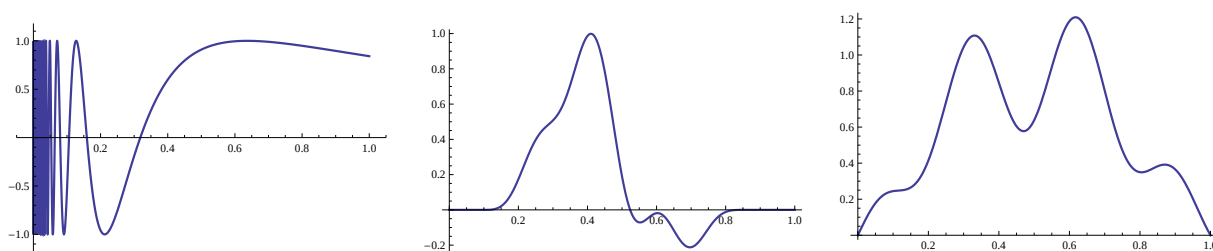


Abbildung 1.4: Graphen einiger Funktionen aus $C_b((0,1))$, $C_c([0,1])$ bzw. $C_0([0,1])$.

Bemerkung 1.2.2 In der Literatur sind die Notationen nicht eindeutig. Manchmal wird mit $C(A)$ eigentlich $C_b(A)$ gemeint und mit $C_0(A)$ der Raum $C_c(A)$.

Wenn nur bekannt ist, dass $A \subset \mathbb{R}^n$, dann hat $C(A)$ noch wenig Struktur. Wenn jedoch A kompakt ist, dann weiß man, dass jede stetige Funktion auf A beschränkt und gleichmäßig stetig ist. Auf ein Kompaktum ist das Supremum einer stetigen Funktion auch das Maximum. Weil das Supremum so endlich ist, kann man so eine Norm definieren und sogar beweisen, dass dieser Normierter Raum gute Eigenschaften hat:

Theorem 1.2.3 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet¹. Dann ist $\left(C(\bar{\Omega}), \|\cdot\|_{C(\bar{\Omega})}\right)$ mit der Norm definiert durch

$$\|u\|_{C(\bar{\Omega})} := \|u\|_{\infty} = \sup_{x \in \bar{\Omega}} |u(x)|$$

ein Banachraum.

Bemerkung 1.2.4 $\|\cdot\|_X : X \rightarrow [0, \infty)$ heißt eine Norm auf X , wenn

1. $\|u\|_X \geq 0$ und $\|u\|_X = 0 \Leftrightarrow u = 0$ für alle $u \in X$;
2. $\|cu\|_X = |c| \|u\|_X$ für alle $u \in X$ und $c \in \mathbb{R} (\mathbb{C})$;
3. $\|u + v\|_X \leq \|u\|_X + \|v\|_X$ für alle $u, v \in X$.

Bemerkung 1.2.5 Ein Banachraum ist ein vollständiger normierter Vektorraum.

Bemerkung 1.2.6 Ein normierter Vektorraum ist vollständig, wenn jede Cauchy-Folge auch konvergent ist mit Grenzwert in dem Raum.

Beweis

- $\left(C(\bar{\Omega}), \|\cdot\|_{C(\bar{\Omega})}\right)$ ist ein normierter Vektorraum:

Sei $u \in C(\bar{\Omega})$. Weil $\bar{\Omega}$ kompakt ist, existiert $\max_{x \in \bar{\Omega}} |u(x)|$ in $\mathbb{R}$ und

$$\|u\|_{\infty} = \max_{x \in \bar{\Omega}} |u(x)| < \infty.$$

Die weiteren Eigenschaften der Norm zeigt man sofort.

- $\left(C(\bar{\Omega}), \|\cdot\|_{C(\bar{\Omega})}\right)$ ist vollständig:

Nehmen wir eine Cauchy-Folge $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ und sei $\varepsilon > 0$. Dann gibt es $N_{\varepsilon} \in \mathbb{N}$ derart, dass $n, m \geq N_{\varepsilon}$ impliziert $\|u_n - u_m\|_{\infty} < \varepsilon$. Dann ist auch $\{u_n(x)\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge, diesmal in $\mathbb{R}$, und weil $\mathbb{R}$ vollständig ist, existiert

$$U(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} u_n(x).$$

Als nächstes zeigen wir, dass U stetig ist. Nehmen wir an, U ist nicht stetig auf $\bar{\Omega}$. Dann gibt es $x \in \bar{\Omega}$, $\varepsilon_0 > 0$, und eine Folge $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ mit $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$ und $|U(x_n) - U(x)| > \varepsilon_0$. Im ersten Schritt legen wir $n_1 \in \mathbb{N}$ wie folgt fest: n_1 ist derart, dass für $n, m \geq n_1$ gilt $\|u_n - u_m\|_{\infty} < \varepsilon_0/4$. Weil u_{n_1} stetig ist, gibt es δ_0 derart, dass für $|x_n - x| < \delta_0$ gilt $|u_{n_1}(x_n) - u_{n_1}(x)| < \varepsilon_0/4$. Man findet für $|x_n - x| < \delta$ und alle $k, m \geq n_1$, dass

$$\begin{aligned} & |u_k(x_n) - u_m(x)| \leq \\ & \leq |u_k(x_n) - u_{n_1}(x_n)| + |u_{n_1}(x_n) - u_{n_1}(x)| + |u_{n_1}(x) - u_m(x)| < \frac{3}{4}\varepsilon_0. \end{aligned}$$

Nehmen wir nun ein solches x_n mit $|x_n - x| < \delta$ und weil $u_k(x_n) \rightarrow U(x_n)$ für $k \rightarrow \infty$ und weil auch $u_m(x) \rightarrow U(x)$ für $m \rightarrow \infty$, folgt $|U(x_n) - U(x)| < \frac{3}{4}\varepsilon_0$, ein Widerspruch.

¹Die Menge $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ heißt ein Gebiet (in englisch *domain*), wenn Ω offen und zusammenhängend ist.

- Zum Schluss soll man noch zeigen, dass $\lim_{n \rightarrow \infty} \|U - u_n\| = 0$. Auch dies folgt aus der Dreiecksungleichung: für jedes $x \in \bar{\Omega}$ findet man

$$\begin{aligned} |U(x) - u_n(x)| &\leq |U(x) - u_m(x)| + |u_m(x) - u_n(x)| \\ &\leq |U(x) - u_m(x)| + \|u_m - u_n\|. \end{aligned}$$

Sei $\varepsilon > 0$, nehme N derart, dass für $n, m \geq N$ folgt $\|u_m - u_n\| < \frac{1}{2}\varepsilon$. Als Nächstes bläst man m auf um $|U(x) - u_m(x)| < \frac{1}{2}\varepsilon$ zu finden. Für jedes $x \in \bar{\Omega}$ und $n \geq N$ folgt $|U(x) - u_n(x)| < \varepsilon$, also auch $\|U - u_n\| < \varepsilon$. ■

Es sei nochmals bemerkt, dass Normkonvergenz eine stärkere Bedingung ist als die punktweise Konvergenz. Betrachten Sie die Funktionenfolge $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset C[0, 1]$ definiert durch $u_n(x) = \frac{nx}{1+n^2x^2}$. Es gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n(x) = 0$ für alle $x \in [0, 1]$ aber auch $\lim_{n \rightarrow \infty} \|u_n - 0\| = 1$. Diese Folge konvergiert nicht bezüglich der Norm. Wenn ein Grenzwert u_∞ bezüglich der Norm existieren würde, würde aus $\|u_\infty - u_n\| \rightarrow 0$ folgen, dass $|u_\infty(x) - u_n(x)| \rightarrow 0$ und findet man, dass auch nur $u_\infty = 0$ als Grenzwert im Frage käme.

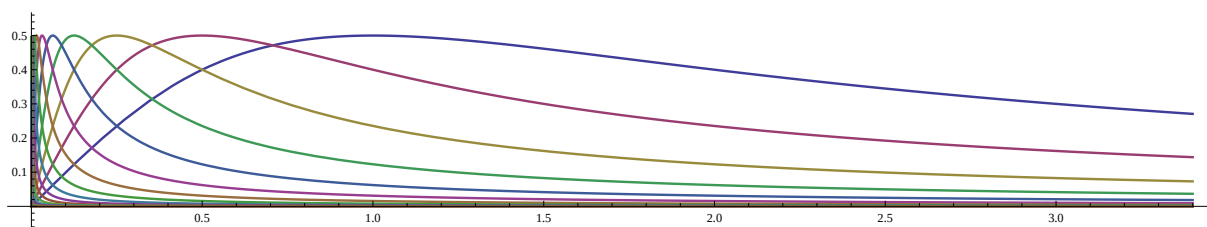


Abbildung 1.5: Die Funktionenfolge $x \mapsto \frac{nx}{1+n^2x^2}$ konvergiert nicht in der $\|\cdot\|_{C([0,1])}$ -Norm.

Aufgabe 2 Wieso ist $\|\cdot\|_\infty$ keine Norm für die stetigen Funktionen auf ein unbeschränktes $\bar{\Omega}$?

Aufgabe 3 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein unbeschränktes Gebiet. Ist $\|\cdot\|_\infty$ eine Norm für $C_b(\bar{\Omega})$?

1.3 Räume differenzierbarer Funktionen

Für einen Multiindex α , das heißt $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{N}^n$, setzt man

$$\begin{aligned} x^\alpha &= x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}, \\ D^\alpha &= \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} \right)^{\alpha_2} \dots \left(\frac{\partial}{\partial x_n} \right)^{\alpha_n}, \\ |\alpha| &= \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n. \end{aligned}$$

Um die Formulierungen für ein und allemal festzulegen, geben wir die folgende Definitionen. Auch hier ist Ω ein Gebiet in $\mathbb{R}^n$; $\bar{\Omega}$ ist die zugehörige abgeschlossene Menge.

Definition 1.3.1 Vektorräume stetiger und differenzierbarer Funktionen auf offenen Mengen.

1. $C^1(\Omega) = \left\{ u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ ist differenzierbar und } \frac{\partial u}{\partial x_i} \in C(\Omega) \text{ für } i = 1, \dots, n \right\}.$
2. $C^k(\Omega) = \left\{ u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ ist differenzierbar und } \frac{\partial u}{\partial x_i} \in C^{k-1}(\Omega) \text{ für } i = 1, \dots, n \right\}.$

Bemerkung 1.3.2 Manchmal sieht man auch $C^\infty(\Omega) := \bigcap_{k \geq 1} C^k(\Omega)$.

Definition 1.3.3 Vektorräume stetiger und differenzierbarer Funktionen auf abgeschlossenen Mengen.

1. $C^1(\bar{\Omega}) = \left\{ u : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ ist differenzierbar und} \right.$
 $\left. \text{es gibt } g_i \in C(\bar{\Omega}) \text{ derart, dass } \frac{\partial u}{\partial x_i} = g_i \text{ für } i = 1, \dots, n \right\}.$
2. $C^k(\bar{\Omega}) = \left\{ u : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ ist differenzierbar und} \right.$
 $\left. \text{es gibt } g_i \in C^{k-1}(\bar{\Omega}) \text{ derart, dass } \frac{\partial u}{\partial x_i} = g_i \text{ für } i = 1, \dots, n \right\}.$

Auch hier kann man wieder die Buchstaben b, c oder 0 unten anhängen. Zum Beispiel definiert man, wenn Ω beschränkt ist,

$$C_0^1(\bar{\Omega}) = \left\{ u \in C^1(\bar{\Omega}); u|_{\partial\Omega} = 0 \text{ und } |\nabla u|_{\partial\Omega} = 0 \right\}.$$

Schreibt man $C^0(\bar{\Omega})$, dann ist $C(\bar{\Omega})$ gemeint.

Auf Intervallen braucht man auch mal Funktionen, die stückweise differenzierbar sind. Zum Beispiel

$$C_{pc}^2[a, b] = \left\{ u \in C^1[a, b]; \text{ es gibt } a = a_0 < a_1 < \dots < a_{k+1} = b \right.$$

$$\left. \text{mit } u|_{[a_i, a_{i+1}]} \in C^2[a_i, a_{i+1}] \text{ für } i = 0, \dots, k \right\}.$$

Lemma 1.3.4 Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$. Einige normierte Vektorräume sind:

1. Die stetig differenzierbaren Funktionen $(C^1(\bar{\Omega}), \|\cdot\|_{C^1(\bar{\Omega})})$, wobei die Norm definiert wird durch

$$\|u\|_{C^1(\bar{\Omega})} = \|u\|_\infty + \sum_{i=1}^n \left\| \frac{\partial}{\partial x_i} u \right\|_\infty,$$

und iterativ

2. Die k -mal stetig differenzierbaren Funktionen $(C^k(\bar{\Omega}), \|\cdot\|_{C^k(\bar{\Omega})})$, wobei die Norm definiert wird durch

$$\|u\|_{C^k(\bar{\Omega})} = \|u\|_\infty + \sum_{i=1}^n \left\| \frac{\partial}{\partial x_i} u \right\|_{C^{k-1}(\bar{\Omega})}. \quad (1.7)$$

Die Ableitungen sind hier wie in Definition 1.3.3 definiert. Man kontrolliert sofort, dass die Eigenschaften einer Norm erfüllt sind für $\|\cdot\|_{C^k(\bar{\Omega})}$.

Theorem 1.3.5 Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ und $k \in \mathbb{N}$. Dann ist $(C^k(\bar{\Omega}), \|\cdot\|_{C^k(\bar{\Omega})})$ ein Banachraum.

Um dieses Ergebnis zu beweisen, verwendet man Theorem 1.2.3. Zusätzlich soll man jedoch noch zeigen, dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} u_n(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lim_{n \rightarrow \infty} u_n(x) \right).$$

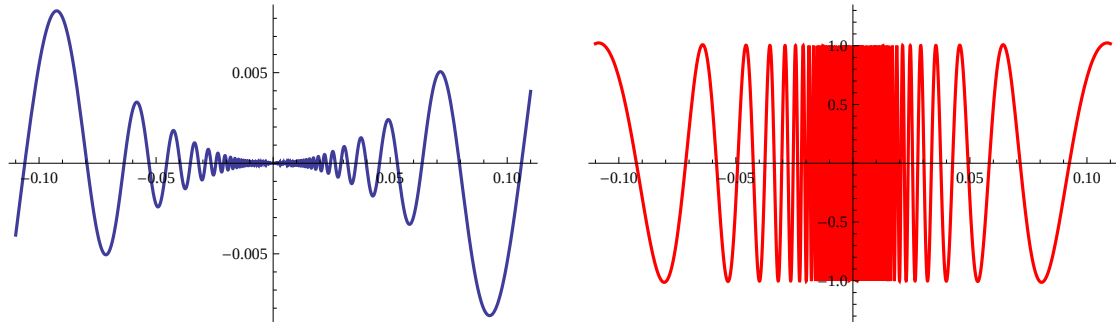


Abbildung 1.6: Die Funktion f mit $f(x) = x^2 \sin(\frac{1}{x})$ für $x \in [-1, 1] \setminus \{0\}$ und $f(0) = 0$ ist zwar differenzierbar, weil jedoch die Ableitung nicht stetig ist, folgt $f \notin C^1([-1, 1])$. Links ist f dargestellt und rechts f' .

1.4 Hölder-Räume

Zwischen $C^k(\bar{\Omega})$ und $C^{k+1}(\bar{\Omega})$ liegen auch noch die Hölder-Räume:

Definition 1.4.1 Für $\gamma \in (0, 1]$ und $u : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}$ definiert man

$$[u]_\gamma = \sup_{x \neq y \in \bar{\Omega}} \frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\gamma}. \quad (1.8)$$

1. $C^{0,\gamma}(\bar{\Omega}) = \left\{ u : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}; u \text{ stetig und } [u]_\gamma \text{ beschränkt} \right\}.$
2. $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) = \left\{ u : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}; u \in C^k(\bar{\Omega}) \text{ und } D^\alpha u \in C^{0,\gamma}(\bar{\Omega}) \text{ für } |\alpha| \leq k \right\}.$

Bemerkung 1.4.2 $C^{0,1}(\bar{\Omega})$ sind die Lipschitz-stetigen Funktionen.

Lemma 1.4.3 Sei Ω ein beschränktes Gebiet und sei $k \in \mathbb{N}$ und $\alpha, \beta \in (0, 1)$ mit $\alpha < \beta$. Dann gilt

$$C^{k+1}(\bar{\Omega}) \subset C^{k,1}(\bar{\Omega}) \subset C^{k,\beta}(\bar{\Omega}) \subset C^{k,\alpha}(\bar{\Omega}) \subset C^k(\bar{\Omega})$$

und alle Inklusionen sind strikt.

Beweis. Um die Inklusionen zu zeigen, benutzt man die folgenden Ungleichungen:

$$|\nabla u(x)| \leq \sup_{y \in \bar{\Omega}} \frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|} \text{ und}$$

$$\frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\alpha} = \frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\beta} |x - y|^{\beta - \alpha} \leq \text{diam}(\Omega)^{\beta - \alpha} \frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\beta}.$$

Beispiele die zeigen, dass die Inklusionen strikt sind, bekommt man für Funktionen auf $[-1, 1]$, indem man den Exponent p in $x \mapsto \max(0, x)^p$ geschickt wählt. ■

Das nächste Ergebnis werden wir nicht beweisen.

Theorem 1.4.4 Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$, $k \in \mathbb{N}$ und $\gamma \in (0, 1]$. Der Vektorraum $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})$ mit der Norm $\|\cdot\|_{C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})}$, definiert durch

$$\|u\|_{C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})} = \sum_{|\alpha| \leq k} \|D^\alpha u\|_\infty + \sum_{|\alpha|=k} [D^\alpha u]_\gamma \quad (1.9)$$

ist ein Banachraum.

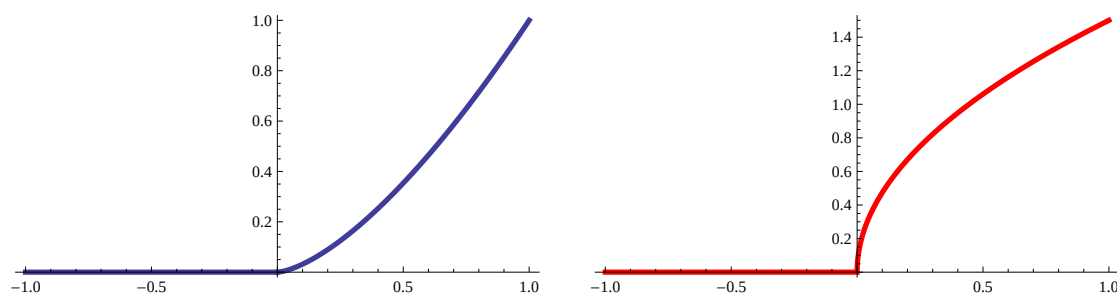


Abbildung 1.7: Links $f(x) = (\max(0, x))^{3/2}$ und rechts f' . Es gilt $f \in C^{1, \frac{1}{2}}([-1, 1])$ und $f' \in C^{0, \frac{1}{2}}([-1, 1])$.

1.5 Differenzierbarkeit eines Funktional

Wie man bei der Brachystochrone gesehen hat, war es der erste Schritt um ein Minimum für

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u(x), Du(x)) \, dx \quad (1.10)$$

zu finden, die Gleichung $\frac{\partial}{\partial \tau} J(u + \tau \varphi)|_{\tau=0} = 0$ anzuschauen.

Definition 1.5.1 Das Funktional $J : X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Gâteaux-differenzierbar in $u \in X$, wenn

1. $\frac{\partial}{\partial \tau} J(u + \tau \varphi)|_{\tau=0}$ existiert für alle $\varphi \in X$ und
2. $J'(u) := (\varphi \mapsto \frac{\partial}{\partial \tau} J(u + \tau \varphi)|_{\tau=0}) : X \rightarrow \mathbb{R}$ stetig ist.

Bemerkung 1.5.2 Das letzte soll man wie folgt lesen: $\varphi \mapsto J'(u)(\varphi) : X \rightarrow \mathbb{R}$ ist stetig. Es hat nichts mit möglicher Stetigkeit von $u \mapsto J'(u)$ zu tun.

Definition 1.5.3 Hat man zusätzlich die Bedingung

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0 \text{ in } X} \frac{|J(u + \varphi) - J(u) - J'(u)(\varphi)|}{\|\varphi\|_X} = 0,$$

dann heißt J Fréchet-differenzierbar in u .

Bemerkung 1.5.4 Gâteaux-differenzierbar, kann man beschreiben wie: J ist in u differenzierbar in jede Richtung φ und diese Richtungsableitungen sind stetig abhängig von der Richtung. In endlich dimensional Räumen ist Fréchet-differenzierbar die übliche Differenzierbarkeit.

Variationsrechnung

Kapitel 2



Die erste Variation

2.1 Definition der ersten Variation

Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ und $F : \Omega \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Für J in (1.10), also

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u(x), \nabla u(x)) dx \quad (2.1)$$

und wenn folgendes gilt:

1. $J(u)$ wohldefiniert ist, wie zum Beispiel für $u \in C^1(\bar{\Omega})$,
2. $(u, p) \mapsto F(x, u, p)$ als reelle Funktion differenzierbar ist, und
3. die Ableitung mit φ auch noch Sinn macht, wie zum Beispiel für $\varphi \in C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$,

dann finden wir, dass

$$\frac{\partial}{\partial \tau} J(u + \tau \varphi)|_{\tau=0} = \int_{\Omega} (F_u(x, u, Du)\varphi + F_p(x, u, Du) \cdot D\varphi) dx. \quad (2.2)$$

In einer Dimension gilt $D\varphi = \varphi'$; in mehreren ($n \geq 2$) Dimensionen gilt $D\varphi = \nabla \varphi$, wobei ∇ der Gradient ist. Das Symbol ∇ wird „nabla“ genannt¹:

$$\nabla \varphi = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \varphi \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} \varphi \end{pmatrix}.$$

Der Spaltenvektor $\nabla \varphi$ wird aus Platzgründen oft als Zeilenvektor geschrieben. Es gibt auch die Divergenz $\nabla \cdot$:

$$\nabla \cdot \begin{pmatrix} v_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ v_n(x_1, \dots, x_n) \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial v_i}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n).$$

Für $\nabla \cdot$ schreibt man oft auch einfach ∇ und aus dem Kontext muss man herausfinden, ob Gradient oder Divergenz gemeint ist.

¹Nabla soll ein hebräisches Wort für eine Art von Harfe sein und diese Harfe sieht aus wie ∇ .



Definition 2.1.1 Sei F und J wie in (2.1). Das Funktional

$$\partial J(u; \varphi) := \frac{\partial}{\partial \tau} J(u + \tau \varphi)|_{\tau=0}$$

aus (2.2) heißt die erste Variation von J in der Richtung φ .

Wenn die Funktion u ein Minimum von J liefert und J Gateaux-differenzierbar ist, also $\partial J(u; \varphi) = J'(u)(\varphi)$, folgt $\partial J(u; \varphi) = 0$ oder anders gesagt, es gilt die Identität

$$\int_{\Omega} (F_u(x, u, Du)\varphi + F_p(x, u, Du) \cdot D\varphi) \, dx = 0. \quad (2.3)$$

Abhängig vom Problem gilt (2.3) für alle Funktionen $\varphi \in C^1(\bar{\Omega})$ oder $\varphi \in C_0^1(\bar{\Omega})$ oder sogar $\varphi \in C_c^\infty(\Omega)$. Die Integralgleichung (2.3) für alle φ aus der Klasse der Testfunktionen wird die *schwache Form der Euler-Lagrange Gleichung* für J genannt.

Wie gesagt, die Klasse von Funktionen φ ist abhängig vom Problem, zum Beispiel von den Randwerten. Bei der Brachystochrone waren die Randwerte von u festgelegt und es wäre $\varphi \in C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$ passend. $C_c^\infty(\Omega)$ ist eine Teilmenge davon und wir werden zeigen, dass diese Funktionen meistens schon reichen um vom Variationsproblem zur Differentialgleichung zu gelangen.

Wenn wir annehmen, dass die betreffenden Funktionen genügend glatt sind, kann man (2.3) partiell integrieren²:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (F_u(x, u, Du)\varphi + F_p(x, u, Du) \cdot D\varphi) \, dx = \\ & \int_{\partial\Omega} F_p(x, u, Du) \varphi \vec{\nu} d\sigma + \int_{\Omega} \left(F_u(x, u, Du) - \sum_{i=1}^n \frac{d}{dx_i} \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(x, u, Du) \right) \right) \varphi \, dx. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Wenn $\varphi \in C_0(\bar{\Omega})$ gilt, ist das Randintegral gleich 0 und es folgt aus (2.3-2.4), dass

$$\int_{\Omega} \left(F_u(x, u, Du) - \sum_{i=1}^n \frac{d}{dx_i} \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(x, u, Du) \right) \right) \varphi \, dx = 0$$

²Die partielle Integration auf $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ist wie folgt. Sei $\vec{\nu}$ der auswärtige Normalenvektor auf $\partial\Omega$. Dann gilt für (zweimal) differenzierbare Funktionen $u, v : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}$ und $\vec{\nu} : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^n$, dass

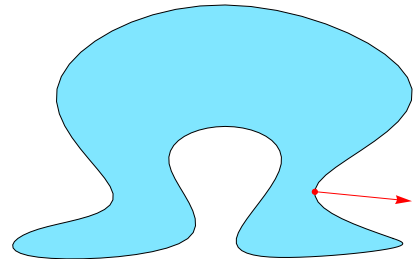
$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \frac{\partial u}{\partial x_i} v \, dx &= \int_{\partial\Omega} uv \, \nu_i \, d\sigma - \int_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial x_i} \, dx, \\ \int_{\Omega} \nabla u \cdot \vec{\nu} \, dx &= \int_{\partial\Omega} u \vec{\nu} \cdot \vec{\nu} \, d\sigma - \int_{\Omega} u \nabla \cdot \vec{\nu} \, dx, \end{aligned}$$

$$\int_{\Omega} \Delta u \, v \, dx = \int_{\partial\Omega} (\nabla u \cdot \vec{\nu} - u \nabla \cdot \vec{\nu}) \, d\sigma + \int_{\Omega} u \Delta v \, dx.$$

Weil $\nabla u \cdot \vec{\nu} = \frac{\partial u}{\partial \nu}$ gilt, kann man die letzte Gleichung auch wie folgt schreiben:

$$\int_{\Omega} \Delta u \, v \, dx = \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u}{\partial \nu} v - u \frac{\partial v}{\partial \nu} \right) d\sigma + \int_{\Omega} u \Delta v \, dx.$$

Für Beweise suche man in der Literatur nach Greenschen Formeln.



Nehmen wir an, die Formel zwischen den Klammern ist stetig, dann folgt

$$F_u(x, u, Du) - \sum_{i=1}^n \frac{d}{dx_i} \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(x, u, Du) \right) = 0. \quad (2.5)$$

In einer Dimension wird dies

$$F_u(x, u, u') - F_{px}(x, u, u') - u' F_{pu}(x, u, u') - u'' F_{pp}(x, u, u') = 0$$

und in mehreren Dimensionen

$$F_u(x, u, Du) - \sum_{i=1}^n F_{p_i x_i}(x, u, Du) - \nabla u \cdot F_{pu}(x, u, Du) - \sum_{i,j} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} \frac{\partial^2 F}{\partial p_j \partial p_i}(x, u, Du) = 0, \quad (2.6)$$

die sogenannte *starke Form der Euler-Lagrange Gleichung* für J .

2.2 Das erste Hauptlemma der Variationsrechnung

Schon ein paar Mal haben wir aus einer Integralgleichung mit Testfunktionen eine punktweise Gleichung hergeleitet. Wir formulieren das als nächstes. Auch hier ist Ω ein Gebiet in $\mathbb{R}^n$, dass heißt Ω ist offen und zusammenhängend.

Lemma 2.2.1 Sei $u \in C(\bar{\Omega})$ und nehme an, dass

$$\int_{\Omega} u(x) \varphi(x) \, dx = 0 \text{ für alle } \varphi \in C_c^\infty(\Omega). \quad (2.7)$$

Dann gilt $u \equiv 0$.

Bemerkung 2.2.2 Dieses Lemma gilt auch noch unter wesentlich schwächeren Bedingungen. Statt $u \in C(\bar{\Omega})$ reicht schon $u \in L^p(\Omega)$.

Beweis. Nehme an, $u(x_0) > 0$ gilt für ein $x_0 \in \Omega$. Weil u stetig ist, gibt es eine Umgebung $B_\varepsilon(x_0) := \{x \in \mathbb{R}^n; |x - x_0| < \varepsilon\}$ mit $B_{2\varepsilon}(x_0) \subset \Omega$ und $u(x) \geq \frac{1}{2}u(x_0) > 0$ auf $B_\varepsilon(x_0)$. Definiere

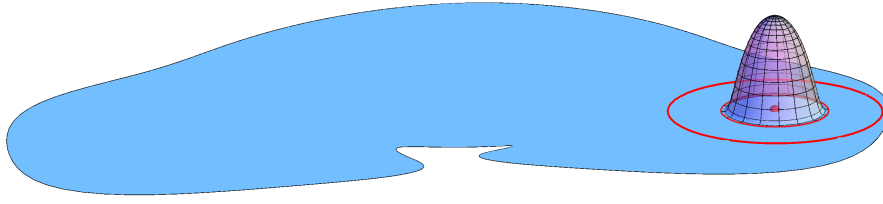
$$\varphi(x) = \begin{cases} e^{\frac{-1}{\varepsilon^2 - |x - x_0|^2}} & \text{für } x \in B_\varepsilon(x_0), \\ 0 & \text{für } x \in \Omega \setminus B_\varepsilon(x_0). \end{cases} \quad (2.8)$$

Man zeigt, dass $\varphi \in C_c^\infty(\Omega)$ und weil

$$\int_{\Omega} u(x) \varphi(x) \, dx = \int_{B_\varepsilon(x_0)} u(x) \varphi(x) \, dx \geq \frac{1}{2} u(x_0) \int_{B_\varepsilon(x_0)} \varphi(x) \, dx > 0$$

gilt, folgt der Widerspruch. ■

Aufgabe 4 Zeige, dass die Funktion φ aus (2.8) in $C_c^\infty(\Omega)$ liegt.

Abbildung 2.1: Ω , $B_\varepsilon(x_0)$, $B_{2\varepsilon}(x_0)$ und Testfunktion φ .

2.3 Satz beim Minimierungsproblem

Theorem 2.3.1 Sei $F \in C^2(\bar{\Omega} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$ und definiere für $u \in C^1(\bar{\Omega})$ das Funktional

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u, Du) dx.$$

Sei $\mathcal{C} \subset C^1(\bar{\Omega})$ derart, dass es für jedes $u \in \mathcal{C}$ und $\varphi \in C_c^\infty(\Omega)$ ein $\varepsilon > 0$ gibt mit $u + t\varphi \in \mathcal{C}$ für alle $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$.

Wenn $J : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}$ ein globales Minimum in $\tilde{u}$ hat und $\tilde{u} \in C^2(\bar{\Omega})$, dann erfüllt $\tilde{u}$ die Euler-Lagrange Gleichung:

$$\nabla_x \cdot F_p(x, \tilde{u}(x), D\tilde{u}(x)) - F_u(x, \tilde{u}(x), D\tilde{u}(x)) = 0 \text{ für alle } x \in \bar{\Omega}. \quad (2.9)$$

Beweis. Man folge der Geschichte vom Paragraph 2.1 und benutzte Lemma 2.2.1. ■

2.4 Minimalfläche

Wenn man den Flächeninhalt einer durch $\Psi(x, y) = (x, y, u(x, y)) : \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ parametrisierten Oberfläche betrachtet, dann wird dieser Inhalt gegeben durch

$$I(u) = \int_{\Omega} \sqrt{\det \begin{pmatrix} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \Psi}{\partial x} & \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \Psi}{\partial x} & \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \end{pmatrix}} dx dy.$$

Man berechnet sofort, dass

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = (1, 0, u_x) \text{ und } \frac{\partial \Psi}{\partial y} = (0, 1, u_y),$$

und findet

$$\det \begin{pmatrix} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \Psi}{\partial x} & \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \Psi}{\partial x} & \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \end{pmatrix} = (1 + u_x^2)(1 + u_y^2) - (u_x u_y)^2 = 1 + |\nabla u|^2.$$

Also folgt

$$I(u) = \int_{\Omega} \sqrt{1 + |\nabla u|^2} dx dy.$$

Nehmen wir an, diese Oberfläche ist fixiert am Rand $\partial\Omega$ durch $u = v$.

Die erste Variation an der Stelle u ist

$$\frac{\partial}{\partial \tau} I(u + \tau\varphi)|_{\tau=0} = \int_{\Omega} \frac{\nabla u \cdot \nabla \varphi}{\sqrt{1 + |\nabla u|^2}} dx dy.$$

Weil u am Rand fixiert ist, können wir nur im Innern variieren. Nehmen wir $\varphi \in C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$, so folgt für ein Minimum $u \in C^2(\bar{\Omega})$, dass

$$0 = \int_{\Omega} \frac{\nabla u \cdot \nabla \varphi}{\sqrt{1 + |\nabla u|^2}} dx dy = - \int_{\Omega} \nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{\sqrt{1 + |\nabla u|^2}} \right) \varphi dx dy.$$

Dies liefert die Differentialgleichung für eine Minimalfläche:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{\sqrt{1 + |\nabla u|^2}} \right) = 0.$$

Für radialsymmetrische Randwertprobleme findet man eine gewöhnliche Differentialgleichung, die man sogar explizit lösen kann.

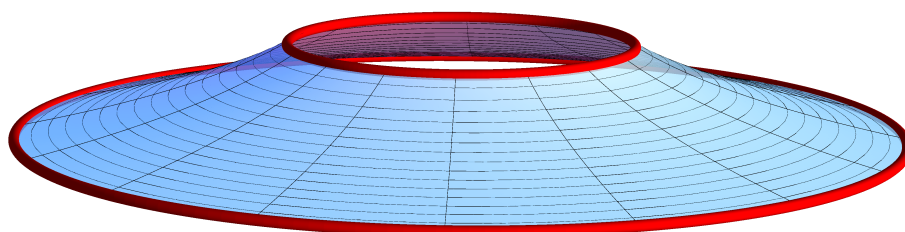


Abbildung 2.2: Bild zu der Minimalfläche zwischen zwei horizontalen Ringen, zentriert um die z -Achse.

2.5 Ein zweites Hauptlemma der Variationsrechnung

Obwohl wir hier an einer Dimension interessiert sind, geben wir das nächste Lemma gleich für ein Gebiet Ω in mehreren Dimensionen.

Lemma 2.5.1 Sei $u \in C(\bar{\Omega})$ und nehme an, dass

$$\int_{\Omega} u(x) \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}(x) dx = 0 \text{ für alle } \varphi \in C_c^\infty(\Omega) \text{ und } i = 1, \dots, n. \quad (2.10)$$

Dann gilt $u \equiv c$.

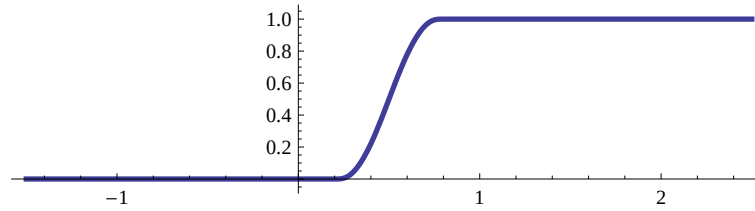
Bemerkung 2.5.2 Wenn man wüsste, dass $u \in C^1(\bar{\Omega})$ gilt, könnte man partiell integrieren und findet dann, dass

$$\int_{\Omega} \frac{\partial u}{\partial x_i}(x) \varphi(x) dx = - \int_{\Omega} u(x) \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}(x) dx = 0.$$

Mit Lemma 2.2.1 bekäme man $\frac{\partial u}{\partial x_i}(x) = 0$ und auch, dass $x_i \mapsto u(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ konstant wäre. Wenn dies in jede Richtung gilt, folgt das gewünschte Ergebnis.

Beweis. In einer Dimension geht es wie folgt. Fixiere irgendeine Funktion $\chi \in C^\infty(\mathbb{R})$, die die folgenden Eigenschaften hat

$$\begin{aligned} \chi(x) &= 0 \text{ für } x \leq \frac{1}{10} \quad \text{und} \quad \chi(x) = 1 \text{ für } x \geq \frac{9}{10}, \\ \chi'(x) &\geq 0 \text{ für } x \in \mathbb{R}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Abbildung 2.3: ein Bild von χ .

Sei $\varphi \in C_c^\infty(a, b)$ und definiere

$$\psi(x) = \int_a^x \varphi(s) ds - \chi\left(\frac{x-a}{b-a}\right) \int_a^b \varphi(s) ds.$$

Dann folgt $\psi(a) = 0 = \psi(b)$ und sogar, dass der Träger von ψ innerhalb (a, b) liegt. Also gilt auch $\psi \in C_c^\infty(a, b)$. Weiter hat man

$$\begin{aligned} 0 &= \int_a^b u(x) \psi'(x) dx = \int_a^b u(x) \left(\varphi(x) - \chi'\left(\frac{x-a}{b-a}\right) \frac{1}{b-a} \int_a^b \varphi(s) ds \right) dx = \\ &= \int_a^b \left(u(x) - \frac{1}{b-a} \int_a^b \chi'\left(\frac{s-a}{b-a}\right) u(s) ds \right) \varphi(x) dx \end{aligned}$$

und es folgt mit Lemma 2.2.1, dass

$$u(x) = \frac{1}{b-a} \int_a^b \chi'\left(\frac{s-a}{b-a}\right) u(s) ds = \text{konstant}.$$

In mehreren Dimensionen betrachtet man erst ein Rechteck R innerhalb Ω , und setze $R := [a, b] \times R' \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^{n-1}$. Für $\varphi \in C_c^\infty(R)$ nimmt man analog wie vorher,

$$\psi(x_1, x') = \int_a^{x_1} \varphi(s, x') ds - \chi\left(\frac{x_1-a}{b-a}\right) \int_a^b \varphi(s, x') ds.$$

Auch der Träger von ψ liegt innerhalb R und auf ähnliche Art wie vorher folgt, dass u nicht von x_1 abhängig ist, denn

$$u(x_1, x') = \frac{1}{b-a} \int_a^b \chi'\left(\frac{s-a}{b-a}\right) u(s, x') ds.$$

Genau so ist u auch nicht abhängig von den anderen Variablen; also gilt $u = c$ auf jedem Rechteck. Weil Ω offen und zusammenhängend ist, kann man Ω füllen mit offenen Rechtecken und es folgt, dass u konstant ist auf Ω . ■

Aufgabe 5 Konstruiere eine explizite Funktion χ derart, dass (2.11) erfüllt ist.

2.6 Regularität in einer Dimension

In der Formulierung des Theorems stört die Annahme $\tilde{u} \in C^2(\bar{\Omega})$. Für J braucht man ja nur $u \in C^1(\bar{\Omega})$ und es wäre schöner, wenn diese Eigenschaft folgen würde aus der Tatsache, dass $\tilde{u}$ ein Minimum ist.

2.6.1 Ein Satz von C^1 zu C^2

In einer Dimension können wir zeigen, dass ein Minimum in $C^1([a, b])$ unter einigen Annahmen bezüglich des Funktionals automatisch in $C^2([a, b])$ liegt. Wir schreiben $I = (a, b)$.

Theorem 2.6.1 Sei $F \in C^2(\bar{I} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R})$. Für $u \in C^1(\bar{I})$ betrachten wir das Funktional

$$J(u) = \int_I F(x, u, u') dx.$$

Sei $\mathcal{C} \subset C^1(\bar{I})$ derart, dass es für jedes $u \in \mathcal{C}$ und $\varphi \in C_c^\infty(I)$ ein $\varepsilon > 0$ gibt mit $u + t\varphi \in \mathcal{C}$ für alle $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$.

Wenn $J : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}$ ein globales Minimum $\tilde{u} \in C^1(\bar{I})$ hat und $F_{pp}(x, \tilde{u}(x), \tilde{u}'(x)) \neq 0$ gilt, dann folgt $\tilde{u} \in C^2(\bar{I})$.

Bemerkung 2.6.2 Wenn man den Beweis genau anschaut, sieht man, dass es schon reicht, statt $F \in C^2(\bar{I} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R})$ anzunehmen, dass

$$F, F_p, F_u, F_{px}, F_{pu}, F_{pp} \in C(\bar{I} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}).$$

Bemerkung 2.6.3 In $\mathcal{C}$ stecken die Randwerte. Wenn $u(a) = 1$ und $u(b) = 2$, dann nimmt man $\mathcal{C} = \{u \in C^1(\bar{I}); u(a) = 1, u(b) = 2\}$.

Beweis. Wie vorher zeigt man, dass für das Minimum die folgende Gleichung erfüllt ist für alle $\varphi \in C_c^\infty(I)$

$$\int_a^b (F_u(x, \tilde{u}, \tilde{u}') \varphi + F_p(x, \tilde{u}, \tilde{u}') \varphi') dx = 0.$$

Weil wir nicht wissen, dass $\tilde{u}'$ differenzierbar ist, können wir nicht partiell integrieren wie bei der Herleitung der starken Euler-Lagrange Gleichung. In einer anderen Richtung partiell integrieren geht schon und wir finden dann:

$$\int_a^b \left(F_p(x, \tilde{u}(x), \tilde{u}'(x)) - \int_a^x F_u(s, \tilde{u}(s), \tilde{u}'(s)) ds \right) \varphi'(x) dx = 0.$$

Mit Lemma 2.5.1 gibt es eine Konstante c so, dass

$$F_p(x, \tilde{u}(x), \tilde{u}'(x)) - \int_a^x F_u(s, \tilde{u}(s), \tilde{u}'(s)) ds = c \text{ für alle } x \in I. \quad (2.12)$$

Wegen der Stetigkeit gilt (2.12) sogar auf $\bar{I}$. Setzen wir

$$q(x) = c + \int_a^x F_u(s, \tilde{u}(s), \tilde{u}'(s)) ds.$$

Weil F_u und $\tilde{u}, \tilde{u}'$ stetig sind, gilt $x \mapsto F_u(x, \tilde{u}(x), \tilde{u}'(x)) \in C(\bar{I})$ und es folgt $q \in C^1(\bar{I})$. Durch (2.12) findet man

$$(x \mapsto F_p(x, \tilde{u}(x), \tilde{u}'(x))) \in C^1(\bar{I}). \quad (2.13)$$

Weil man auch angenommen hat, dass $F_{pp}(x, \tilde{u}(x), \tilde{u}'(x)) \neq 0$, kann man für jedes $x_0 \in \bar{I}$ die Gleichung

$$F_p(x, \tilde{u}(x), p) - q(x) = 0 \quad (2.14)$$

implizit lösen in einer Umgebung von (x_0, p_0) mit $p_0 = \tilde{u}'(x_0)$, sagen wir $p = P(x)$ ist derart, dass $F_p(x, \tilde{u}(x), P(x)) - q(x) = 0$. Der Satz über implizite Funktionen besagt sogar, dass $P \in C^1((x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon))$ für $\varepsilon > 0$ genügend klein und dass das Folgende gilt für all diese $x \in (x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon)$:

$$P'(x) = \frac{F_u(x, \tilde{u}(x), \tilde{u}'(x)) - F_{px}(x, \tilde{u}(x), P(x)) - F_{pu}(x, \tilde{u}(x), P(x)) \tilde{u}(x)}{F_{pp}(x, \tilde{u}(x), P(x))}.$$

Weil $p = P(x)$ die eindeutige Lösung von (2.14) in der Nähe von (x_0, p_0) ist und weil $p = \tilde{u}'(x)$ eine Lösung von (2.14) ist, folgt

$$\tilde{u}'(x) = P(x)$$

und $\tilde{u}' \in C^1((x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon))$ für jedes $x_0 \in \bar{I}$. Wir finden, dass $\tilde{u} \in C^2(I)$. Um zu zeigen, dass $\tilde{u} \in C^2(\bar{I})$ gilt, kann man sich überlegen, dass es auch eine einseitige Version des Satzes über implizite Funktionen gibt, die man in den Randpunkten anwenden kann. ■

Eigenartig in dem Beweis ist schon, dass erst bewiesen wird, dass

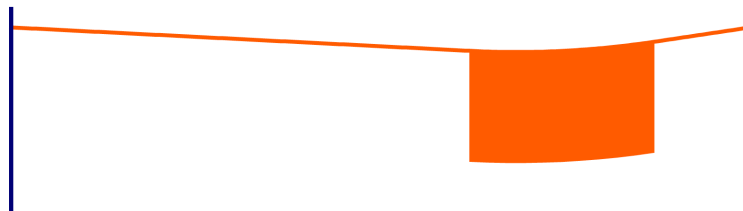
$$(x \mapsto F_p(x, \tilde{u}(x), \tilde{u}'(x))) \in C^1(\bar{I}),$$

obwohl man apriori bloß $\tilde{u}'(x) \in C^0(\bar{I})$ hat. Im Nachhinein folgt dann $\tilde{u}'(x) \in C^1(\bar{I})$.

2.6.2 Einige Beispiele, mit und ohne Regularität

Beispiel 2.6.4 Für die eingespannte Saite oder Wäscheleine, die durchhängt durch eine Kraftdichte f , wird folgendes Funktional verwendet

$$J(u) = \int_0^1 \left(\sqrt{1 + u'(x)^2} - 1 - f(x)u(x) \right) dx. \quad (2.15)$$



Die elastische Energie, gespeichert in der ausgedehnten Saite oder Leine, ist proportional zu der zusätzlichen Länge. Die durch diese Ausdehnung verursachte zusätzliche Länge der Kurve wird gegeben durch

$$\int_0^1 \left(\sqrt{1 + u'(x)^2} - 1 \right) dx.$$

Für die Energie durch die Auslenkung gilt Kraft $\times$ Weg:

$$\int_0^1 f(x)u(x) dx.$$

Mit der obigen Schreibweise hat man

$$F(x, u, p) = \sqrt{1 + p^2} - 1 - f(x)u$$

und es folgt

$$F_{pp}(x, u, p) = \frac{1}{(1 + p^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Für $f \in C([0, 1])$ kann man Theorem 2.6.1 mit Bemerkung 2.6.2 anwenden und man findet, dass ein $C^1([0, 1])$ -Minimierer in $C^2([0, 1])$ liegt.

Beispiel 2.6.5 Ein Funktional, das ein vereinfachtes Modell für eine Saite beschreibt, bei der seitwärts Kräfte ausgeübt werden, ist

$$J(u) = \int_0^1 \left(\frac{1}{2} u'(x)^2 - f(x)u(x) \right) dx. \quad (2.16)$$

Dieses Funktional folgt aus (2.15), wenn man für kleine p approximiert durch

$$\sqrt{1+p^2} - 1 \approx \frac{1}{2}p^2.$$

Die Euler-Lagrange Gleichung in schwacher Form für (2.16) ist

$$\int_0^1 (u'(x)\varphi'(x) - f(x)\varphi(x)) dx = 0$$

und aus $u(x) = c - \int_0^x f(s)ds$ folgt sogar für $f \in C^0(\bar{I})$, dass $u \in C^2(\bar{I})$. Bei festgelegten Endpunkten, zum Beispiel $u(0) = u(1) = 0$ findet man sogar eine explizite Lösungsformel

$$u(x) = \int_0^1 \min(x, y) (1 - \max(x, y)) f(y) dy. \quad (2.17)$$

Aufgabe 6 Zeige, dass die Funktion in (2.17) eine Lösung von der zu (2.16) gehörenden Euler-Lagrange Gleichung ist.

Beispiel 2.6.6 Die Konfiguration bei einem Kristall ist derart, dass die Funktion F nicht ein Minimum hat, sondern mehrere. So eine Funktion ist $F(u, p) = (1 - |p|^2)^2$.

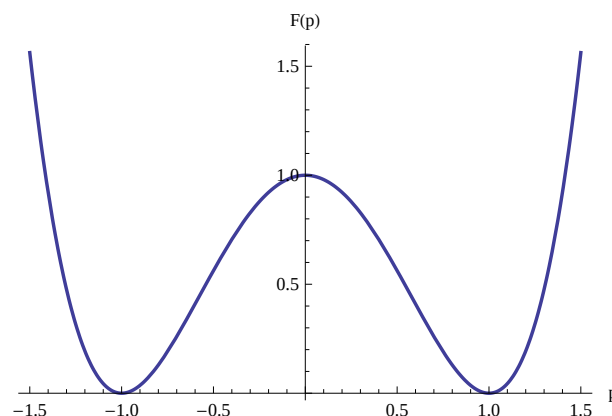


Abbildung 2.4: Skizze zu $p \mapsto (1 - p^2)^2$.

In dem eindimensionalen Gebiet $(-1, 1)$ ist das zugehörige Funktional wie folgt:

$$J(u) = \int_{-1}^1 \left(1 - (u'(x))^2 \right)^2 dx. \quad (2.18)$$

Wir sind interessiert an $\tilde{u}$ derart, dass

$$J(\tilde{u}) = \inf \{ J(u); u \in C^1[-1, 1] \cap C_0[-1, 1] \}.$$

Man sieht, dass $p \mapsto F(p) := (1 - p^2)^2$ zwei Minima hat, nämlich für $p = \pm 1$. Außerdem hat man $F(p) \geq 0$ und es folgt so direkt, dass $J(u) \geq 0$. Setzt man $\partial J(u; \varphi) = 0$, so folgt

$$\partial J(u; \varphi) = \int_{-1}^1 \left(1 - (u'(x))^2 \right) u'(x) \varphi'(x) dx = 0,$$

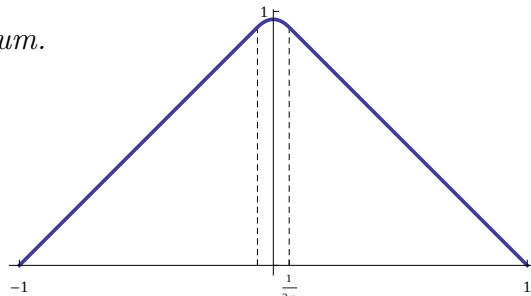
und $(1 - (u'(x))^2) u'(x) = c$. Dies ist ein Polynom dritten Grades in $u'(x)$ und als Lösungen findet man $u'(x) = \tilde{c}$. Hier ist $\tilde{c}$ eine Nullstelle des Polynoms $(1 - t^2) t - c$. Es folgt $u(x) = \tilde{c}x + b$, und durch die Randbedingungen $u(-1) = u(1) = 0$ folgt $u(x) \equiv 0$. Da

$$J(0) = \int_{-1}^1 1 \, dx = 2$$

gilt, ist die Null-Funktion jedoch nicht das Minimum.

Versuchen Sie mal

$$u_n(x) = \begin{cases} 1 + x & \text{für } x < -\frac{1}{2n}, \\ 1 - \frac{1}{4n} - n x^2 & \text{für } |x| \leq \frac{1}{2n}, \\ 1 - x & \text{für } x > \frac{1}{2n}. \end{cases}$$



Man zeigt direkt, dass $u_n \in C^1[-1, 1] \cap C_0[-1, 1]$ und $J(u_n) \rightarrow 0$ für $n \rightarrow \infty$. Weil für jede Funktion $J(u) \geq 0$ gilt, ist $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Minimalfolge. Der Limes u_∞ , definiert durch

$$u_\infty(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} u_n(x) = 1 - |x|, \quad (2.19)$$

liegt aber nicht in $C^1[-1, 1]$.

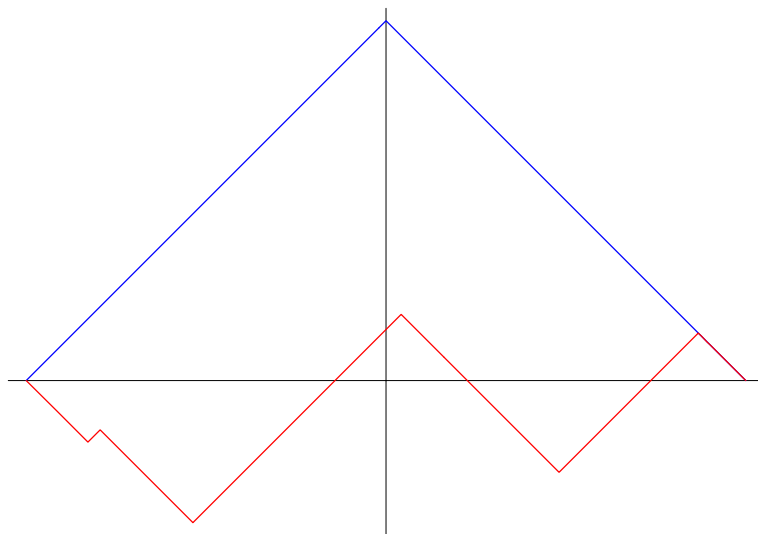


Abbildung 2.5: Zwei Funktionen aus $C^{0,1}([-1, 1])$, die (2.18) minimieren, wenn man die Ableitungen vernünftig definiert hätte.

Wenn man zeigen kann, dass das Integral $J(u_\infty) = 0$ für J aus (2.18) und u_∞ wie in (2.19) wohldefiniert ist, zum Beispiel wenn $u' \in L^4(-1, 1)$, könnte man u_∞ als Lösung zulassen. Dann müsste man jedoch festlegen, wie eine Ableitung $u' \in L^4(-1, 1)$ definiert ist und welchen Lösungsbegriff man hat. Ableitungen und Lösungen punktweise betrachtet reichen dann nicht mehr.

Variationsrechnung

Kapitel 3



Rand- und Nebenbedingungen

Es tönt trivial, aber die einfachste Art wie Randbedingungen auftreten ist, dass man sie vorschreibt. In einem Anfängerkurs Differentialgleichungen hat man fast nur solche Beispiele. Auch bei der Brachystochrone haben wir Lösungen gesucht, bei denen $u(0) = 0$ und $u(6) = 1$ erfüllt sein soll. Damit hat man nur im Inneren des Gebietes zu variieren und es folgt, angenommen die Funktionen sind genügend regulär, eine Differentialgleichung im Inneren des Gebietes.

3.1 Natürliche Randbedingungen

Wir können ein Funktional $J(u) = \int_{\Omega} F(x, u, \nabla u) dx$ betrachten für Funktionen in $\{u \in C^1(\bar{\Omega}); u = 0 \text{ auf } \Gamma\}$, wobei Γ nur ein Teil von $\partial\Omega$ ist. Wenn wir u auf $\partial\Omega \setminus \Gamma$ nicht vorschreiben, dann sollte man u auch da variieren. Also gestatten, dass φ einen Träger in $\bar{\Omega} \setminus \Gamma$ hat. Wenn wir das Minimum wieder $\tilde{u}$ nennen, wird die schwache Euler-Lagrange Gleichung wie folgt

$$0 = \int_{\Omega} \left(F_u(x, u, \nabla u) \varphi + F_p(x, u, \nabla u) \cdot \nabla \varphi \right) dx \quad \text{für alle } \varphi \in C^\infty(\bar{\Omega}) \text{ mit } \text{support } \varphi \subset \bar{\Omega} \setminus \Gamma.$$

Angenommen die betreffenden Funktionen sind genügend regulär, dann liefert die partielle Integration

$$0 = \int_{\partial\Omega \setminus \Gamma} \vec{\nu} \cdot F_p(x, u, \nabla u) \varphi \, d\sigma + \int_{\Omega} \left(F_u(x, u, \nabla u) - \nabla_x \cdot F_p(x, u, \nabla u) \right) \varphi \, dx. \quad (3.1)$$

Weil $C_c^\infty(\bar{\Omega})$ eine Teilmenge ist von $\{\varphi \in C^\infty(\bar{\Omega}); \text{support } \varphi \subset \bar{\Omega} \setminus \Gamma\}$, gilt (3.1) auch für $\varphi \in C_c^\infty(\bar{\Omega})$. Für solche $\varphi \in C_c^\infty(\bar{\Omega})$ ist das Randintegral identisch 0 und (3.1) vereinfacht sich zu

$$0 = \int_{\Omega} \left(F_u(x, u, \nabla u) - \nabla_x \cdot F_p(x, u, \nabla u) \right) \varphi \, dx.$$

Lemma 2.2.1 liefert uns dann, dass $F_u(x, u, \nabla u) - \nabla_x \cdot F_p(x, u, \nabla u) = 0$. Wenn wir das nun haben, folgt, dass das zweite Integral in (3.1) gleich 0 ist. Deshalb gilt auch, diesmal für $\varphi \in C^\infty(\bar{\Omega})$ mit $\text{support } \varphi \subset \bar{\Omega} \setminus \Gamma$, dass

$$0 = \int_{\partial\Omega \setminus \Gamma} \vec{\nu} \cdot F_p(x, u, \nabla u) \varphi \, d\sigma. \quad (3.2)$$

Da man zeigen kann, dass

$$\{\psi \in C^\infty(\partial\Omega); \text{support}\psi \subset \partial\Omega \setminus \Gamma\} = \{\varphi|_{\partial\Omega}; \varphi \in C^\infty(\bar{\Omega}); \text{support}\varphi \subset \bar{\Omega} \setminus \Gamma\},$$

kann man Lemma 2.2.1 auf $\partial\Omega \setminus \Gamma$ verwenden und findet so eine zweite Randbedingung, nämlich $\vec{\nu} \cdot F_p(x, u, \nabla u) = 0$.

Das Minimierungsproblem für J führt uns zum folgenden Randwertproblem:

$$\begin{cases} F_u(x, u, \nabla u) - \nabla_x \cdot F_p(x, u, \nabla u) = 0 & \text{in } \Omega, \\ u = 0 & \text{auf } \Gamma, \\ \vec{\nu} \cdot F_p(x, u, \nabla u) = 0 & \text{auf } \partial\Omega \setminus \Gamma. \end{cases} \quad (3.3)$$

Die letzte Gleichung in (3.3) ist die zum Minimierungsproblem gehörende *natürliche Randbedingung*.

Beispiel 3.1.1 Betrachten wir nochmals das vereinfachte Modell der Saite in Beispiel 2.6.4:

$$J(u) = \int_0^1 \left(\frac{1}{2} (u')^2 - f u \right) dx.$$

Statt an beiden Enden u vorzuschreiben, können wir zum Beispiel $u(1)$ freilassen. Freilassen bedeutet hier nicht einfach ein Ende loslassen, denn dann erwartet man nicht, dass das Modell noch vernünftig ist. Man kann sich jedoch vorstellen, dass das rechte Ende $x = x_e = 1$ vorgeschrieben wird ohne $u(x_e)$ vorzuschreiben. Man kann sich dieses Problem mechanisch vorstellen durch eine Saite, die am linken Ende befestigt ist, und am rechten Ende mit einem Knoten versehen ist, der sich nur in vertikaler Richtung frei bewegen lässt. Dieser Knoten könnte zum Beispiel durch eine schmale Spalte zurückgehalten werden. Mathematisch heißt es, dass wir J minimieren über Funktionen in $\{u \in C^1[0, 1]; u(0) = 0\}$. Man findet mit den obigen Argumenten das folgende Randwertproblem

$$\begin{cases} -u'' = f & \text{in } (0, 1), \\ u(0) = 0, \\ u'(1) = 0. \end{cases}$$

Die Randbedingung $u(0) = 0$ ist vorgeschrieben und $u'(1) = 0$ ist die natürliche Randbedingung.

Aufgabe 7 Zu einer Seifenblase zwischen einem halben Ring und einer glatten Wand, die durch einen konstanten einseitig größeren Luftdruck ausgedehnt ist, gehört das folgende Minimierungsproblem:

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\sqrt{1 + |\nabla u|^2} - p u \right) dx.$$

Dabei nehmen wir $\Omega = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2; x_1^2 + x_2^2 < 1 \text{ und } x_1 > 0\}$. Die zulässigen Funktionen sind

$$\mathcal{C} = \{u \in C^1(\bar{\Omega}); u(x) = 0 \text{ für } x \in \bar{\Omega} \text{ mit } |x| = 1\}.$$

1. Beschreibe das Randwertproblem, das die Euler-Lagrange Gleichung bringt.
2. Bemerke, dass die Fortsetzung $\bar{u}(x_1, x_2) = u(|x_1|, x_2)$ einem radialsymmetrischen Problem unterliegt.
3. Finde eine radialsymmetrische Lösung.

Aufgabe 8 Die Frage, die bei der Brachystochrone erscheint, kann man auch wie folgt ändern. Statt zu fragen, wie man mit der Achterbahn am schnellsten von $(0, 0)$ zu $(6, -1)$ kommt, könnte es einem auch egal sein, auf welcher Höhe man für $x = 6$ ankommt. Durch welche Kurve ist man am schnellsten von $(0, 0)$ bei $x = 6$?

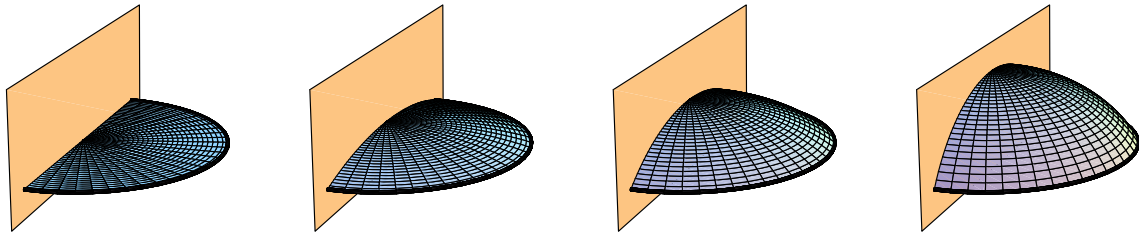


Abbildung 3.1: Auf einem Teil des Randes beim Modell einer Seifenblase zwischen Ring und glatter Wand ist die Randbedingung nicht festgelegt.

3.2 Nebenbedingungen

Statt Randbedingungen kann man andere Bedingungen begegnen. Ein paar Beispiele folgen.

3.2.1 Die Vorhangschiene

Ein einfaches Modell, das die Energie für einen elastischen Stab beschreibt, der eine seitwärts gerichtete Kraft mit Dichte f empfindet, ist

$$J(u) = \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{2} (u'')^2 - f u \right) dx.$$

Nimmt man an, der Stab ist am Rand eingespannt und in der Mitte durch einen Ring fixiert die kleine Drehungen zulässt, dann sind die folgende Funktionen passend:

$$\mathcal{C} = \{u \in C^2[-1, 1]; u(-1) = u'(-1) = u(0) = u(1) = u'(1) = 0\}$$

Dieses Funktional erscheint, wenn man ein einfaches Modell für das Durchbiegen einer Vorhangschiene sucht.

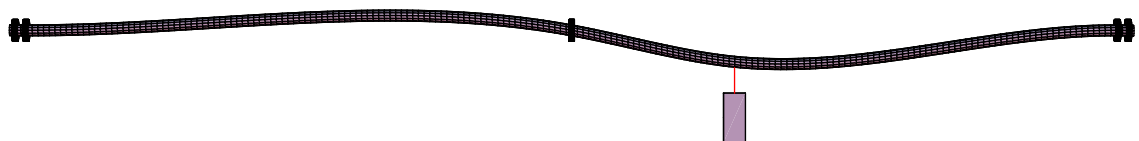


Abbildung 3.2: In der Mitte der Vorhangschiene ist die Höhe fixiert. Hier ist übrigens an den Enden $u = u' = 0$ angedeutet.

Die schwache Form der Euler-Lagrange Gleichung ist

$$0 = \int_{-1}^1 (u'' \varphi'' - f \varphi) dx \text{ für alle Testfunktionen } \varphi.$$

Die erste Frage, die sich aufdrängt, ist folgende: Welche Testfunktionen soll man eigentlich benutzen? Der erste Ansatz wäre, die Funktionen φ auch, genau wie u selber, in $\mathcal{C}$ zu nehmen. Vielleicht reicht es aber, diesen Raum einzuschränken, ähnlich wie wir vorher $C_c^\infty(\Omega)$ benutzt haben. Wir zeigen mal ein paar Versuche.

- Auf dem ersten Blick könnte man vermuten, dass man testen soll mit $\varphi \in C^\infty[-1, 1]$, für die gilt, dass der Träger die Stellen $\{-1, 0, 1\}$ nicht enthält. Daraus würde für einen Minimierer in $C^4[-1, 1]$ folgen

$$\begin{cases} u'''' = f & \text{in } (-1, 1), \\ u(-1) = u'(-1) = u(0) = u(1) = u'(1) = 0. \end{cases}$$

Leider hat man da eine Bedingung zu viel für ein wohlgestelltes Problem¹. Wenn man die Bedingung $u(0) = 0$ weglässt, hat man für jedes $f \in C[-1, 1]$ die Lösung

$$u(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{12} (8 - (3 - xy)(2 + x^2 + y^2) + (x - y)^2 |x - y|) f(y) dy$$

und $u(0) = 0$ ist nur erfüllt, wenn

$$\int_{-1}^1 (2 - 3y^2 + |y|^3) f(y) dy = 0.$$

- Nachdem dieser Ansatz fehlgeschlagen ist, könnte man sich überlegen, ob man das Problem nicht in zwei Probleme zerlegen sollte: eins auf $[-1, 0]$ und eins auf $[0, 1]$. Schreiben wir $u_r = u|_{[0, 1]}$ und $u_\ell = u|_{[-1, 0]}$. Wir finden

$$\begin{aligned} 0 &= \int_0^1 (u''\varphi'' - f\varphi) dx = [u''\varphi']_0^1 + \int_0^1 (u'''' - f)\varphi dx = \\ &= -u''(0)\varphi'(0) + \int_0^1 (u'''' - f)\varphi dx. \end{aligned}$$

Wir finden

$$\begin{cases} u_\ell'''' = f & \text{in } (-1, 0), \\ u_\ell(0) = u_\ell(-1) = u'_\ell(-1) = 0. \end{cases} \quad \text{und} \quad \begin{cases} u_r'''' = f & \text{in } (0, 1), \\ u_r(0) = u_r(1) = u'_r(1) = 0, \end{cases}$$

Es fehlt links und rechts noch eine Bedingungen für eine eindeutige Lösung. Diese Bedingungen folgen aus der Annahme, dass $u \in C^2[-1, 1]$, nämlich

$$u'_\ell(0) = u'_r(0) \quad \text{und} \quad u''_\ell(0) = u''_r(0).$$

Aufgabe 9 Wir betrachten das Problem der Vorhangschiene, die in der Mitte und an den beiden Enden nur fixiert wird:

$$u \in \mathcal{C}_1 = \{u \in C^\infty[-1, 1]; u(-1) = u(0) = u(1) = 0\}.$$

Wir nehmen an, dass $f \in C[-1, 1]$ und dass der Minimierer folgende Eigenschaften hat:

$$\begin{aligned} u(-1) &= 0, & u(0) &= 0, & u(1) &= 0, \\ u|_{[-1, 0]} &\in C^4[-1, 0], & u &\in C^2[-1, 1], & u|_{[0, 1]} &\in C^4[0, 1], \end{aligned} \quad (3.4)$$

und wir testen mit Funktionen in $\varphi \in \mathcal{C}_1$.

¹Hadamard nannte drei Kriterien für ein wohlgestelltes Problem:

- Existenz: es soll mindestens eine Lösung haben.
- Eindeutigkeit: es soll höchstens eine Lösung haben.
- Robustheit: kleine Änderungen im Problem geben kleine Änderungen bei der Lösung.

1. Zeige, dass man so zwei Differentialgleichungen vierter Ordnung bekommt, eine auf $[-1, 0]$ und eine auf $[0, 1]$, mit insgesamt 8 Bedingungen.
Übrigens kann man sogar zeigen, dass dieses Problem für jedes $f \in C[-1, 1]$ genau eine Lösung hat, die (3.4) erfüllt.
2. Was passiert, wenn man $u \in C^2[-1, 1]$ in (3.4) ersetzt durch $u \in C^3[-1, 1]$ und testet mit Funktionen in $\{\varphi \in C^3[-1, 1]; \varphi(-1) = \varphi(0) = \varphi(1) = 0\}$?

3.2.2 Ein Funktional als Nebenbedingung

Ein Beispiel mit einem anderen Typ von Bedingung findet man in der folgenden Frage:

Welche Kurve $(x, u(x))$ von Länge 3, die $(-1, 0)$ und $(1, 0)$ verbindet, ergibt den maximalen Flächeninhalt zwischen der horizontalen Achse und dieser Kurve?

Für die Variationsrechnung formuliert, wird dies: finde das Maximum von $J(u) = \int_{-1}^1 u(x) dx$ unter der Bedingung $I(u) = \int_{-1}^1 \sqrt{1 + (u'(x))^2} dx = 3$.

3.3 Lagrange-Multiplikator

Theorem 3.3.1 Sei $F, G \in C^2(\bar{\Omega} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$ und definiere für $u \in C^1(\bar{\Omega})$

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u, Du) dx \quad \text{und} \quad I(u) = \int_{\Omega} G(x, u, Du) dx.$$

Sei $\mathcal{C} \subset C^1(\bar{\Omega})$ derart, dass es für jede $u \in C^1(\bar{\Omega})$ und $\varphi \in C_c^\infty(\Omega)$ einen $\varepsilon > 0$ gibt mit $u + t\varphi \in \mathcal{C}$ für alle $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$.

Wenn $J : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}$ unter der Nebenbedingung $I(u) = \ell$ ein globales Minimum hat in $\tilde{u} \in C^2(\bar{\Omega})$, dann gilt

- $\partial I(\tilde{u}; \cdot) = 0$, oder
- es gibt $\lambda \in \mathbb{R}$ derart, dass $\partial J(\tilde{u}; \cdot) = \lambda \partial I(\tilde{u}; \cdot)$.

Das λ nennt man den Lagrange-Multiplikator².

Bemerkung 3.3.2 $\partial J(\tilde{u}; \cdot)$ und $\partial I(\tilde{u}; \cdot)$ sind Funktionale. Aus dem Hauptlemma folgt, dass die Gleichung in zweiten Punkt genau dann gilt, wenn

$$F_u(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) - \nabla_x F_p(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) = \lambda \left(G_u(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) - \nabla_x G_p(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) \right). \quad (3.5)$$

Bemerkung 3.3.3 Man kann selber überlegen, wie man dieses Theorem erweitert für mehrere Nebenbedingungen $I_i(u) = \ell_i$, $i = 1, \dots, k$.

Beweis. Wir nehmen an, dass $\mathcal{C} = C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$. Bei andere Randbedingungen kann man sich überlegen, an welche Stellen sich der Beweis ändert.

²Multiplikator = multiplier

Wir definieren

$$\begin{aligned} H(x, \lambda) = & F_u(x, \tilde{u}(x), D\tilde{u}(x)) - \nabla_x \cdot F_p(x, \tilde{u}(x), D\tilde{u}(x)) \\ & - \lambda \left(G_u(x, \tilde{u}(x), D\tilde{u}(x)) - \nabla_x \cdot G_p(x, \tilde{u}(x), D\tilde{u}(x)) \right). \end{aligned}$$

Nehmen wir an, der erste Punkt des Theorems ist nicht erfüllt. Das bedeutet, es gibt ein $x_0 \in \Omega$ derart, dass

$$G_u(x_0, \tilde{u}(x_0), D\tilde{u}(x_0)) - \nabla_x \cdot G_p(x_0, \tilde{u}(x_0), D\tilde{u}(x_0)) \neq 0. \quad (3.6)$$

Wegen (3.6) kann man λ so berechnen, dass gilt:

$$H(x_0, \lambda) = 0. \quad (3.7)$$

Wenn (3.7) erfüllt ist für alle $x \in \Omega$, dann gilt (3.5) und wir sind fertig.

Wir versuchen zu einem Widerspruch zu gelangen, wenn wir annehmen, dies sei nicht so. Das heißt also, wir nehmen an, dass es ein x_1 gibt mit

$$h := H(x_1, \lambda) \neq 0.$$

Aus Stetigkeitsgründen gilt, dass

$$\begin{aligned} H(x, \lambda_0) &= \mathcal{O}(|x - x_0|) \text{ für } x \rightarrow x_0 \text{ und} \\ H(x, \lambda_0) &= h + \mathcal{O}(|x - x_1|) \text{ für } x \rightarrow x_1. \end{aligned}$$

Als Nächstes nehmen wir Testfunktionen φ_0 und φ_1 , wie in (2.8), einmal mit Träger $B_\varepsilon(x_0)$ und einmal mit Träger $B_\varepsilon(x_1)$. Jetzt betrachten wir

$$f(s, t) = I(\tilde{u} + s\varphi_0 + t\varphi_1).$$

Wieder aus Stetigkeitsgründen und für ε genügend klein folgt

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial s} f(s, t) \right)_{|s=0, t=0} &= \int_{\Omega} \left(G_u(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) - \nabla_x \cdot G_p(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) \right) \varphi_0 \, dx = \\ &= \int_{B_\varepsilon(x_0)} \left(G_u(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) - \nabla_x \cdot G_p(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) \right) \varphi_0 \, dx \neq 0. \end{aligned}$$

Der Satz über implizite Funktionen besagt dann: es gibt $\delta > 0$ und eine Funktion $s : (-\delta, \delta) \rightarrow \mathbb{R}$ derart, dass $f(s(t), t) = \ell$. Anders formuliert, für $t \in (-\delta, \delta)$ erfüllt $\tilde{u} + s(t)\varphi_0 + t\varphi_1$ die Nebenbedingung $I(\tilde{u} + s(t)\varphi_0 + t\varphi_1) = 0$ und deshalb auch $\frac{\partial}{\partial t} I(\tilde{u} + s(t)\varphi_0 + t\varphi_1) = 0$.

Anschließend betrachten wir $t \mapsto J(\tilde{u} + s(t)\varphi_0 + t\varphi_1)$ und finden

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} J(\tilde{u} + s(t)\varphi_0 + t\varphi_1) &= \int_{\Omega} \left(F_u(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) - \nabla_x \cdot F_p(\cdot, \tilde{u}, D\tilde{u}) \right) (s'(t)\varphi_0 + \varphi_1) \, dx \\ &= \int_{\Omega} H(\cdot, \lambda_0) (s'(t)\varphi_0 + \varphi_1) \, dx = \left(h + \mathcal{O}(\varepsilon) (s'(t) + 1) \right) \int_{B_\varepsilon(x_0)} \varphi_0(x) \, dx. \end{aligned}$$

Weil h ungleich 0 ist, ist diese Ableitung ungleich 0 und $\tilde{u}$ ist kein Minimum, jedenfalls nicht, wenn man ε genügend klein wählt. ■

3.4 Beispiele für Randbedingungen

3.4.1 Wäscheleine und Membrane oder wie die Dimension eingreift

Die Minimallänge einer Wäscheleine in einer Dimension oder die Minimalfläche in zwei Dimensionen findet man durch das Minimieren von

$$J(u) = \int_{\Omega} \sqrt{1 + |\nabla u|^2} dx.$$

Für kleine Gradienten ist dieses Funktional fast wie $|\Omega| + \tilde{J}(u)$, wobei

$$\tilde{J}(u) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} |\nabla u|^2 dx.$$

Wir werden jetzt die Minima von $\tilde{J}$ suchen für radialsymmetrische u , die definiert sind auf $\Omega = \{x \in \mathbb{R}^n; d < |x| < 2\}$ mit den Randbedingungen $u(d) = -1$ und $u(2) = 0$.

Für radialsymmetrische Funktionen findet man $|\nabla u| = \left| \frac{x}{|x|} u'(|x|) \right| = |u'|$ und

$$\tilde{J}(u) = \omega_n \int_{r=d}^2 \frac{1}{2} |u'(r)|^2 r^{n-1} dr$$

und die Euler-Lagrange Gleichung liefert $(r^{n-1} u'(r))' = 0$. Es folgt, wenn man die Randwerte benutzt, dass

$$u(r) = \begin{cases} -\frac{2-r}{2-d} & \text{für } n=1, \\ -\frac{\log(r/2)}{\log(d/2)} & \text{für } n=2, \\ -\frac{r^{2-n} - 2^{2-n}}{d^{2-n} - 2^{2-n}} & \text{für } n>2. \end{cases}$$

Wenn man jetzt $d \downarrow 0$ gehen lässt, konvergieren die Funktionen nur zu etwas nicht Trivialem, wenn $n=1$. Man kann so vermuten, dass die Bedingung $u(0) = -1$ nur in einer Dimension einen Sinn ergibt.

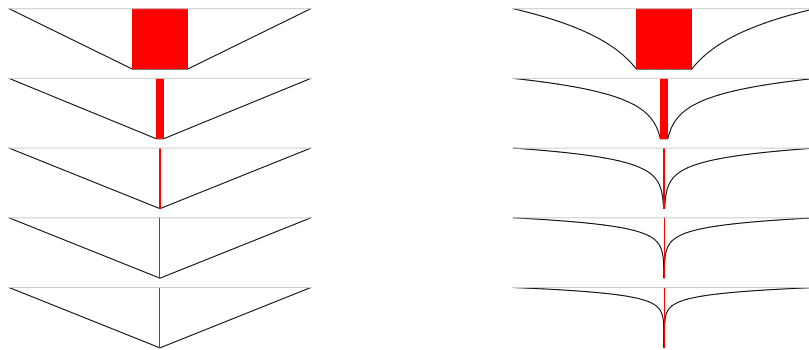


Abbildung 3.3: Minimum für $n=1$ und (radialsymmetrisch dargestellt) für $n=2$.

3.4.2 Natürliche Randbedingungen bei einer Plattengleichung

Wenn $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ ein zwei-dimensionales Gebiet beschreibt und man betrachtet dieses Gebiet als elastische Platte, die durchbiegt unter vertikalen Kräften mit Dichte f , und setzen wir u für die Auslenkung, dann findet man als einfaches Modell das folgende Energiefunktional:

$$E(u; \Omega) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} (\Delta u)^2 + (1 - \sigma) (u_{xy}^2 - u_{xx}u_{yy}) + f u \right) dx dy. \quad (3.8)$$

Dabei ist σ die sogenannte Poissonzahl³. Man kann dabei Randbedingungen betrachten, die von verschiedenen mechanischen Konstruktionen hervorgebracht werden. Ein paar Beispiele sind:

1. Eingespannt⁴: $u = \frac{\partial}{\partial n} u = 0$.
2. Gelenkig gelagert⁵: $u = 0$.
3. Symmetrieansatz: $\frac{\partial}{\partial n} u = 0$.
4. Frei: keine Bedingung vorgeschrieben.

Mit eingespannt soll man das Bild eines Schraubstockes für Augen haben. Mit gelenkig meint man, dass die Position aber nicht der Winkel am Rand fixiert ist, so wie die Scharniere einen Tür halten.

Wenn wir zum Beispiel $\Omega = (-1, 1) \times (0, 1)$ nehmen, eingespannt für $y = 0$, gelenkig gelagert für $x = \pm 1$ und frei für $y = 1$ und dazu f symmetrisch bezüglich $x = 0$ ansetzen, können wir $E(u, \Omega^*)$ betrachten mit $\Omega^* = (0, 1)^2$ und

$$u \in \mathcal{C} = \{u \in C^2([0, 1]^2) ; Bu = 0\}.$$

Die Randbedingungen werden mit $Bu = (u|_{I \cup II}, (u_y)|_I, (u_x)|_{IV})$ festgelegt. Hier sind $I = \partial\Omega^* \cap [y = 0]$, $II = \partial\Omega^* \cap [x = 1]$, $III = \partial\Omega^* \cap [y = 1]$ und $IV = \partial\Omega^* \cap [x = 0]$ die vier geraden Randteile.

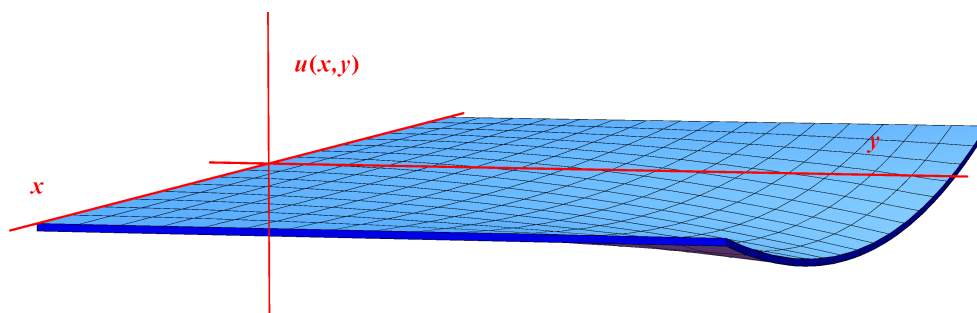


Abbildung 3.4: Vorstellung einer Platte, die durch ihr eigenes Gewicht durchbiegt. Links ist sie eingespannt, vorne und hinten ist sie gelenkig gelagert und rechts frei.

Aufgabe 10 Finde die natürlichen Randbedingungen, die zusätzlich zu $Bu = 0$ kommen. Was genau in den Ecken passiert, lassen wir sein.

³Leider wird im deutschen Sprachraum das Wort Poissonzahl für verschiedene Größen verwendet. Wir meinen hier die Zahl, die man auf englisch Poisson-Ratio nennt. Sie ist definiert durch $\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$, wobei λ, μ vom Material abhängige Konstanten sind, die beziehungsweise mit dem Zusammendrücken/Ausrenken und mit der Torsion zu tun haben. Normalerweise hat man $\lambda \geq 0$ und $\mu > 0$, und deshalb gilt meistens $0 \leq \sigma < \frac{1}{2}$. Für Metalle liegt σ rund 0.3. Für Gummi liegt σ bei 0.5.

⁴eingespannt = *clamped*

⁵gelenkig gelagert = *hinged*

Variationsrechnung

Kapitel 4



Die zweite Variation und Konvexität

4.1 Rotationsfläche oder mehr als nur Minimum

Betrachte zwei Ringe, zentriert um die z -Achse, den ersten auf Höhe 0 mit Radius 1 und den zweiten auf Höhe d mit Radius 2. Welche rotationssymmetrische Oberfläche, die beide Ringe verbindet, hat den kleinsten Flächeninhalt?

Das heißt, man betrachtet Oberflächen, die man parametrisieren kann durch

$$\{\phi, z\} \mapsto \Psi(\phi, z) := \{u(z) \cos(\phi), u(z) \sin(\phi), z\}.$$

Für den Flächeninhalt des betreffenden Abschnitts, also $(\phi, z) \in R := [0, 2\pi] \times [0, d]$, findet man durch

$$\det \begin{pmatrix} \Psi_\phi \cdot \Psi_\phi & \Psi_\phi \cdot \Psi_z \\ \Psi_z \cdot \Psi_\phi & \Psi_z \cdot \Psi_z \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} u(z)^2 & 0 \\ 0 & 1 + u'(z)^2 \end{pmatrix} = u(z)^2 (1 + u'(z)^2)$$

und die Integralformel für den Flächeninhalt, dass

$$J(u) = \int_R \sqrt{\det \begin{pmatrix} \Psi_\phi \cdot \Psi_\phi & \Psi_\phi \cdot \Psi_z \\ \Psi_z \cdot \Psi_\phi & \Psi_z \cdot \Psi_z \end{pmatrix}} d(z, \phi) = 2\pi \int_0^d u(z) \sqrt{1 + u'(z)^2} dz. \quad (4.1)$$

Die Randbedingungen geben uns $u \in \mathcal{C}_{\text{inhomogen}} = \{u \in C^1[0, d]; u(0) = 1 \text{ und } u(d) = 2\}$.

Die erste Variation wird

$$\partial J(u; \varphi) = \int_0^d \left(\frac{u'(z)u(z)}{\sqrt{1 + u'(z)^2}} \varphi'(z) + \sqrt{1 + u'(z)^2} \varphi(z) \right) dz. \quad (4.2)$$

Die partielle Integration von $\partial J(u; \varphi) = 0$, angenommen $u \in C^2[0, d]$, für $\varphi \in C_c^1[0, d]$ liefert

$$0 = \int_0^d \left(- \left(\frac{u'(z)u(z)}{\sqrt{1 + u'(z)^2}} \right)' + \sqrt{1 + u'(z)^2} \right) \varphi(z) dz.$$

Es folgt

$$\begin{aligned} 0 &= - \left(\frac{u'(z)u(z)}{\sqrt{1 + u'(z)^2}} \right)' + \sqrt{1 + u'(z)^2} = \\ &= - \frac{u''(z)u(z)}{(1 + u'(z)^2)^{3/2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + u'(z)^2}} = \frac{1}{u'(z)} \left(\frac{u(z)}{\sqrt{1 + u'(z)^2}} \right)' \end{aligned}$$

und damit

$$\frac{u(z)}{\sqrt{1 + u'(z)^2}} = c.$$

Wir finden mit $\tilde{c} = c^{-1}$ ($c = 0$ liefert $u(z) = 0$ und das ist keine Lösung), dass

$$u'(z) = \pm \sqrt{\tilde{c}^2 u(z)^2 - 1}.$$

Diese Differentialgleichung ist trennbar. Als Lösung erhält man:

$$u(z) = \frac{1}{\tilde{c}} \cosh(\tilde{c}z + b).$$

Jetzt sollen wir noch die Randbedingungen erfüllen: $u(0) = 1$ ergibt $\tilde{c} = \cosh(b)$ und wir finden

$$u(z) = \frac{\cosh(\cosh(b)z + b)}{\cosh(b)}. \quad (4.3)$$

Die zweite Randbedingung ist nicht algebraisch lösbar. Man kann aber zeigen, dass es eine derartige Zahl $d_0 > 0$ gibt, dass folgendes gilt:

1. Für jedes $d \in (0, d_0)$ gibt es genau zwei Lösungen u_1 und u_2 vom Typ (4.3). Diese zwei Lösungen sind geordnet: $u_1 < u_2$.
2. Für $d = d_0$ gibt es genau eine Lösung vom Typ (4.3).
3. Für $d > d_0$ existiert keine Lösung.

Bilder zu diesen Funktionen u findet man in Abbildung 4.1. Für eine dreidimensionale Darstellung einiger solchen Lösungen verweisen wir auf Abbildung 4.2 und 4.3.

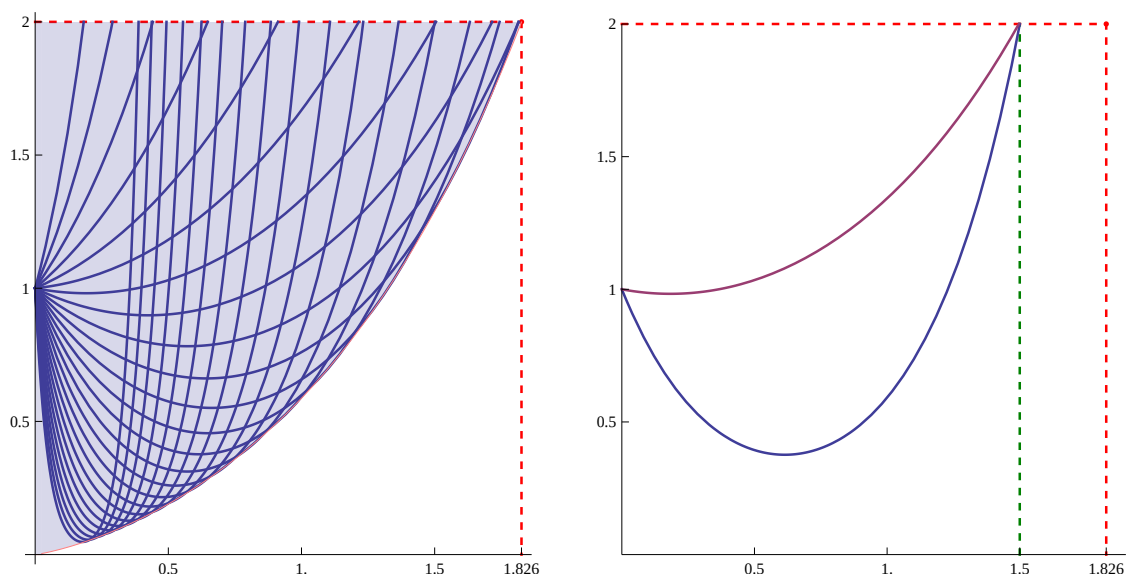


Abbildung 4.1: Für $d > 1.82617\dots$ gibt es keine Lösungen und für $d < 1.82617\dots$ immer zwei! Für $d = 1.5$ sind rechts beide Lösungen $z \mapsto u(z)$ abgebildet. Die Kurven nennt man Katenoiden oder Kettenlinien, weil sie auch die Kurve einer hängenden Kette beschreiben.

4.2 Lokales und globales Minimum

Wenn das Funktional $J(u)$ in u ein Minimum hat und die Funktion $\tau \mapsto J(u + \tau\varphi)$ für passende Störungen φ differenzierbar ist, folgt, dass $\frac{\partial}{\partial \tau} J(u + \tau\varphi) = 0$. Damit ist noch nicht sicher, dass u ein Minimum ist, denn es könnte ja auch ein Maximum oder sogar ein Sattelpunkt sein. Nehmen wir an, dass $\tau \mapsto J(u + \tau\varphi)$ zweimal differenzierbar ist, dann sind wir schon viel weiter, wenn wir herleiten können, dass

$$\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} J(u + \tau\varphi)|_{\tau=0} \geq 0$$

für alle Störungen¹ φ gilt. Das Funktional

$$\partial^2 J(u; \varphi) := \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} J(u + \tau\varphi)|_{\tau=0} \quad (4.4)$$

heißt *die zweite Variation von J in Richtung φ* .

Für $F \in C^2(\Omega \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$ mit $J(u) = \int_{\Omega} F(x, u(x), \nabla u(x)) dx$ wird die zweite Variation

$$\begin{aligned} \partial^2 J(u; \varphi) &= \\ &= \int_{\Omega} \left(F_{uu}(x, u, Du) \varphi^2 + 2\varphi \sum_{i=1}^n F_{p_i u}(x, u, Du) \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} + \sum_{i,j=1}^n F_{p_i p_j}(x, u, Du) \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) dx. \end{aligned}$$

Der erste Teil läßt sich für φ mit $\varphi|_{\partial\Omega} = 0$ vereinfachen zu

$$\begin{aligned} &\int_{\Omega} \left(F_{uu}(x, u, Du) \varphi^2 + 2\varphi \sum_{i=1}^n F_{p_i u}(x, u, Du) \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) dx \\ &= \int_{\Omega} \left(F_{uu}(x, u, Du) - \nabla \cdot F_{pu}(x, u, Du) \right) \varphi^2 dx. \end{aligned}$$

Wenn

1. die Matrix M , definiert durch $\left(F_{p_i p_j}(x, \bar{u}(x), D\bar{u}(x)) \right)_{ij}$, positiv semidefinit ist für jedes $x \in \Omega$ und
2.
$$\left(F_{uu}(x, u, Du) - \nabla \cdot F_{pu}(x, u, Du) \right)_{u=\bar{u}(x), p=D\bar{u}(x)} \geq 0 \quad (4.5)$$

finden wir $\partial^2 J(\bar{u}; \varphi) \geq 0$ für alle $\varphi \in C_c^\infty(\bar{\Omega})$.

Sogar wenn (4.5) strikt positiv wäre und auch die Matrix M positiv definit wäre und man nur vorgeschriebene Randbedingungen hätte, hätte man bestenfalls nur gefunden, dass $\bar{u}$ ein lokales Minimum ist. Ein globales Minimum oder sogar Eindeutigkeit hätte man noch nicht gefunden. Ein globales Minimum hätte man, wenn die zweite Variation für alle u positiv wäre.

Beispiel 4.2.1 Für die Minimalfläche aus Paragraph 4.1 mit J , definiert in (4.1), findet man

$$\partial^2 J(u; \varphi) := \int_0^d \left(\frac{u(z)}{(1 + u'(z)^2)^{3/2}} \varphi'(z)^2 - \frac{2u'(z)}{\sqrt{1 + u'(z)^2}} \varphi'(z) \varphi(z) \right) dz.$$

Der Term mit $\varphi'(z)^2$ ist positiv, wird jedoch klein, wenn $u(z)$ klein wird. Der zweite Term wechselt im Allgemeinen das Vorzeichen.

¹Störungen = perturbations

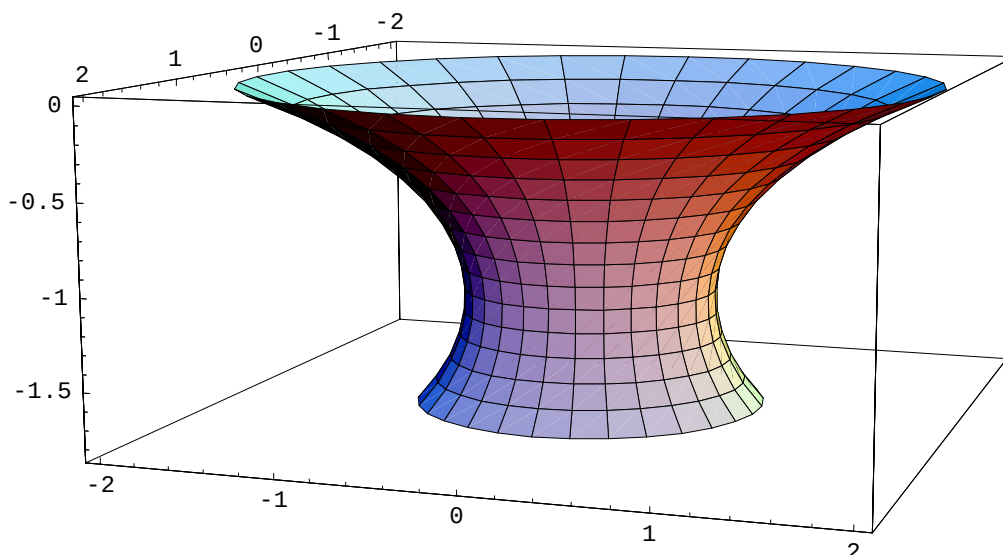


Abbildung 4.2: Dreidimensionale Vorstellung von der Lösung bei maximaler Distanz zwischen den Ringen.

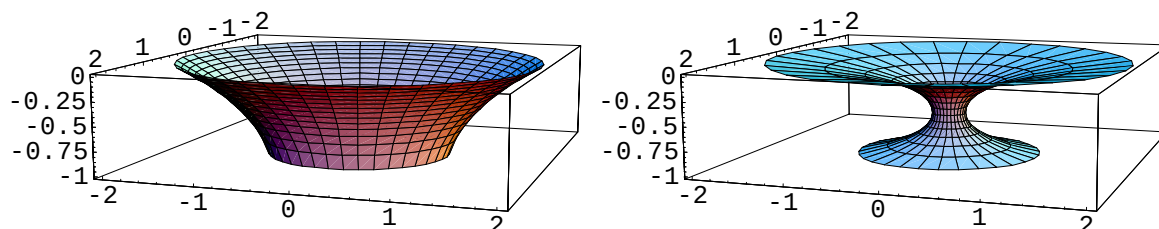


Abbildung 4.3: Dreidimensionale Vorstellungen von den beiden Lösungen für $d = 1$.

Aufgabe 11 Für die Seifenhaut auf Seite 30 mit $d \in (0, d_0)$ haben wir zwei Lösungen gefunden. Versuche zu zeigen, daß u_2 ein Minimum ist und u_1 nicht. Wenn $\partial^2 J(u_2; \varphi) > 0$ für alle $\varphi \in C_c^\infty(0, d)$ gilt, dann ist u_2 ein lokales Minimum. Wenn es $\varphi \in C_c^\infty(0, d)$ gibt derartig, dass $\partial^2 J(u_1; \varphi) < 0$, dann ist u_1 kein Minimum.

4.3 Konvexität

Es gibt Konvexität für Mengen und für Funktionen.

Definition 4.3.1 Die Menge M heißt konvex, wenn für jedes $x, y \in M$ und $\theta \in (0, 1)$ gilt

$$\theta x + (1 - \theta)y \in M. \quad (4.6)$$

Sei nun X ein Vektorraum oder eine konvexe Teilmenge eines Vektorraums.

Definition 4.3.2 Die Funktion $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt konvex, wenn für jedes $x, y \in X$ und $\theta \in (0, 1)$ gilt

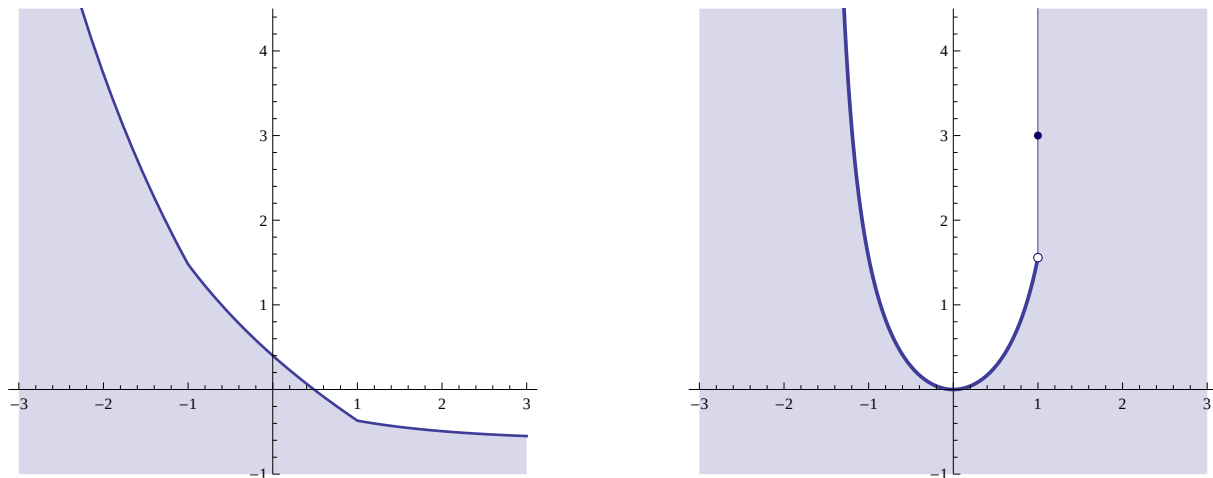
$$f(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta f(x) + (1 - \theta)f(y). \quad (4.7)$$

Die Funktion heißt strikt konvex, wenn für jedes $x \neq y \in X$ und $\theta \in (0, 1)$ gilt

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) < \theta f(x) + (1 - \theta)f(y). \quad (4.8)$$

Bemerkung 4.3.3 Diese Definition kann man auch für Funktionale verwenden.

Bemerkung 4.3.4 Oft ist es bequem, auch konvexe Funktionen $f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ zu betrachten.



Abbildungung 4.4: Links eine konvexe Funktion ohne Minimum und rechts eine nicht-stetige (unbeschränkte) konvexe Funktion f mit $f(1) = 3$ und $f(x) = \infty$ für $x > 1$. Übrigens ist $\{(x, y) ; y \geq f(x)\}$ eine konvexe Menge, genau dann wenn f eine konvexe Funktion ist.

Bevor wir Eindeutigkeit und sogar Existenz bei Funktionalen studieren können, schauen wir uns Konvexität bei Funktionen auf $\mathbb{R}^n$ an.

4.3.1 Konvexität in $\mathbb{R}^n$

Für Anwendungen ist es oft leichter eine alternative Version von (strikt) Konvexität zu benutzen.

Lemma 4.3.5 Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion.

- f ist konvex, genau dann, wenn es für jedes $y_0 \in \mathbb{R}^n$ ein $p \in \mathbb{R}^n$ gibt so, dass

$$f(y) \geq f(y_0) + p \cdot (y - y_0) \text{ für alle } y \in \mathbb{R}^n. \quad (4.9)$$

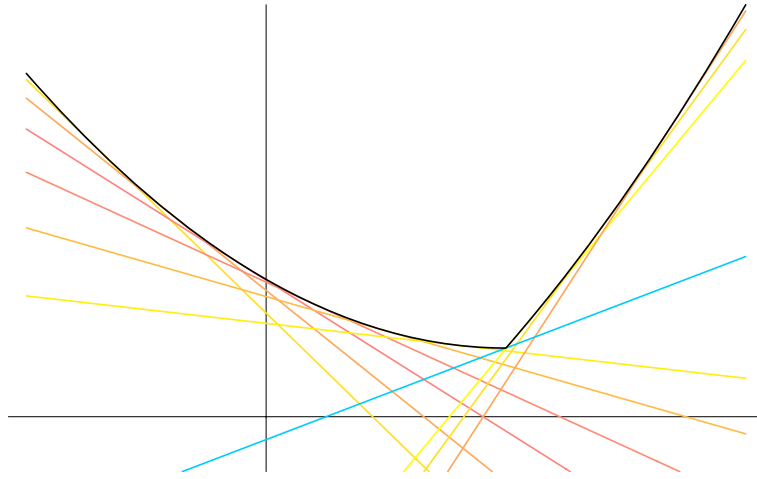
- f ist strikt konvex, genau dann, wenn es für jedes $y_0 \in \mathbb{R}^n$ ein $p \in \mathbb{R}^n$ gibt so, dass

$$f(y) > f(y_0) + p \cdot (y - y_0) \text{ für alle } y \in \mathbb{R}^n \setminus \{y_0\}. \quad (4.10)$$

Bemerkung 4.3.6 Sogar für $f : X \rightarrow \mathbb{R}$, mit X einen normierten Vektorraum, lässt sich eine ähnliche Äquivalenz zeigen mit Hilfe des Satzes von Hahn-Banach.

Beweis. (4.9) $\Rightarrow$ (4.7) lässt sich einfach beweisen. Denn tatsächlich findet man mit (4.9) und $y_0 = \theta x + (1 - \theta) y$, dass es $p \in \mathbb{R}^n$ gibt so, dass

$$\begin{aligned} f(x) &\geq f(\theta x + (1 - \theta) y) + (1 - \theta) p \cdot (x - y), \\ f(y) &\geq f(\theta x + (1 - \theta) y) + \theta p \cdot (y - x). \end{aligned}$$



Abbildungung 4.5: Hier ist eine konvexe Funktion f abgebildet mit der alternativen Fassung von Konvexität aus Lemma 4.3.5. An einigen Stellen kann es mehrere $p \in \mathbb{R}$ geben so, dass $f(y) \geq f(y_0) + p \cdot (y - y_0)$.

Addiert man geschickt beide Ungleichungen, dann folgt, dass

$$\theta f(x) + (1 - \theta) f(y) \geq f(\theta x + (1 - \theta) y).$$

Die strikte Konvexität geht ähnlich.

Die andere Richtung ist schwieriger. Im Fall, dass f differenzierbar ist, kann man es jedoch leicht beweisen: Man nehme $p = \nabla f(y_0)$. Denn aus

$$\theta f(y) + (1 - \theta) f(y_0) \geq f(\theta y + (1 - \theta) y_0) = f(y_0 + \theta(y - y_0))$$

folgt

$$f(y) \geq f(y_0) + \frac{f(y_0 + \theta(y - y_0)) - f(y_0)}{\theta}$$

und wenn wir θ nach 0 gehen lassen, folgt

$$f(y) \geq f(y_0) + \lim_{\theta \downarrow 0} \frac{f(y_0 + \theta(y - y_0)) - f(y_0)}{\theta} = f(y_0) + \nabla f(y_0) \cdot (y - y_0). \quad (4.11)$$

Für Funktionen, die lediglich (4.7) erfüllen, wird es wesentlich komplizierter. Bevor es weiter geht, zeigen wir dass Funktionen, die (4.7) erfüllen, fast differenzierbar sind. ■

Wenn (4.7) erfüllt ist, kann man mit Hilfe einiger geometrischen Argumente folgendes zeigen: Es gibt für $x_0 \in \mathbb{R}^n$ einen Vektor $p_0 \in \mathbb{R}^n$ mit $|p_0| = 1$ derartig, dass

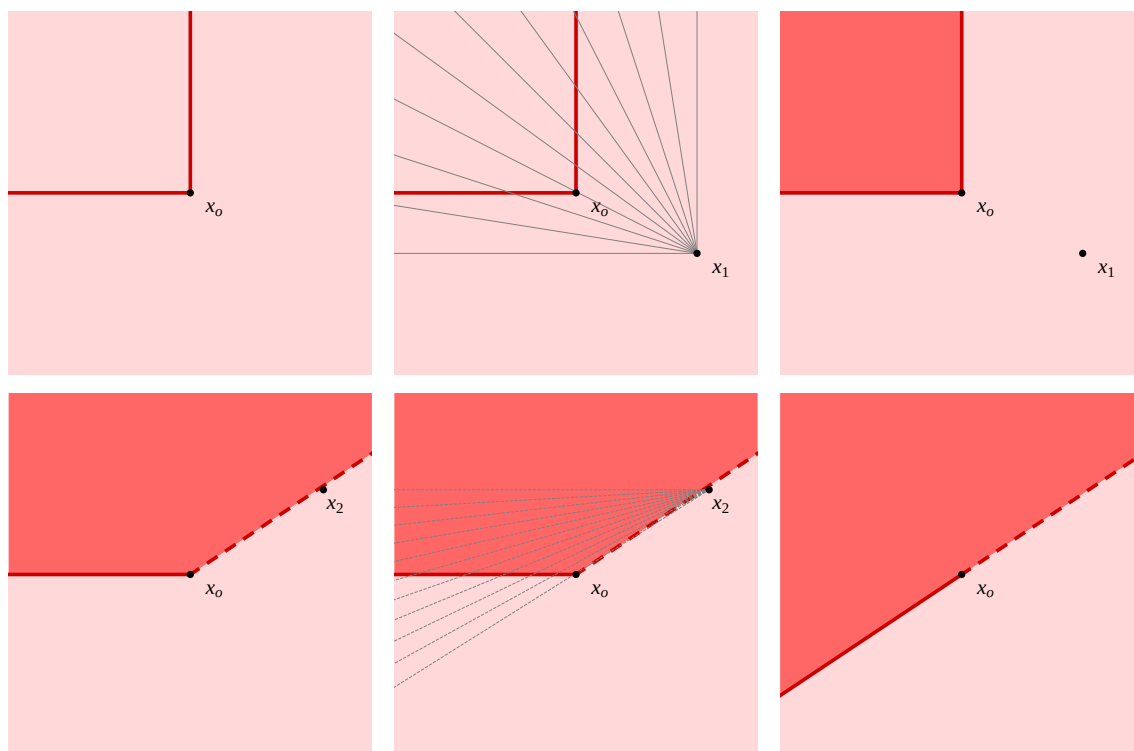
$$(x - x_0) \cdot p_0 > 0 \implies f(x) \geq f(x_0). \quad (4.12)$$

In einer Dimension sieht man dies sofort: Nehme an, es gibt $x > x_0$ mit $f(x) < f(x_0)$, und (4.7) zeigt $f(y) > f(x_0)$ für beliebiges $y < x_0$. Es gilt nämlich, dass

$$\frac{x - x_0}{x - y} f(y) \geq f(x_0) - \frac{x_0 - y}{x - y} f(x) > f(x_0) - \frac{x_0 - y}{x - y} f(x_0) = \frac{x - x_0}{x - y} f(x_0),$$

und dies zeigt (4.12) für $p_0 = -1$. Falls es kein $x > x_0$ gibt mit $f(x) < f(x_0)$, nimmt man $p_0 = 1$.

Dieses eindimensionale Argument kann man auch für jede Richtung in mehreren Dimensionen anwenden. Wir geben keinen Beweis, sondern versuchen mit einigen Illustrationen in Abbildung 4.6 zu zeigen, wie man in zwei Dimensionen vorgehen kann.



Abbildungung 4.6: Die Stellen x mit $f(x) \geq f(x_0)$ sind in dunkelrot dargestellt. Man nimmt an, dass $f(x_1) < f(x_0)$. Entlang der Linien verwendet man das eindimensionale Ergebnis.

Als nächstes werden wir in mehreren Schritten beweisen, dass in $\mathbb{R}^n$ die Bedingung in (4.7) die Bedingung in (4.8) impliziert, sowie auch (4.9) die Bedingung in (4.10) impliziert. In groben Linien ist der Beweis wie folgt:

Sei f konvex. Dann gilt, möglicherweise auf einem etwas kleineren Gebiet, dass:

punktwise beschränkt $\implies$ gleichmäßig beschränkt $\implies$ monotone Differenzen $\implies$ Lipschitz stetig & Existenz aller Richtungsableitungen $\implies$ oberhalb einer affinen Funktion.

Behauptung 4.3.7 Eine Funktion $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, die (4.7) erfüllt, ist gleichmäßig beschränkt auf beschränkten Gebieten.

Beweis. Sei $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset \mathbb{R}^n$ eine beschränkte Folge mit $f(x_k) \rightarrow \infty$. Wir schreiben p_k für einen Vektor, der wie in (4.12) zu x_k passt. Dann kann man eine Teilfolge so nehmen, dass $\lim_{m \rightarrow \infty} x_{k_m} = x_\infty$ und $\lim_{m \rightarrow \infty} p_{k_m} = p_\infty$ existieren. Man findet, dass $f(x_\infty + p_\infty) \geq f(x_{k_m}) \rightarrow \infty$, einen Widerspruch zu der Annahme, dass $f(x_\infty + p_\infty) \in \mathbb{R}$. ■

Wir nehmen $v \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ und zeigen einige Eigenschaften der Funktion $g : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$g(t) = \frac{f(y_0 + tv) - f(y_0)}{t}.$$

Behauptung 4.3.8 Nehme an, (4.7) ist erfüllt. Dann gilt für $t_1, t_2 \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$, dass

$$t_2 \geq t_1 \implies g(t_2) \geq g(t_1). \quad (4.13)$$

Beweis. Für $t_1 = t_2$ ist nichts zu beweisen. Für $0 < t_1 < t_2$ ist

$$\frac{f(y_0 + t_1 v) - f(y_0)}{t_1} \leq \frac{f(y_0 + t_2 v) - f(y_0)}{t_2} \quad (4.14)$$

äquivalent zu

$$\frac{t_1}{t_2} f(y_0 + t_2 v) + \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) f(y_0) \geq f(y_0 + t_1 v)$$

und dies folgt aus (4.7). Das gilt auch für $t_2 < t_1 < 0$ und vertauschen wir t_1 und t_2 , folgt (4.13). Für $t_1 < 0 < t_2$ ist (4.14) äquivalent zu

$$\frac{t_2}{t_2 - t_1} f(y_0 + t_1 v) + \frac{-t_1}{t_2 - t_1} f(y_0 + t_2 v) \geq f(y_0)$$

und auch dies folgt aus (4.7). ■

Behauptung 4.3.9 Nehme an, (4.7) ist erfüllt. Dann ist f lokal Lipschitz-stetig und es existieren die Richtungsableitungen von f in y_0 in Richtung v und $-v$. Es gilt:

$$-\frac{\partial}{\partial(-v)} f(y_0) = \lim_{t \uparrow 0} g(t) \leq \lim_{t \downarrow 0} g(t) = \frac{\partial}{\partial v} f(y_0).$$

Beweis. Für $t \in (0, 1)$ und $|w| = 1$ gilt

$$f(y) - f(y - w) \leq \frac{f(y + tw) - f(y)}{t} \leq f(y + w) - f(y)$$

und die Beschränktheit von f auf $\overline{B_2(y_0)}$, sagen wir durch M , ergibt für $y \in \overline{B_1(y_0)}$

$$|f(y + tw) - f(y)| \leq 2Mt,$$

anders gesagt, für $x, y \in \overline{B_1(y_0)}$ folgt

$$|f(x) - f(y)| < 2M|x - y|.$$

Weil die Funktion g auf $(0, 1]$ wachsend ist (also kleiner wird, wenn t kleiner wird) und nach unten beschränkt ist durch $g(-1)$, existiert der Grenzwert $g_+ = \lim_{t \downarrow 0} g(t)$. Es gilt $\frac{\partial}{\partial v} f(y_0) = g_+$. Ebenso ist die Funktion g wachsend auf $[-1, 0)$ und nach oben beschränkt durch $g(1)$. Auch hier existiert der Grenzwert $g_- = \lim_{t \uparrow 0} g(t) = \frac{-\partial}{\partial(-v)} f(y_0)$. Die Ungleichung $g_- \leq g_+$ folgt auch aus (4.13). ■

Wir brauchen für den nächsten Schritt den Friedrichs'schen Glätter²:

Definition 4.3.10 Man definiert $\varphi_1 \in C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$ durch

$$\varphi_1(x) = c_n \begin{cases} e^{\frac{-1}{1-|x|^2}} & \text{für } x \in B_1(0), \\ 0 & \text{für } x \notin B_1(0). \end{cases} \quad (4.15)$$

Die Konstante ist definiert durch $\int_{B_1(0)} \varphi_1(x) dx = 1$.

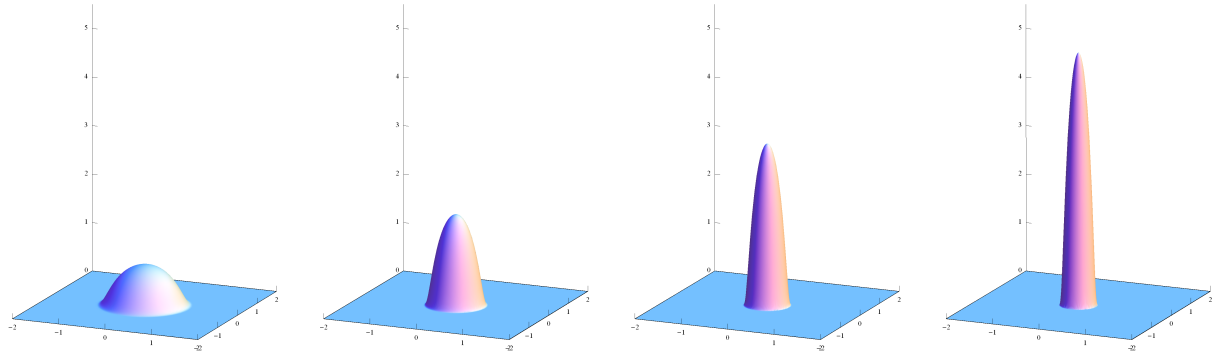
Für $\varepsilon \in (0, 1)$ definiert man $\varphi_\varepsilon \in C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$ durch

$$\varphi_\varepsilon(x) = \varepsilon^{-n} \varphi_1(\varepsilon^{-1}x).$$

Diese Funktion wird verwendet um Falten glattzubügeln. Für eine integrierbare Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ und $\varepsilon > 0$ setzt man

$$f_\varepsilon(x) = \int_{y \in \mathbb{R}^n} \varphi_\varepsilon(x - y) f(y) dy.$$

²Friedrichs'schen Glätter = mollifier

Abbildung 4.7: Skalierungen φ_ε des Friedrichs'schen Glätters in 2D.

Lemma 4.3.11 Sei $f \in C(\mathbb{R}^n)$ und sei $\varepsilon > 0$. Dann gilt:

1. $f_\varepsilon \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$;
2. $\lim_{\varepsilon \downarrow 0} f_\varepsilon(x) = f(x)$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$;
3. $\lim_{\varepsilon \downarrow 0} \|f_\varepsilon - f\|_{C(K)} = 0$ für jede kompakte Teilmenge $K \subset \mathbb{R}^n$.

Aufgabe 12 Beweisen Sie dieses Lemma.

Weiter zeigt man direkt, dass wenn f (4.7) erfüllt, auch f_ε (4.7) erfüllt und wenn f auf $\overline{B_1(y_0)}$ eine Lipschitz-Konstante hat, diese Lipschitz-Konstante auch passt für f_ε auf $\overline{B_{1-\varepsilon}(y_0)}$. Die Konvexität von f liefert außerdem, dass

$$f_\varepsilon(x) \geq f(x) \text{ für alle } x \in \mathbb{R}^n.$$

Dies folgt aus

$$\begin{aligned} f_\varepsilon(x) &= \int_{y \in \mathbb{R}^n} \varphi_\varepsilon(x-y) f(y) dy = \int_{y \in \mathbb{R}^n} \varphi_\varepsilon(y) f(x-y) dy = \\ &= \int_{\substack{y \in \mathbb{R}^n \\ y_1 > 0}} \varphi_\varepsilon(y) (f(x-y) + f(x+y)) dy \geq \int_{\substack{y \in \mathbb{R}^n \\ y_1 > 0}} \varphi_\varepsilon(y) 2f(x) dy = f(x). \end{aligned}$$

Fortsetzung des Beweises von Lemma 4.3.5:. Weil f_ε differenzierbar ist und (4.7) erfüllt, kann man (4.11) verwenden und es folgt für alle y , dass

$$f_\varepsilon(y) \geq f_\varepsilon(y_0) + \nabla f_\varepsilon(y_0) \cdot (y - y_0) \geq f(y_0) + \nabla f_\varepsilon(y_0) \cdot (y - y_0).$$

Die gleichmäßige Lipschitz-Stetigkeit der f_ε auf $\overline{B_{1/2}(y_0)}$ zeigt, dass die $|\nabla f_\varepsilon(y_0)|$ gleichmäßig beschränkt sind für alle $\varepsilon \in (0, \frac{1}{2})$. Dann kann man eine Nullfolge ε_k finden so, dass $p := \lim_{k \rightarrow \infty} \nabla f_{\varepsilon_k}(y_0)$ existiert. Es folgt, dass

$$f(y) = \lim_{k \rightarrow \infty} f_{\varepsilon_k}(y) \geq f(y_0) + \lim_{k \rightarrow \infty} \nabla f_{\varepsilon_k}(y_0) \cdot (y - y_0) = f(y_0) + p \cdot (y - y_0).$$

■

Für $f \in C^2(\mathbb{R})$ weiß man, dass f konvex ist, wenn $f''(x) \geq 0$ für alle $x \in \mathbb{R}$. Für $f \in C^2(\mathbb{R}^n)$ wird es schon etwas schwieriger, Konvexität aus den zweiten Ableitungen herzuleiten. Definiert man $A \in M^{n \times n}(\mathbb{R})$ durch

$$A_{ij} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x), \quad (4.16)$$

dann kann man das folgende Ergebnis verwenden.

Lemma 4.3.12 Sei $A \in M^{n \times n}(\mathbb{R})$ eine symmetrische Matrix. Dann sind äquivalent:

- $\vec{\xi} \mapsto \vec{\xi} \cdot A \vec{\xi}$ ist strikt konvex.
- A ist positiv definit: $\exists c > 0 \forall \vec{\xi} \in \mathbb{R}^n : \vec{\xi} \cdot A \vec{\xi} \geq c |\vec{\xi}|^2$.
- A hat nur strikt positive Eigenwerte.

Wenn für jedes x die Matrix A in (4.16) (strikt) konvex ist, dann ist f (strikt) konvex.

4.3.2 Minimum bei Konvexität

Proposition 4.3.13 Sei X ein normierter Raum. Wenn das Funktional $J : \mathcal{C} \subset X \rightarrow \mathbb{R}$ strikt konvex ist und auch $\mathcal{C}$ ist strikt konvex, dann hat J höchstens ein lokales Minimum in $\mathcal{C}$.

Beweis. Seien u und v beide ein Minimum für J . Betrachte für $t \in [0, 1]$ die Kurve

$$s(t) = (1-t)u + tv.$$

Wenn $J(u) \geq J(v)$, dann findet man einen Widerspruch durch

$$J(s(\varepsilon)) < (1-\varepsilon)J(u) + \varepsilon J(v) \leq J(u) \text{ für alle } \varepsilon > 0$$

und die Tatsache, dass $s(\varepsilon)$ beliebig nahe bei u genommen werden kann. ■

Man zeigt sofort, dass die Konvexität von $(u, p) \mapsto F(x, u, p)$ übertragen wird auf das zugehörige J :

Lemma 4.3.14 Sei $F \in C(\bar{\Omega} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$. Wenn

$$(u, p) \mapsto F(x, u, p) \text{ (strikt) konvex ist für jedes } x \in \bar{\Omega},$$

dann ist $J : C^1(\bar{\Omega}) \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u(x), Du(x)) dx$$

auch (strikt) konvex.

Theorem 4.3.15 Wir nehmen an, dass $F \in C^2(\bar{\Omega} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$ derartig ist, dass

$$(u, p) \mapsto F(x, u, p) \text{ konvex ist für jedes } x \in \bar{\Omega}.$$

Für

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u(x), Du(x)) dx$$

suchen wir $u_{\min}$ mit

$$J(u_{\min}) = \min_{u \in \mathcal{C}} J(u) \text{ mit } \mathcal{C} = C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega}).$$

1. Wenn $\bar{u} \in \mathcal{C}$ so ist, dass $\partial J(\bar{u}, \varphi) = 0$ für alle $\varphi \in \mathcal{C}$, dann ist $\bar{u}$ ein Minimum.

2. Wenn außerdem $(u, p) \mapsto F(x, u, p)$ strikt konvex³ ist für jedes $x \in \bar{\Omega}$, dann ist $\bar{u}$ das eindeutige Minimum.

Beweis. Aus der Konvexität folgt, dass es für jedes $x \in \bar{\Omega}$ einen Vektor $\vec{q} \in \mathbb{R}^{n+1}$ gibt derartig, dass

$$F(x, u, p) \geq F(x, \bar{u}(x), D\bar{u}(x)) + \vec{q} \cdot \begin{pmatrix} u - \bar{u}(x) \\ p - D\bar{u}(x) \end{pmatrix}.$$

Da wir angenommen haben, dass F differenzierbar ist, nimmt man

$$\vec{q} = \begin{pmatrix} F_u(x, \bar{u}(x), D\bar{u}(x)) \\ F_p(x, \bar{u}(x), D\bar{u}(x)) \end{pmatrix}.$$

Man beobachtet als nächstes, dass

$$\begin{aligned} J(u) - J(\bar{u}) &= \int_{\Omega} (F(x, u(x), Du(x)) - F(x, \bar{u}(x), D\bar{u}(x))) dx \\ &\geq \int_{\Omega} \begin{pmatrix} F_u(x, \bar{u}(x), D\bar{u}(x)) \\ F_p(x, \bar{u}(x), D\bar{u}(x)) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u(x) - \bar{u}(x) \\ Du(x) - D\bar{u}(x) \end{pmatrix} dx \\ &= \partial J(\bar{u}, u - \bar{u}) = 0. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Strikte Konvexität zeigt, dass $\bar{u}$ das einzige Minimum ist. ■

Später werden wir sehen, dass für $J(u)$ die Konvexität bezüglich der höchsten Ordnung eine sehr wichtige Rolle spielt bei der Existenz eines Minimums. In der zweiten Variation für

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u(x), \nabla u(x)) dx$$

bezieht sich das auf den Term

$$\int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n F_{p_i p_j}(x, u(x), \nabla u(x)) \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} dx$$

Konvexität dieses Funktional folgt aus der punktweisen Konvexität von

$$\vec{\xi} \mapsto \sum_{i,j=1}^n F_{p_i p_j}(x, u(x), \nabla u(x)) \xi_i \xi_j \text{ für alle } \xi \in \mathbb{R}^n \text{ und } x \in \Omega.$$

Wir definieren die Matrix $A \in M^{n \times n}(\mathbb{R})$ durch

$$A_{ij} = F_{p_i p_j}(x, u(x), \nabla u(x)).$$

Beispiel 4.3.16 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und sei $f \in C(\bar{\Omega})$. Für $u \in C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$ definieren wir

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 - f u \right) dx.$$

Man findet

$$\begin{aligned} \partial J(u; \varphi) &= \int_{\Omega} (\nabla u \cdot \nabla \varphi - f \varphi) dx, \\ \partial^2 J(u; \varphi) &= \int_{\Omega} \nabla \varphi \cdot \nabla \varphi dx. \end{aligned}$$

³strikt konvex = *strictly convex*

Die Funktion

$$(u, p) \mapsto F(x, u, p) := \frac{1}{2} |p|^2 - f(x) u$$

ist konvex aber nicht strikt konvex. Also ist eine Funktion $u \in C^2(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$ mit $\partial J(u; \varphi) = 0$ ein Minimum, aber u ist a-priori nicht unbedingt das einzige Minimum. Wenn man jedoch die Ungleichung von Poincaré-Friedrichs⁴ verwendet. Dann findet man:

$$\partial^2 J(u; \varphi) = \int_{\Omega} \nabla \varphi \cdot \nabla \varphi \, dx \geq \frac{1}{2} \int_{\Omega} (|\nabla \varphi|^2 + \lambda_{\Omega} \varphi^2) \, dx.$$

Also ist J strikt konvex auf $C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$ und ein Minimierer ist eindeutig.

4.4 Funktionale für vektorwertige Funktionen

4.4.1 Das Stokes-System

Die Strömung einer Flüssigkeit unter einer externen Kraft gibt das folgende Funktional

$$J(\vec{w}) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} (|\nabla w_1|^2 + |\nabla w_2|^2 + |\nabla w_3|^2) - \vec{f} \cdot \vec{w} \right) dx.$$

Die Funktion $\vec{w} = (w_1, w_2, w_3) : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^3$ beschreibt die Geschwindigkeiten der Strömung in $\Omega \subset \mathbb{R}^3$. Nehmen wir an, dass die Flüssigkeit inkompressibel ist, dann muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\nabla \cdot \vec{w} = 0 \text{ innerhalb von } \Omega. \quad (4.18)$$

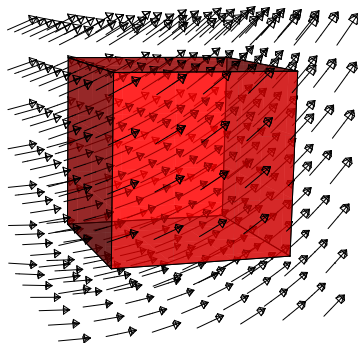


Abbildung 4.8: Wenn ein Vektorfeld $\vec{w}$ eine Strömung beschreibt, bedeutet (4.18), dass für jedes Teilgebiet gleich viel herein- wie herausströmt.

Passende Randbedingungen sind zum Beispiel:

- Keine Bewegung am Rand: $\vec{w} = 0$ auf $\partial\Omega$.
- Bewegung nur parallel zum Rand: $\vec{w} \cdot \vec{\nu} = 0$ auf $\partial\Omega$; $\vec{\nu}$ ist der auswärtige Normalenvektor.

⁴**Poincaré-Friedrichs-Ungleichung:** Für $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet gibt es $\lambda_{\Omega} > 0$ so, dass folgendes gilt für alle $\varphi \in C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$:

$$\int_{\Omega} |\nabla \varphi|^2 \, dx \geq \lambda_{\Omega} \int_{\Omega} \varphi^2 \, dx.$$

Schreiben wir für die Randbedingung

$$B\vec{w} = 0.$$

Sei $\vec{w}$ stetig differenzierbar. Die schwache Form der Euler-Lagrange Gleichung wird

$$\int_{\Omega} \left(\nabla w_1 \cdot \nabla \varphi_1 + \nabla w_2 \cdot \nabla \varphi_2 + \nabla w_3 \cdot \nabla \varphi_3 - \vec{f} \cdot \vec{\varphi} \right) dx = 0 \text{ für alle } \vec{\varphi} \in \{C_c^\infty(\Omega; \mathbb{R}^3); \nabla \cdot \vec{\varphi} = 0\}. \quad (4.19)$$

Die Gleichung in (4.19) ist leider so, dass das Hauptlemma nicht sofort anzuwenden ist, denn es gibt eine Bedingung, die die drei Komponenten von $\vec{\varphi}$ verbindet. Man kann zeigen, dass man statt (4.18) und (4.19) für die obigen Randbedingungen auch das folgende Problem betrachten kann:

Es gibt eine Funktion $p : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ derartig, dass

$$\int_{\Omega} \left(\nabla w_1 \cdot \nabla \varphi_1 + \nabla w_2 \cdot \nabla \varphi_2 + \nabla w_3 \cdot \nabla \varphi_3 - (\vec{f} - \nabla p) \cdot \vec{\varphi} \right) dx = 0 \text{ für alle } \vec{\varphi} \in C_c^\infty(\Omega; \mathbb{R}^3). \quad (4.20)$$

Betrachten wir

$$J^*(\vec{w}) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} (|\nabla w_1|^2 + |\nabla w_2|^2 + |\nabla w_3|^2) - (\vec{f} - \nabla p) \cdot \vec{w} \right) dx,$$

dann sieht man, dass dieses Funktional konvex ist, und hat also höchstens ein Minimum.

Übrigens findet man durch partielle Integration, dass

$$\int_{\Omega} \nabla p \cdot \vec{\varphi} \, dx = \int_{\partial\Omega} p \, \vec{\varphi} \cdot \vec{\nu} \, d\sigma_x - \int_{\Omega} p \, \nabla \cdot \vec{\varphi} \, dx$$

und mit den obigen Randbedingungen für $\vec{\varphi}$ folgt

$$\int_{\Omega} \nabla p \cdot \vec{\varphi} \, dx = - \int_{\Omega} p \, \nabla \cdot \vec{\varphi} \, dx.$$

So findet man

$$\partial J^*(\vec{w}; \vec{\varphi}) = \partial J(\vec{w}; \vec{\varphi}) - \int_{\Omega} p \, \nabla \cdot \vec{\varphi} \, dx.$$

Dies sieht aus wie eine Art eines unendlich-dimensionalen Lagrange-Multiplikator-Satzes mit $p(x)$ als Multiplikator. Dies kann man wie folgt sehen:

Nehme an, die Bedingung $\nabla \cdot \vec{\varphi} = 0$ hätte man nur an endlich vielen Punkten $\{x_i\}_{i=1}^n$ zu erfüllen. An diesen Stellen schreibt man nun Funktionale mit Hilfe von Distributionen:

$$\nabla \cdot \vec{w}(x_i) = \delta_{x_i}(\nabla \cdot \vec{w}) = \int_{\Omega} \delta_{x_i}(y) \, \nabla \cdot \vec{w}(y) \, dy = 0 \text{ für alle } x_i. \quad (4.21)$$

Die Gänsefüßlein stehen in (4.21), weil es so eigentlich nicht zu verstehen ist und es trotzdem oft genau so dargestellt wird. Dann hätte man mit dem Lagrange Multiplikator Satz, dass ein Minimum die folgende Gleichung erfüllt

$$\partial J(\vec{w}; \vec{\varphi}) - \sum_{i=1}^n \lambda_i \int_{\Omega} \delta_{x_i}(y) \, \nabla \cdot \vec{\varphi}(y) \, dy = 0 \text{ für alle } \vec{\varphi} \in C_c^\infty(\Omega; \mathbb{R}^3).$$

Setzen wir $p(x_i) = \lambda_i$, so folgt

$$\partial J(\vec{u}; \vec{\varphi}) - \sum_{i=1}^n p(x_i) \nabla \cdot \vec{\varphi}(x_i) = 0 \text{ für alle } \vec{\varphi} \in C_c^\infty(\Omega; \mathbb{R}^3).$$

Es wäre noch einen Schritt zu tun, nämlich die Summe durch ein Integral zu ersetzen, und man bekäme

$$\partial J(\vec{u}; \vec{\varphi}) - \int_{\Omega} p(x) \nabla \cdot \vec{\varphi}(x) dx = 0 \text{ für alle } \vec{\varphi} \in C_c^\infty(\Omega; \mathbb{R}^3).$$

Leider braucht das Ganze etwas bessere Argumente. Diese findet man zum Beispiel im Buch von Evans [7].

4.4.2 Konvexität für vektorwertige Funktionen

Sei Ω ein Gebiet in $\mathbb{R}^n$ und sei $F : \Omega \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{nm}$ zweimal stetig differenzierbar. Setze

$$J(\vec{u}) = \int_{\Omega} F(x, \vec{u}(x), \nabla \vec{u}(x)) dx \text{ für } \vec{u} \in C^1(\bar{\Omega}).$$

Die erste Variation wird

$$\partial J(\vec{u}; \vec{\varphi}) = \int_{\Omega} \sum_{i=1}^m \left(F_{u_i}(x, \vec{u}(x), \nabla \vec{u}(x)) \varphi_i(x) + F_{\vec{p}_i}(x, \vec{u}(x), \nabla \vec{u}(x)) \cdot \nabla \varphi_i(x) \right) dx$$

und die zweite Variation

$$\begin{aligned} \partial^2 J(\vec{u}; \vec{\varphi}) &= \int_{\Omega} \left(\sum_{i,j=1}^m \left(F_{u_i u_j}(x, \vec{u}(x), \nabla \vec{u}(x)) \varphi_i(x) \varphi_j(x) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2 F_{\vec{p}_i u_j}(x, \vec{u}(x), \nabla \vec{u}(x)) \cdot \nabla \varphi_i(x) \varphi_j(x) \right) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{s,t=1}^n \sum_{i,j=1}^m F_{(\vec{p}_i)_s (\vec{p}_j)_t}(x, \vec{u}(x), \nabla \vec{u}(x)) \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_s}(x) \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_t}(x) \right) dx. \end{aligned}$$

Fixieren wir $(x, \vec{u}(x), \nabla \vec{u}(x))$ und betrachten wir wieder den letzten Term und setzen

$$A_{ij}^{st}(x) = F_{(\vec{p}_i)_s (\vec{p}_j)_t}(x, \vec{u}(x), \nabla \vec{u}(x)).$$

Konvexität würde folgen aus

$$\sum_{i,j=1}^m \sum_{s,t=1}^n A_{ij}^{st}(x) \xi_{is} \xi_{jt} > 0 \text{ für alle } \xi \in M^{m \times n} \setminus \{0\}.$$

Leider ist eine solche Bedingung zu einschränkend. Viele Systeme aus den Anwendungen erfüllen diese Bedingung nicht.

Es gibt mit Konvexität verwandte Begriffe, die manchmal schon reichen. Wir betrachten dazu für Funktionen $\vec{u} \in C^1(\Omega \subset \mathbb{R}^n; \mathbb{R}^m)$ das Funktional

$$J(\vec{u}) = \int_{\Omega} f(\nabla \vec{u}(x)) dx.$$

Definition 4.4.1 Sei $f : M^{m \times n}(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ eine (integrierbare) Funktion.

- f heißt Rang-1-konvex, wenn

$$f(\theta \xi + (1 - \theta) \eta) \leq \theta f(\xi) + (1 - \theta) f(\eta) \text{ für alle } \theta \in [0, 1] \quad (4.22)$$

und für alle $\xi, \eta \in M^{m \times n}(\mathbb{R})$ mit $\text{Rang}(\xi - \eta) \leq 1$.

- f heißt quasikonvex, wenn für alle kompakten Gebiete $D \subset \mathbb{R}^n$

$$f(\xi) \leq \frac{1}{|D|} \int_D f(\xi + \nabla \vec{\varphi}(x)) dx \text{ für alle } \vec{\varphi} \in C_c^\infty(D; \mathbb{R}^m) \quad (4.23)$$

$$\text{mit } |D| = \int_D 1 dx.$$

Bemerkung 4.4.2 f ist konvex, wenn die Ungleichung in (4.22) erfüllt ist ohne die Einschränkung bezüglich des Ranges.

Lemma 4.4.3 Konvex $\Rightarrow$ quasikonvex $\Rightarrow$ Rang-1-konvex.

Ein Beweis findet man zum Beispiel in [5].

Aufgabe 13 Die Funktion $f : M^{2 \times 2}(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $f(A) = \det(A)$ ist Rang-1-konvex aber nicht konvex. Zeigen Sie dies.

Variationsrechnung

Kapitel 5



Lebesgue-Räume und Funktionalanalysis

5.1 Lebesgue-Integrale

5.1.1 Integrale

In den Analysis Vorlesungen hat man Bekanntschaft machen können mit dem Riemann-Integral und dem Lebesgue-Integral. Für diejenigen, die sich nicht auskennen, folgt eine kurze Übersicht. Wenn wir anschließend das Integral benutzen, werden wir immer das Lebesgue-Integral meinen.

- Das Riemann-Integral wurde definiert durch Approximationen mit *Treppenfunktionen*

$$f(x) = \sum_{k=1}^n f_k \mathbf{1}_{B_k}(x). \quad (5.1)$$

Es gilt $f_k \in \mathbb{R}$ und B_k sind „endliche Blöcke“ innerhalb Ω . Für eine solche Treppenfunktion definiert man

$$\int_{\Omega} f(x) dx := \sum_{k=1}^n f_k \text{Vol}(B_k).$$

Hier ist $\text{Vol}(B)$ das Volumen von B . Die Funktion $\mathbf{1}_B$ ist die Indikatorfunktion zu der Menge B :

$$\mathbf{1}_B(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \in B, \\ 0 & \text{für } x \notin B. \end{cases}$$

- Das Lebesgue-Integral wurde definiert durch Approximationen mit *einfachen Funktionen*

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k \mathbf{1}_{A_k}(x). \quad (5.2)$$

Es gilt $f_k \in [0, \infty)$ und A_i sind Lebesgue-messbare Mengen innerhalb Ω . Die Lebesgue-messbaren Mengen enthalten zum Beispiel alle offenen und alle abgeschlossenen Mengen in $\mathbb{R}^n$. Für solche Mengen kann man das Lebesgue-Maß definieren. Außerdem sind alle Mengen, die man durch abzählbare Vereinigungen und Durchschnitte

von Lebesgue-Mengen bekommt, auch wieder Lebesgue-messbar. Auch das Komplement einer Lebesgue-messbaren Menge ist Lebesgue-messbar. Für nette Mengen A , bei denen das Volumen bekannt ist, stimmen Lebesgue-Maß und Volumen überein:

$$\lambda(A) = \text{Vol}(A).$$

Für eine solche einfache Funktion, wie in (5.2), definiert man

$$\int_{\Omega} f \, d\lambda := \sum_{k=1}^{\infty} f_k \lambda(A_k).$$

Ähnlichkeiten und Unterschiede:

1. Sowohl für das Riemann-Integral als auch für das Lebesgue-Integral kann man für mehr beliebige (nicht-negative) Funktionen das Integral definieren, wenn sich die betreffenden Funktionen von oben und von unten durch Treppen- bzw. einfache Funktionen approximieren lassen und die zugehörigen Ober- und Untersummen zum gleichen Wert konvergieren.
2. Beim Lebesgue-Integral kann man auch Approximationen durch unendlich aber abzählbar vielen Mengen $\{A_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ zulassen und es sind auch Mengen A mit $\lambda(A) = \infty$ erlaubt.

3. Da man beim Lebesgue-Integral sowohl unendliche Summen als auch Mengen mit unendlichem Maß zulässt, muss man bei Funktionen, die kein festes Vorzeichen haben, das Lebesgue-Integral getrennt für f^+ und f^- definieren. Sonst könnte ein undefiniertes $\infty - \infty$ auftreten.

Man definiert $f^+(x) = \max(f(x), 0)$ und $f^-(x) = \max(-f(x), 0)$ und so findet man $f^+, f^- \geq 0$ und $f = f^+ - f^-$. Man nennt eine Funktion $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ Lebesgue-integrierbar, wenn

$$\int_{\Omega} f^+ \, d\lambda < \infty \text{ und } \int_{\Omega} f^- \, d\lambda < \infty$$

und definiert für solche f das Integral durch

$$\int_{\Omega} f \, d\lambda = \int_{\Omega} f^+ \, d\lambda - \int_{\Omega} f^- \, d\lambda.$$

4. Für nette Funktionen auf beschränkten Gebieten Ω gilt

$$\int_{\Omega} f(x) \, dx = \int_{\Omega} f \, d\lambda.$$

5. Eine Funktion $f : \Omega \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ nennt man Lebesgue-messbar, wenn die Mengen $\{x \in \Omega; f(x) < c\}$ Lebesgue-messbar sind für alle $c \in \mathbb{R}$. Für eine Lebesgue-messbare Funktion kann man die Lebesgue-Integrale $\int_{\Omega} f^+ \, d\lambda$ und $\int_{\Omega} f^- \, d\lambda$ definieren als Werte in $[0, \infty]$. Nur wenn beide Werte in $[0, \infty)$ liegen, nennt man die Funktion f Lebesgue-integrierbar.

5.1.2 Definition der Lebesgue-Räume

Definition 5.1.1 Sei $q \in [1, \infty)$ und sei Ω eine offene Teilmenge von $\mathbb{R}^n$. Man sagt $f \in L^q(\Omega)$, wenn f Lebesgue-meßbar ist und

$$\|f\|_{L^q(\Omega)} := \left(\int_{\Omega} |f(x)|^q dx \right)^{1/q} < \infty.$$

Wir möchten daran erinnern, dass wenn das Maß von $\{x \in \Omega; f_1(x) \neq f_2(x)\}$ gleich null ist, dieses Integral keinen Unterschied macht zwischen zwei Funktionen f_1 und f_2 . Entweder ist $\|\cdot\|_{L^q(\Omega)}$ dann keine Norm oder man schaut über diese spärlichen Unterschiede hinweg und betrachtet Äquivalenzklassen statt einzelne Funktionen. Das letztere wird gemacht; also sind zum Beispiel die Funktionen $\mathbf{1}_{\mathbb{Q}}$ und 0 identisch. Wenn f_1 und f_2 identisch sind im Sinne von Lebesgue, schreibt man $f_1 = f_2$ f.ü., wobei f.ü. heißt: fast überall¹.

Definition 5.1.2 sei Ω eine offene Teilmenge von $\mathbb{R}^n$. Man sagt $f \in L^\infty(\Omega)$, wenn f Lebesgue-meßbar ist und

$$\|f\|_{L^\infty(\Omega)} := \text{ess sup } |f| < \infty.$$

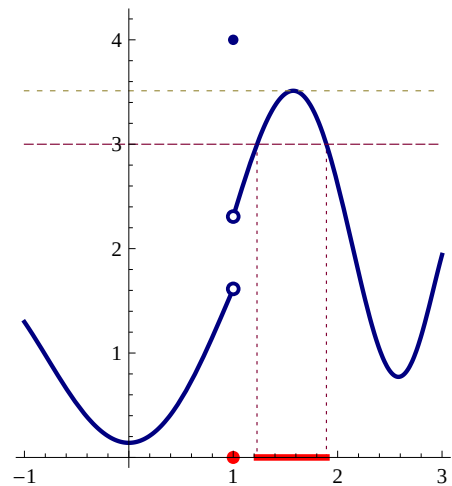
Bemerkung 5.1.3 Das wesentliche Supremum ist wie folgt definiert:

$$\text{ess sup } f = \inf \{k \in \mathbb{R}; \lambda[f(x) > k] = 0\}.$$

Man setzt $\lambda[f(x) > k] = \lambda\{x \in \Omega; f(x) > k\}$, das Lebesgue-Maß der Niveaumenge

$$\{x \in \Omega; f(x) > k\}.$$

Rechts findet man das Bild einer Funktion und ihre Niveaumenge für $k = 3$. Das Supremum ist 4 und das wesentliche Supremum ist 3,5.



Folgendes gilt:

Lemma 5.1.4 $L^p(\Omega)$ für $p \in [1, \infty]$ mit Norm $\|\cdot\|_p$ ist ein Banachraum. $L^2(\Omega)$ ist ein Hilbertraum mit Skalarprodukt $(u, v) = \int_{\Omega} u(x)v(x)dx$.

Lemma 5.1.5 Wenn $\lambda(\Omega) < \infty$ und $1 \leq p < q \leq \infty$, dann gilt $L^p(\Omega) \supset L^q(\Omega)$.

Beweis. Dies folgt aus der Hölder-Ungleichung²:

$$\begin{aligned} \|f\|_{L^p(\Omega)}^p &= \int_{\Omega} |f|^p dx = \int_{\Omega} |f|^p 1 dx \leq \\ &\left(\int_{\Omega} |f|^{p \frac{q}{q-p}} dx \right)^{\frac{q-p}{q}} \left(\int_{\Omega} 1^{\frac{q}{q-p}} dx \right)^{1-\frac{q-p}{q}} = \|f\|_{L^q(\Omega)}^p \lambda(\Omega)^{1-\frac{p}{q}}. \end{aligned}$$

Das heißt, aus $\|f\|_{L^q(\Omega)} < \infty$ und $\lambda(\Omega) < \infty$ folgt $\|f\|_{L^p(\Omega)} < \infty$. ■

¹fast überall = *almost everywhere*, f.ü. = *a.e.*

²**Hölder-Ungleichung:** Sei $p, q \in (1, \infty)$ mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Dann gilt für $f \in L^p(\Omega)$ und $g \in L^q(\Omega)$, dass

$$\int_{\Omega} f g dx \leq \left(\int_{\Omega} |f|^p dx \right)^{1/p} \left(\int_{\Omega} |g|^q dx \right)^{1/q}.$$

Lemma 5.1.6 Sei $p \in [1, \infty)$. Die stückweise konstanten Funktionen mit beschränkten Träger liegen dicht³ in $L^p(\Omega)$.

Auch die $C_0^\infty(\Omega)$ -Funktionen liegen dicht in $L^p(\Omega)$.

Bemerkung 5.1.7 Eine Funktion $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ist stückweise konstant, wenn es $h_i \in \mathbb{R}$ und disjunkte Lebesgue-messbare Mengen $\mathcal{O}_i$ in Ω gibt so, daß $f = \sum_{i=1}^m h_i 1_{\mathcal{O}_i}$.

Definition 5.1.8 Man sagt $f \in L_{loc}^p(\Omega)$, wenn $f|_{\mathcal{O}} \in L^p(\mathcal{O})$ für jedes beschränkte Teilgebiet $\mathcal{O}$ mit $\overline{\mathcal{O}} \subset \Omega^\circ$.

5.2 Funktionalanalytisches

5.2.1 Dualraum

Definition 5.2.1 Wenn $(X, \|\cdot\|_X)$ ein normierter Vektorraum ist, dann definiert man X' als die Menge aller stetigen linearen Funktionale $f : X \rightarrow \mathbb{R}$.

Lemma 5.2.2 Setzt man

$$\|f\|_{X'} = \sup \{|f(x)|; x \in X \text{ mit } \|x\|_X \leq 1\},$$

wird $(X', \|\cdot\|_{X'})$ ein normierter Vektorraum.

Wie vorher sind wir ein wenig ungenau und schreiben oft X' , wenn wir eigentlich den Dualraum $(X', \|\cdot\|_{X'})$ meinen.

Aufgabe 14 Zeige, dass $\|\cdot\|_{X'}$ eine Norm ist und dass

$$\begin{aligned} & \sup \{|f(x)|; x \in X \text{ mit } \|x\|_X \leq 1\} = \\ &= \sup \{|f(x)|; x \in X \text{ mit } \|x\|_X = 1\} = \\ &= \sup \{|f(x)| / \|x\|_X; x \in X \setminus \{0\}\}. \end{aligned}$$

Das Verfahren, mit dem man X' definiert, kann man wiederholen und so bekommt man X'' .

Übrigens findet man für jedes $x \in X$ eine lineare Abbildung $F_x \in X''$: man definiert F_x durch

$$F_x(f) := f(x) \text{ mit } f \in X'.$$

Es folgt

$$\begin{aligned} \|F_x\|_{X''} &= \sup \{|F_x(f)|; f \in X' \text{ mit } \|f\|_{X'} \leq 1\} = \\ &= \sup \{|f(x)|; f \in X' \text{ mit } \|f\|_{X'} \leq 1\} \leq \\ &\leq \sup \{\|f\|_{X'} \|x\|_X; f \in X' \text{ mit } \|f\|_{X'} \leq 1\} = \|x\|_X. \end{aligned}$$

Man sieht, wenn man x und F_x identifiziert, dass $X \subset X''$ sowohl als Menge wie auch als stetige Einbettung⁴. Meistens hat man $X \neq X''$, obwohl es eine wichtige Klasse gibt, für die beide Mengen isomorph sind: $X = X''$.

³Sei $(X, \|\cdot\|)$ ein normierter Vektorraum. Die Teilmenge $A \subset X$ liegt dicht in X , wenn es für jedes $x \in X$ und $\varepsilon > 0$ ein $a \in A$ gibt so, dass $\|x - a\| < \varepsilon$.

⁴Seien $(X, \|\cdot\|_X)$ und $(Y, \|\cdot\|_Y)$ zwei normierte Vektorräume. Dann sagt man „ X ist stetig eingebettet in Y “, wenn $X \subset Y$ und es $c > 0$ gibt so, dass für alle $x \in X$ gilt

$$\|x\|_Y \leq c \|x\|_X.$$

Man schreibt $X \hookrightarrow Y$.

Definition 5.2.3 Der Banachraum X heißt reflexiv⁵ wenn $X = X''$.

Mit Hilfe der folgenden Sätze finden wir, dass Lebesgue-Räume mit $p \in (1, \infty)$ reflexiv sind.

Theorem 5.2.4 (Darstellungssatz von F. Riesz für Lebesgue-Räume) Sei $p \in (1, \infty)$ und sei $F \in (L^p(\Omega))'$. Dann gibt es genau ein $f \in L^{p'}(\Omega)$ mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1$ derart, dass

$$F(g) = \int_{\Omega} f g \, dx \quad \text{für alle } g \in L^p(\Omega).$$

Einen Beweis findet man in [3, Théorème IV.11].

Theorem 5.2.5 Sei $F \in (L^1(\Omega))'$. Dann gibt es genau ein $f \in L^\infty(\Omega)$ derart, dass

$$F(g) = \int_{\Omega} f g \, dx \quad \text{für alle } g \in L^1(\Omega).$$

Auch hier verweisen wir auf [3, Théorème IV.14].

Lemma 5.2.6 Sei $p \in [1, \infty)$ und sei F wie in Theorem 5.2.4 oder 5.2.5 und sei f die zugehörige Funktion in $L^{p'}(\Omega)$. Dann gilt

$$\|F\|_{(L^p(\Omega))'} = \|f\|_{L^{p'}(\Omega)}.$$

Beweis. Entweder durch Hölder ($1 < p < \infty$) oder durch direktes Abschätzen ($p = 1$, $p' = \infty$) findet man:

$$|F(g)| \leq \|f\|_{L^{p'}(\Omega)} \|g\|_{L^p(\Omega)}$$

und so folgt

$$\|F\|_{(L^p(\Omega))'} \leq \|f\|_{L^{p'}(\Omega)}.$$

Für die Abschätzung in die andere Richtung nimmt man, wenn $f \in L^{p'}(\Omega) \setminus \{0\}$ und $1 < p < \infty$, die Funktion $f_p := f |f|^{(p'/p)-1} \in L^p(\Omega)$ und es folgt

$$F(f_p) = \int_{\Omega} f^2 |f|^{(p'/p)-1} \, dx = \|f\|_{L^{p'}(\Omega)}^{p'} = \|f\|_{L^{p'}(\Omega)} \|f_p\|_{L^p(\Omega)}$$

Daraus bekommt man

$$\|F\|_{(L^p(\Omega))'} \geq F(f_p) / \|f_p\|_{L^p(\Omega)} = \|f\|_{L^{p'}(\Omega)}.$$

Für $f \in L^\infty(\Omega)$ und $\varepsilon > 0$ setzen wir

$$\Omega_{\pm}^\varepsilon = \{x \in \Omega; \pm f(x) > \|f\|_\infty - \varepsilon\}.$$

Dann gilt $\lambda(\Omega_\sigma^\varepsilon) > 0$ mindestens für eine der beiden $\sigma \in \{+, -\}$, sage für $\sigma = +$. Für m genügend groß gilt

$$c_{\varepsilon, m} := \lambda(\Omega_+^\varepsilon \cap B_m(0)) > 0 \text{ und } c_{\varepsilon, m} < \infty.$$

Definiere

$$g_\varepsilon(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \in \Omega_+^\varepsilon \cap B_m(0), \\ 0 & \text{anders.} \end{cases}$$

⁵reflexiv = reflexive

Dann folgt $\|g_\varepsilon\|_{L^1(\Omega)} = c_{\varepsilon,m}$ und

$$\begin{aligned} F(g_\varepsilon) &= \int_{\Omega} f g_\varepsilon dx = \int_{\Omega_+^\varepsilon \cap B_m(0)} f dx \geq \\ &\geq \left(\|f\|_{L^\infty(\Omega)} - \varepsilon \right) c_{\varepsilon,m} = \left(\|f\|_{L^\infty(\Omega)} - \varepsilon \right) \|g_\varepsilon\|_{L^1(\Omega)} \end{aligned}$$

und damit $\|F\|_{(L^1(\Omega))'} \geq \|f\|_\infty - \varepsilon$ für jedes $\varepsilon > 0$. Insgesamt haben wir so erreicht, dass $\|F\|_{(L^1(\Omega))'} = \|f\|_{L^\infty(\Omega)}$. ■

Also sind die Normen auf $L^{p'}(\Omega)$ und $(L^p(\Omega))'$ für $p \in [1, \infty)$ nicht nur äquivalent, sondern sogar identisch, wenn wir f und F identifizieren.

Korollar 5.2.7 Für $p \in (1, \infty)$ gilt $(L^p(\Omega))'' = L^p(\Omega)$.

Den Beweis findet man dadurch, dass man zweimal den Representationssatz von Riesz verwendet.

5.3 Konvergenz

Wenn man das Minimum eines Funktional J sucht, dann geht man meistens wie folgt vor. Man konstruiert sich eine Minimalfolge.

Definition 5.3.1 Sei $J : X \rightarrow \mathbb{R}$ ein nach unten beschränktes Funktional. Dann heißt $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset X$ eine Minimalfolge, wenn

$$\lim_{n \rightarrow \infty} J(x_n) = \inf_{x \in X} J(x).$$

Wie man wissen sollte, ist ein Infimum nicht immer ein Minimum. Weil man in der Variationsrechnung oft ein Minimum, eigentlich sogar eine Minimalstelle sucht, sollte man sich anschauen unter welchen Bedingungen eine Minimalfolge konvergiert und wann folgendes gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} J(x_n) = J\left(\lim_{n \rightarrow \infty} x_n\right).$$

Stetigkeit von J bezüglich der Norm $\|\cdot\|_X$ würde reichen, wenn die Minimalfolge in dieser Norm konvergiert. Leider hat man in der Variationsrechnung höchst selten eine solche Stetigkeit gleichzeitig mit einer solchen Konvergenz.

5.3.1 Starke und schwache Konvergenz

Definition 5.3.2 Sei X ein Banachraum, $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset X$ und $x \in X$.

1. x_k konvergiert stark⁶ nach x in X für $k \rightarrow \infty$, wenn

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|x_k - x\|_X = 0.$$

Man schreibt: $x_n \rightarrow x$ in X .

⁶starke/schwache Konvergenz = strong/weak convergence

2. x_k konvergiert schwach nach x in X für $k \rightarrow \infty$, wenn

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_k) = f(x) \text{ für jede } f \in X'.$$

Man schreibt: $x_n \rightharpoonup x$ in X .

Genau so kann man Konvergenz für eine Folge $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset X'$ betrachten:

1. f_k konvergiert stark nach f in X' für $k \rightarrow \infty$, wenn

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|f_k - f\|_{X'} = 0.$$

Man schreibt $f_k \rightarrow f$ in X' .

2. f_k konvergiert schwach nach f in X' für $k \rightarrow \infty$, wenn

$$\lim_{k \rightarrow \infty} F(f_k) = F(f) \text{ für jedes } F \in X''.$$

Man schreibt $f_k \rightharpoonup f$ in X' .

Für Folgen in einem Dualraum gibt es noch eine andere Möglichkeit:

Definition 5.3.3 Sei X ein Banachraum, $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset X'$ und $f \in X'$.

3. f_k konvergiert schwach* nach f in (X', X) für $k \rightarrow \infty$, wenn

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f_k(x) = f(x) \text{ für jedes } x \in X.$$

Man schreibt $f_k \xrightarrow{*} f$ in (X', X) .

Die etwas komplizierte Schreibweise (X', X) braucht man, weil man den prä-dualen Raum X von X' kennen muß und der ist nicht eindeutig bestimmt durch X' .

Lemma 5.3.4 Starke Konvergenz impliziert schwache Konvergenz.

Schwache Konvergenz in X' impliziert Schwach*-Konvergenz in (X', X) .

Bemerkung 5.3.5 In X' gibt es also mindestens drei verschiedene Typen von Konvergenz: stark, schwach und schwach*. Schwach* ist schwächer als schwach.

Beweis. Zu der ersten Aussage: Sei $\{x_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset X$. Wenn $\lim_{k \rightarrow \infty} \|x_k - x\|_X = 0$, dann folgt für $f \in X'$ mit $\|f\|_{X'}$ beschränkt, weil f stetig ist, dass

$$|f(x_k) - f(x)| = |f(x_k - x)| \leq \|f\|_{X'} \|x_k - x\|_X \rightarrow 0.$$

Zu der zweiten Aussage: Sei $\{f_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset X'$ eine schwach konvergente Folge in X' . Dann gilt für jedes $F \in X''$, dass $\lim_{k \rightarrow \infty} F(f_k) = F(f)$. Nehmen wir das Funktional $F_x \in X''$, definiert durch

$$F_x(f) = f(x),$$

so folgt

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f_k(x) - f(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} F_x(f_k) - F_x(f) = 0.$$

■

Proposition 5.3.6 Sei X ein Banachraum.

- Wenn $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset X$ schwach gegen x konvergiert, also $x_k \rightharpoonup x$, dann ist $\|x_k\|_X$ gleichmäßig beschränkt und $\|x\|_X \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \|x_n\|_X$.
- Wenn $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset X'$ schwach gegen f konvergiert, also $f_k \rightharpoonup f$, dann ist $\|f_k\|_{X'}$ gleichmäßig beschränkt und $\|f\|_{X'} \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \|f_n\|_{X'}$.
- Wenn $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset X'$ schwach* gegen f konvergiert, also $f_k \xrightarrow{*} f$, dann ist $\|f_k\|_{X'}$ gleichmäßig beschränkt und $\|f\|_{X'} \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \|f_n\|_{X'}$.

Bemerkung 5.3.7 Das zweite Ergebnis folgt aus dem letzten.

Für einen Beweis dieser Proposition verweisen wir auf [3, Proposition III.5 (iii) und Proposition III.12 (iii)].

Lemma 5.3.8 Sei $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset X$ und $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset X'$.

1. Wenn $x_k \rightharpoonup x$ und $f_k \rightarrow f$, dann $f_k(x_k) \rightarrow f(x)$.
2. Wenn $x_k \rightarrow x$ und $f_k \rightharpoonup f$, dann $f_k(x_k) \rightarrow f(x)$.
3. Wenn $x_k \rightarrow x$ und $f_k \xrightarrow{*} f$, dann $f_k(x_k) \rightarrow f(x)$.

Beweis. Für die erste Behauptung verwendet man

$$\begin{aligned} |f_k(x_k) - f(x)| &\leq |f_k(x_k) - f(x_k)| + |f(x_k) - f(x)| \leq \\ &\leq \|f_k - f\|_{X'} \|x_k\|_X + |f(x_k) - f(x)| \rightarrow 0 \end{aligned}$$

weil $\|f_k - f\|_{X'} \rightarrow 0$, $\|x_k\|_X$ gleichmäßig beschränkt ist und $x_k - x \rightarrow 0$. Ähnliches gilt für 2 und 3. ■

Bemerkung 5.3.9 Aus $x_k \rightharpoonup x$ und $f_k \rightharpoonup f$ folgt im Allgemeinen nicht, dass $f_k(x_k)$ gegen $f(x)$ konvergiert. Für ein Gegenbeispiel kann man $X = L^2(0, \pi)$ verwenden. Weil $X = L^2(0, \pi)$ ein Hilbertraum ist, kann man X und X' identifizieren. Wir nehmen $x_k = f_k = (t \mapsto \sin(kt))$. Für stetige Funktionen g gilt

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_0^\pi \sin(kt) g(t) dt = 0$$

und weil man jede Funktion h in $L^2(0, \pi)$ mit stetigen Funktionen approximieren kann, folgt aus

$$\begin{aligned} \left| \int_0^\pi \sin(kt) h(t) dt \right| &\leq \left| \int_0^\pi \sin(kt) (h(t) - g(t)) dt \right| + \left| \int_0^\pi \sin(kt) g(t) dt \right| \\ &\leq \|x_k\|_{L^2} \|h - g\|_{L^2} + \left| \int_0^\pi \sin(kt) g(t) dt \right|, \end{aligned}$$

dass $x_k, f_k \rightharpoonup 0$. Man findet jedoch auch, dass

$$f_k(x_k) = \int_0^\pi \sin(kt)^2 dt = \frac{1}{2}\pi \neq 0.$$

5.3.2 Einige Konvergenzsätze

Wenn die Funktionen $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset C(\bar{\Omega})$ in $\|\cdot\|_{C(\bar{\Omega})}$ nach f konvergieren und Ω ist beschränkt, kann man sich schnell überzeugen, dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Omega} f_n(x) dx = \int_{\Omega} \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) dx,$$

denn

$$\left| \int_{\Omega} f_n(x) dx - \int_{\Omega} f(x) dx \right| \leq \int_{\Omega} \|f_n - f\|_{C(\bar{\Omega})} dx \leq \lambda(\Omega) \|f_n - f\|_{C(\bar{\Omega})}.$$

Im Allgemeinen kann man Integral und Grenzwert nicht vertauschen. Man betrachte als

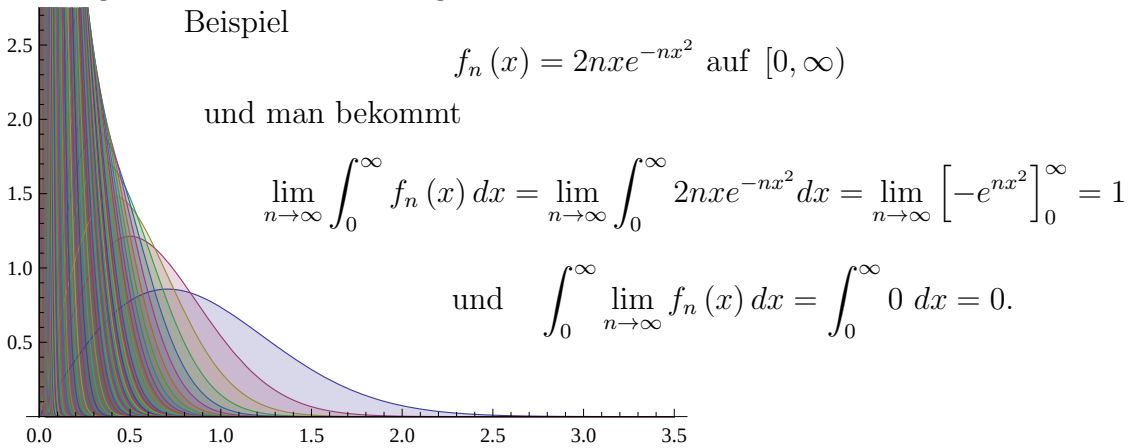


Abbildung 5.1: Bilder zu $f_n(x) = 2ne^{-nx^2}$.

Theorem 5.3.10 (Das Lemma von Fatou)

Sei $\{f_k\}_{k=1}^{\infty} \subset L^1(\Omega)$ eine Folge mit $f_k \geq 0$ und $\sup_{k \in \mathbb{N}} \int_{\Omega} f_k dx < \infty$.

Dann ist $f \in L^1(\Omega)$ wohldefiniert durch $f(x) := \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k(x)$ f.ü. und

$$\int_{\Omega} f dx \leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega} f_k dx.$$

Für die Sätze zu monotoner und majorisierter Konvergenz verweisen wir auf den Appendix.

Im nächsten Theorem findet man das Beispiel einer Folge, die nur schwach und nicht stark konvergiert. Wir nehmen $\Omega = (0, 1)^n \subset \mathbb{R}^n$ und definieren für $f \in L^p(\Omega)$ die Funktionen

$$f_k(x_1, \dots, x_n) := f(kx_1 - [kx_1], \dots, kx_n - [kx_n]). \quad (5.3)$$

Hier ist $[t] = \max\{n \in \mathbb{Z}; n \leq t\}$ die sogenannte Entier-Funktion, hierzulande auch als Gaußklammer oder Ganzzteilmfunktion bekannt.

Theorem 5.3.11 (Riemann-Lebesgue) Sei $1 \leq p \leq \infty$ und $\Omega = (0, 1)^n \subset \mathbb{R}^n$. Sei $f \in L^p(\Omega)$ und definiere f_k wie in (5.3). Dann gilt

$$f_k \rightharpoonup \int_{\Omega} f(y) dy \text{ in } L^p(\Omega) \text{ für } 1 \leq p < \infty,$$

$$f_k \xrightarrow{*} \int_{\Omega} f(y) dy \text{ in } (L^{\infty}(\Omega), L^1(\Omega)) \text{ für } p = \infty.$$

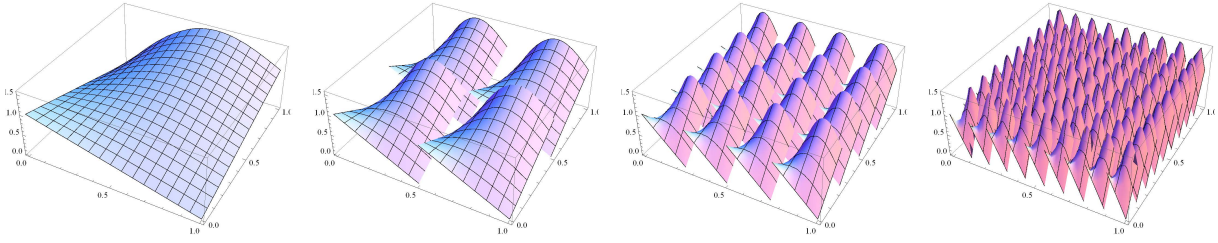


Abbildung 5.2: Für eine Funktion f stehen hier die Bilder zu $f_1 = f$, f_2 , f_4 und f_9 , so wie sie in (5.3) definiert werden.

Aufgabe 15 Zeige, dass $f_k \rightarrow \int_{\Omega} f(y)dy$ nur für konstante Funktionen f gilt, genau gesagt, für Funktionen $f \in L^p(\Omega)$, bei denen es ein $c \in \mathbb{R}$ gibt mit fast überall $f = c$.

Beweis. Vorweg sei bemerkt, dass man direkt zeigen kann, dass für $p \in [1, \infty]$ gilt

$$\|f_k\|_{L^p(\Omega)} = \|f\|_{L^p(\Omega)}.$$

Nehmen wir $p \in (1, \infty]$. Weil Ω beschränkt ist und weil $f \in L^p(\Omega)$, folgt auch, dass $f \in L^1(\Omega)$ und $\int_{\Omega} f(y)dy \in \mathbb{R}$. Weiter gilt $(f - c)_k = f_k - c$ und weil $f_k \xrightarrow{(*)} c$ äquivalent ist zu $f_k - c \xrightarrow{(*)} 0$, dürfen wir sogar annehmen, dass $\int_{\Omega} f(y)dy = 0$. Sei $\varepsilon > 0$. Weil $C_0^\infty(\Omega)$ dicht liegt in $L^{p'}(\Omega)$ mit $p' \in [1, \infty)$ kann man für jedes $g \in L^{p'}(\Omega)$ mit $p' \in [1, \infty)$ einen $\varphi \in C(\bar{\Omega})$ finden mit $\|g - \varphi\|_{L^{p'}(\Omega)} \leq \varepsilon$. Als nächstes nimmt man $k_0 \in \mathbb{N}$ derart, dass für $|x - y| \leq \frac{\sqrt{n}}{k_0}$ gilt $|\varphi(x) - \varphi(y)| \leq \varepsilon$. Fixieren wir für $\alpha \in \mathbb{N}^n$ den Hyperkubus $K_\alpha^m = \{x \in \Omega; \alpha_i - 1 \leq mx_i \leq \alpha_i\}$. Dann haben wir für $k \geq k_0$

$$\begin{aligned} \left| \int f_k(x)g(x)dx \right| &\leq \left| \int f_k(x)\varphi(x)dx \right| + \|f_k\|_{L^p(\Omega)} \|g - \varphi\|_{L^{p'}(\Omega)} \leq \\ &\leq \sum_{1 \leq \alpha_i \leq k} \left| \int_{K_\alpha^k} f_k(x)\varphi(x)dx \right| + \|f\|_{L^p(\Omega)} \varepsilon \leq \\ &\leq \sum_{1 \leq \alpha_i \leq k} \left(\left| \int_{K_\alpha^k} f_k(x)\varphi\left(\frac{1}{k}\alpha_i\right)dx \right| + \varepsilon \int_{K_\alpha^m} |f_k(x)| dx \right) + \|f\|_{L^p(\Omega)} \varepsilon \leq \\ &\leq \sum_{1 \leq \alpha_i \leq k} \left| \varphi\left(\frac{1}{k}\alpha_i\right) \right| \left| \int_{K_\alpha^k} f_k(x)dx \right| + 2\|f\|_{L^p(\Omega)} \varepsilon = 2\|f\|_{L^p(\Omega)} \varepsilon. \end{aligned}$$

Damit folgt $f_k \rightharpoonup \int_{\Omega} f(y)dy$ in $L^p(\Omega)$ für $1 < p < \infty$ und $f_k \xrightarrow{*} \int_{\Omega} f(y)dy$ in $(L^\infty(\Omega), L^1(\Omega))$ für $p = \infty$.

Bleibt übrig $p = 1$. Das dürfen Sie selber machen. ■

Theorem 5.3.12 Sei X ein Banachraum. Dann sind folgende Aussagen gleichwertig.

- X ist reflexiv.
- Für jede beschränkte Folge $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset X$ gilt, dass es eine Teilfolge $\{x_{k_m}\}_{m=1}^\infty$ und ein $x \in X$ gibt so, dass $x_{k_m} \rightharpoonup x$.

Für einen Beweis dieses Theorems verweisen wir auf einen Satz von Kakutani. Siehe zum Beispiel [3, Théorème III.16].

5.4 Nochmals das erste Hauptlemma

Schlußendlich geben wir noch eine kräftigere Fassung von Lemma 2.2.1, dem Hauptlemma der Variationsrechnung:

Lemma 5.4.1 (Hauptlemma der Variationsrechnung) *Wenn $f \in L^1_{loc}(\Omega)$ und es gilt*

$$\int_U f \varphi \, dx = 0 \text{ für alle } \varphi \in C_c^\infty(\Omega),$$

dann hat man $f = 0$ f.ü.

Für einen Beweis verweisen wir auch auf [3, Lemme IV.2 page 61].

Variationsrechnung

Kapitel 6



Sobolev-Räume

Wir möchten Funktionenräume wie folgt definieren

$$W^{k,q}(\Omega) = \{f \in L^q(\Omega); D^\alpha f \in L^q(\Omega) \text{ für alle } \alpha \text{ mit } |\alpha| \leq k\},$$

also mit Funktionen aus $L^q(\Omega)$, die Ableitungen haben, die auch wieder in $L^q(\Omega)$ liegen. Dann ergibt sich jedoch das folgende Problem. Wie kann man für $u \in L^q(\Omega)$, das heißt, für eine Funktion, die nur fast überall definiert ist, die Ableitung definieren. Die Standarddefinition einer Ableitung ist ja punktweise definiert.

6.1 Schwache Ableitung

Eine Möglichkeit eine Ableitung zu definieren, bietet das Hauptlemma der Variationsrechnung und die partielle Integration. Wenn man die Ableitung $\frac{\partial}{\partial x_i} u = v$ kennt, dann hat man

$$\int_{\Omega} u \frac{\partial}{\partial x_i} \varphi \, dx = - \int_{\Omega} v \varphi \, dx \text{ für alle } \varphi \in C_c^\infty(\Omega). \quad (6.1)$$

Die Gleichung in (6.1) ist sinnvoll für Funktionen u, v , die lediglich in $L^1_{loc}(\Omega)$ liegen. Auch sieht man, dass es höchstens eine Funktion $v \in L^1_{loc}(\Omega)$ geben kann. Dies folgt aus der letzten Version des Hauptlemmas (Lemma 5.4.1).

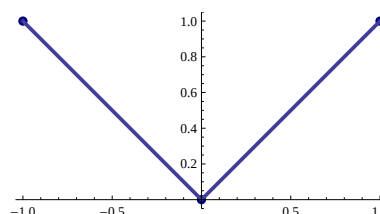
Definition 6.1.1 Die Funktion $u \in L^1_{loc}(\Omega)$ hat eine schwache D^α -Ableitung¹ $v \in L^1_{loc}(\Omega)$, wenn

$$\int_{\Omega} u D^\alpha \varphi \, dx = (-1)^{|\alpha|} \int_{\Omega} v \varphi \, dx \text{ für alle } \varphi \in C_c^\infty(\Omega). \quad (6.2)$$

Bemerkung 6.1.2 Es folgt sofort, dass eine klassische Ableitung immer auch die schwache Ableitung ist. In den nächsten Beispielen werden wir sehen, dass es schwache Ableitungen gibt, die nicht als klassische Ableitung existieren.

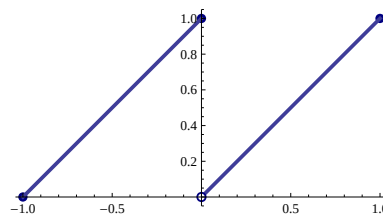
Beispiel 6.1.3 Betrachte die Funktionen $f_i : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch:

$$1. \quad f_1(x) = |x| = \begin{cases} -x & \text{für } x \in [-1, 0], \\ x & \text{für } x \in (0, 1], \end{cases}$$

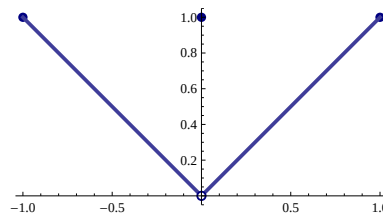


¹schwache Ableitung = weak derivative

$$2. \quad f_2(x) = \begin{cases} x+1 & \text{für } x \in [-1, 0], \\ x & \text{für } x \in (0, 1], \end{cases}$$



$$3. \quad f_3(x) = \begin{cases} -x & \text{für } x \in [-1, 0], \\ 1 & \text{für } x = 0, \\ x & \text{für } x \in (0, 1], \end{cases}$$



Zu 1. Weil eine klassische Ableitung immer f.ü. mit der schwachen Ableitung übereinstimmt auf den Gebieten, in denen die klassische Ableitung existiert, kann man raten, dass wenn v_1 die schwache Ableitung ist, f.ü. gelten muss, dass

$$v_1(x) = f'_1(x) = \operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{für } x \in (-1, 0), \\ 1 & \text{für } x \in (0, 1). \end{cases}$$

In $\{-1, 0, 1\}$ kann man v beliebig lassen weil die drei Punkte eine Nullmenge bilden. Ist $v_1(x) = \operatorname{sgn}(x)$ die Ableitung? Wir testen:

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 f_1 \varphi' dx &= \int_{-1}^0 -x \varphi'(x) dx + \int_0^1 x \varphi'(x) dx = \\ &= [-x \varphi(x)]_{-1}^0 + [x \varphi(x)]_0^1 - \int_{-1}^0 \varphi(x) dx - \int_0^1 \varphi(x) dx = \\ &= \varphi(0) - \varphi(0) - \int_{-1}^1 \operatorname{sgn}(x) \varphi(x) dx = - \int_{-1}^1 \operatorname{sgn}(x) \varphi(x) dx. \end{aligned}$$

Wir haben unterwegs verwendet, dass $\varphi(-1) = \varphi(1) = 0$. Die Antwort für f_1 ist also:

Auf $(-1, 1)$ ist $x \mapsto \operatorname{sgn}(x)$ die schwache Ableitung von $x \mapsto |x|$.

Zu 2. Ebenso hat man

$$v_2(x) = f'_2(x) = 1 \text{ f.ü. für } x \in (-1, 0) \cup (0, 1)$$

als Kandidaten für die schwache Ableitung von f_2 . Wenn wir diese Vermutung testen, finden wir jedoch

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 f_2 \varphi' dx &= \int_{-1}^0 (x+1) \varphi'(x) dx + \int_0^1 x \varphi'(x) dx = \\ &= [(x+1) \varphi(x)]_{-1}^0 + [x \varphi(x)]_0^1 - \int_{-1}^0 \varphi(x) dx - \int_0^1 \varphi(x) dx = \\ &= \varphi(0) - \int_{-1}^1 1 \varphi(x) dx. \end{aligned}$$

Für $\varphi(0) \neq 0$ passt die Ableitung nicht. Auf $(-1, 1)$ hat f_2 also keine schwache Ableitung.

Zu 3. Weil $f_1 = f_3$ auf $[-1, 1]$ f.ü. gilt, ist v_1 auch die schwache Ableitung von f_3 auf $(-1, 1)$.

Beispiel 6.1.4 Betrachten wir die Funktion $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $f(x) = \log(|x|^2)$ für $x \neq 0$. Diese Funktion liegt in $L^1_{\text{loc}}(\mathbb{R}^2)$, denn

$$\int_{|x|<M} \log(|x|^2) dx = 2\pi \int_{r=0}^M \log(r^2) r dr < \infty.$$

Hat diese Funktion schwache Ableitungen? Wir behaupten, dass $v_1(x) = \frac{2x_1}{x_1^2+x_2^2}$ die schwache Ableitung nach x_1 und dass $v_2(x) = \frac{2x_2}{x_1^2+x_2^2}$ die schwache Ableitung nach x_2 ist. Nehme $\varphi \in C_c^\infty(\mathbb{R}^2)$ mit kompakten Träger Ω und man findet

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^2} \log(|x|^2) \frac{\partial}{\partial x_1} \varphi(x) dx &= \lim_{\varepsilon \downarrow 0} \int_{\Omega \setminus B_\varepsilon(0)} \log(|x|^2) \frac{\partial}{\partial x_1} \varphi(x) dx = \\ &= \lim_{\varepsilon \downarrow 0} \left(\int_{\partial B_\varepsilon(0)} \log(|x|^2) \varphi(x) \frac{-x_1}{|x|} d\sigma - \int_{\Omega \setminus B_\varepsilon(0)} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \log(|x|^2) \right) \varphi(x) dx \right) = \\ &= \lim_{\varepsilon \downarrow 0} \left(\int_{\partial B_\varepsilon(0)} \log(\varepsilon^2) \mathcal{O}(1) d\sigma - \int_{\Omega \setminus B_\varepsilon(0)} v_1(x) \varphi(x) dx \right) = \\ &= \lim_{\varepsilon \downarrow 0} \left(2\pi \log(\varepsilon^2) \mathcal{O}(\varepsilon) d\sigma - \int_{\Omega \setminus B_\varepsilon(0)} v_1(x) \varphi(x) dx \right) = \\ &= - \int_{\Omega} v_1(x) \varphi(x) dx = - \int_{\mathbb{R}^2} v_1(x) \varphi(x) dx. \end{aligned}$$

Ähnlich ist auch v_2 die schwache Ableitung nach x_2 von f .

Wir haben hier verwendet, dass, wenn eine Funktion integrierbar ist auf Ω , das folgende gilt:

$$\lim_{\varepsilon \downarrow 0} \int_{\Omega \setminus B_\varepsilon(w)} f(x) dx = \int_{\Omega} f(x) dx.$$

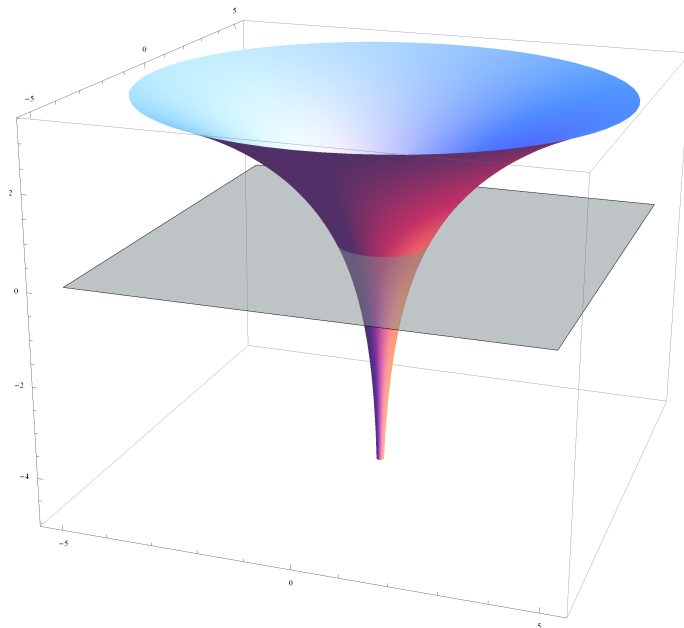


Abbildung 6.1: Darstellung der Funktion $x \mapsto \log(|x|^2) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Trotz Singularität schwach differenzierbar.

Aufgabe 16 Die Funktion $g : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ ist definiert auf folgende Art: $g(0) = 0$ und $g(1) = 1$. Das Intervall $[0, 1]$ wird in drei gleich große Teile geteilt und auf das mittlere Stück setzen wir g halbwegs an: $g(x) = \frac{1}{2}$ für $x \in [\frac{1}{3}, \frac{2}{3}]$. Die restlichen Intervalle teilen wir wieder in drei Teile und machen das gleiche: $g(x) = \frac{1}{4}$ für $x \in [\frac{1}{9}, \frac{2}{9}]$ und $g(x) = \frac{3}{4}$ für $x \in [\frac{7}{9}, \frac{8}{9}]$. Wieder werden die restlichen Intervalle in drei Teile geteilt und $g(x) = \frac{1}{8}$ für $x \in [\frac{1}{27}, \frac{2}{27}]$, $g(x) = \frac{3}{8}$ für $x \in [\frac{4}{27}, \frac{5}{27}]$ und so weiter. Damit wird g auf eine dichte Menge $M \subset [0, 1]$ definiert und für die restlichen x setzen wir $g(x) = \inf \{g(t); x < t \in M\}$.

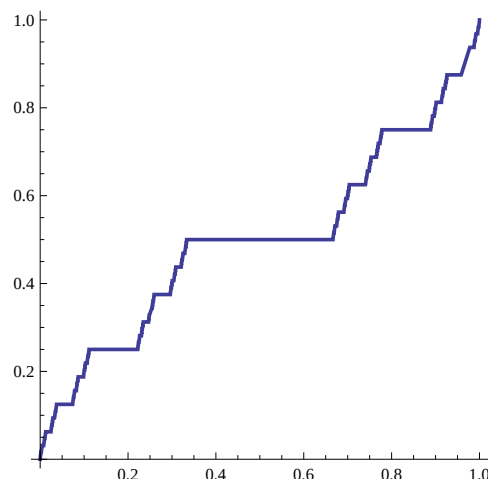
Zeigen Sie, dass:

1. Für $x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{3^k}$ mit $a_k \in \{0, 1, 2\}$

$$\text{gilt } g(x) = \sum_{k=1}^{\min\{\ell; a_\ell=1\}} \frac{\min(1, a_k)}{2^k}.$$

2. g stetig ist;
3. $g'(x) = 0$ f.ü.;
4. g keine schwache Ableitung auf $(0, 1)$ hat.

Übrigens hat g schon eine schwache Ableitung auf $(\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$, $(\frac{1}{9}, \frac{2}{9})$, $(\frac{7}{9}, \frac{8}{9})$ usw.



Aufgabe 17 Betrachte $f_s(x) = |x|^s$ auf $B_1(0) \subset \mathbb{R}^n$ mit $s \in \mathbb{R}$. Für welche s und n hat f_s eine schwache Ableitung? Für welche s und n existiert $\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f_s$ im schwachen Sinne?

Aufgabe 18 Zeigen Sie, dass für schwache Ableitungen von $u, v \in L^1_{loc}(\Omega)$ folgendes gilt:

1. $\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} u = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i} u$.

Das heißt, angenommen die rechte (oder linke) Seite in dieser Gleichung ist wohldefiniert, dann zeige, dass auch die linke (rechte) Seite wohldefiniert ist und dass die beiden Seiten fast überall identisch sind.

2. $\frac{\partial}{\partial x_i} (c_1 u + c_2 v) = c_1 \frac{\partial}{\partial x_i} u + c_2 \frac{\partial}{\partial x_i} v$ für $c_i \in \mathbb{R}$;

3. $\frac{\partial}{\partial x_i} (\psi v) = \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \psi \right) v + \psi \left(\frac{\partial}{\partial x_i} v \right)$ für $\psi \in C_c^\infty(\Omega)$.

4. $\frac{\partial}{\partial x_i} (\psi(u)) = \psi'(u) \frac{\partial}{\partial x_i} u$ für $\psi \in C^1(\mathbb{R})$ mit ψ' gleichmäßig beschränkt.

5. $\frac{\partial}{\partial x_i} (H(u)u) = H(u) \frac{\partial}{\partial x_i} u$, wobei H die Heaviside Funktion ist:

$$H(u) = \begin{cases} 1 & \text{für } u > 0, \\ 0 & \text{für } u \leq 0. \end{cases} \quad (6.3)$$

6.2 Definition der Sobolev-Räume

In der nächsten Definition ist α wieder ein Multiindex wie auf Seite 7.

Definition 6.2.1 Sei $p \in [1, \infty]$. Der Sobolev-Raum $W^{k,p}(\Omega)$ ist der Vektorraum aller Funktionen $u \in L^p(\Omega)$ so, dass für alle α mit $|\alpha| \leq k$

1. die Ableitung $D^\alpha u$ im schwachen Sinne existiert, und
2. $D^\alpha u \in L^p(\Omega)$.

Eine Norm für $W^{k,p}(\Omega)$ ist definiert durch

$$\|u\|_{W^{k,p}(\Omega)} = \sum_{|\alpha| \leq k} \|D^\alpha u\|_{L^p(\Omega)}.$$

Ab jetzt werden wir kurzerhand $W^{k,p}(\Omega)$ für den Raum $(W^{k,p}(\Omega), \|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)})$ schreiben. Einige Ergebnisse für $W^{k,p}(\Omega)$, die wir nicht beweisen, sind:

Theorem 6.2.2 Sei Ω eine offene Teilmenge von $\mathbb{R}^n$.

1. $W^{k,p}(\Omega)$ für $p \in [1, \infty]$ ist ein Banachraum.
2. $W^{k,p}(\Omega)$ für $p \in [1, \infty)$ ist separabel (= hat eine abzählbare dichte Teilmenge).
3. $W^{k,p}(\Omega)$ für $p \in (1, \infty)$ ist reflexiv.
4. $H^k(\Omega) := W^{k,2}(\Omega)$ mit Skalarprodukt $\langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle_k$, definiert durch

$$\langle\langle u, v \rangle\rangle_k := \sum_{|\alpha| \leq k} \int_{\Omega} D^\alpha u \, D^\alpha v \, dx,$$

ist sogar ein Hilbertraum.

Bemerkung 6.2.3 Für $p < \infty$ sind

$$\sup_{|\alpha| \leq k} \|D^\alpha u\|_{L^p(\Omega)}, \quad \sum_{|\alpha| \leq k} \|D^\alpha u\|_{L^p(\Omega)} \quad \text{und} \quad \left(\sum_{|\alpha| \leq k} \|D^\alpha u\|_{L^p(\Omega)}^p \right)^{1/p}$$

äquivalente Normen; ebenso sind

$$\sup_{|\alpha| \leq k} \|D^\alpha u\|_{L^\infty(\Omega)} \quad \text{und} \quad \sum_{|\alpha| \leq k} \|D^\alpha u\|_{L^\infty(\Omega)}$$

äquivalent für $p = \infty$.

Dann werden wir auch noch Sobolev-Räume brauchen, die nur die Funktionen enthalten, die auf dem Rand des Gebietes Ω Null werden. Weil u und $\tilde{u}$, definiert durch

$$\tilde{u}(x) = \begin{cases} u(x) & \text{für } x \in \Omega \\ 0 & \text{für } x \in \partial\Omega \end{cases}$$

(mit Lebesgue Maß von $\partial\Omega$ gleich 0) sich nicht unterscheiden lassen, kann man nicht einfach $u = 0|_{\partial\Omega}$ setzen. Ein Weg, der dieses Problem umgeht, ist folgender.

Definition 6.2.4 Der Sobolev-Raum $W_0^{k,p}(\Omega)$ ist definiert durch

$$W_0^{k,p}(\Omega) := \overline{C_c^\infty(\Omega)}^{\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}},$$

das heißt, $W_0^{k,p}(\Omega)$ ist der Abschluß von $C_c^\infty(\Omega)$ in der $\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}$ -Norm.

Bemerkung 6.2.5 Weil $C_c^\infty(\Omega) \subset W^{k,p}(\Omega)$ gilt und weil $W^{k,p}(\Omega)$ ein Banach-Raum ist, folgt

$$W_0^{k,p}(\Omega) = \overline{C_c^\infty(\Omega)}^{\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}} \subset \overline{W^{k,p}(\Omega)}^{\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}} = W^{k,p}(\Omega)$$

und auch, dass $W_0^{k,p}(\Omega)$ mit $\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}$ als Norm ein Banach-Raum ist.

Bemerkung 6.2.6 Für Funktionen $u \in W_0^{k,p}(\Omega) \cap C^\infty(\bar{\Omega})$ kann man zeigen, dass $D^\alpha u = 0$ gilt auf $\partial\Omega$ für $|\alpha| < k$. Es gilt jedoch nicht, dass $D^\alpha u = 0$ auf $\partial\Omega$ für $|\alpha| = k$. Also

$$W_0^{k,p}(\Omega) \cap C^\infty(\bar{\Omega}) \subset C_0^{k-1}(\bar{\Omega}) \quad \text{und} \quad W_0^{k,p}(\Omega) \cap C^\infty(\bar{\Omega}) \not\subset C_0^k(\bar{\Omega}).$$

Hätte man auch $W^{k,p}(\Omega)$ definieren können durch

$$\overline{C^\infty(\Omega)}^{\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}} \quad \text{oder} \quad \overline{C^\infty(\bar{\Omega})}^{\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}} ?$$

Wenn man $C^\infty(\Omega)$ betrachtet, sieht man sofort, dass die Funktionen, die man dann hat, am Rand zu wild werden können. Betrachte zum Beispiel $x \mapsto x^{-28}$ auf $\Omega = (0, 1)$. Wenn man jedoch $C^\infty(\bar{\Omega})$ nimmt, werden diese Funktionen zu zahm sein, wenn das Gebiet zu wild ist.

Abbildung 6.2: Gebiet mit Spitze:

In einem Gebiet mit einer Spitze ist eine Funktion aus $W^{k,p}(\Omega)$ nicht unbedingt mit Funktionen aus $C^\infty(\bar{\Omega})$ zu approximieren.

Trotzdem kann man etwas sagen. Ein Resultat von Meyers und Serrin² aus dem Jahr 1964 besagt, dass für $p \in [1, \infty)$ gilt

$$W^{k,p}(\Omega) = \overline{C^\infty(\Omega) \cap W^{k,p}(\Omega)}^{\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}}.$$

Nur wenn der Rand des Gebietes zusätzliche Bedingungen erfüllt (Lipschitz-stetig) hat man

$$W^{k,p}(\Omega) = \overline{C^\infty(\bar{\Omega})}^{\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}}.$$

Genaueres zu dieser Art von Fragen findet man im Buch von Adams und Fournier [1].

Aufgabe 19 Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ und $1 \leq p < q \leq \infty$. Dann hat man

$$C^1(\bar{\Omega}) \subsetneq W^{1,q}(\Omega) \subsetneq W^{1,p}(\Omega) \subsetneq L^p(\Omega),$$

nicht nur als Menge, sondern sogar auch als stetige Einbettung. Zeige dies.

²Vor dem Jahr 1964 betrachtete man neben $W^{k,p}(\Omega)$ auch den Raum $H^{k,p}(\Omega)$, definiert durch $H^{k,p}(\Omega) := \overline{C^\infty(\Omega) \cap W^{k,p}(\Omega)}^{\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}}$. Titel der Arbeit von Meyers und Serrin ist $H = W$ und der Text des Theorems ist $H \equiv W$. Die Arbeit findet man unter:

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC300210/pdf/pnas00180-0073.pdf>

Wir werden noch zurückkommen auf die Verbindungen zwischen $C^k(\bar{\Omega})$ und $W^{\ell,p}(\Omega)$. Ein einfaches Ergebnis geben wir mal voraus.

Lemma 6.2.7 *Sei $p > 1$ und $u \in W^{1,p}(a,b)$. Dann gibt es $\tilde{u} \in C[a,b]$ derartig, dass $u = \tilde{u}$ f.ü.*

Beweis. Nehme $c \in (a,b)$. Weil $u' \in L^p(a,b)$ gilt, ist

$$v(x) = \int_c^x u'(s) ds$$

wohldefiniert. Wir finden $v \in C[a,b]$, denn

$$\begin{aligned} |v(x) - v(y)| &= \left| \int_y^x u'(s) ds \right| \leq \left| \int_y^x |u'(s)|^p ds \right|^{\frac{1}{p}} \left| \int_y^x 1 ds \right|^{\frac{1}{q}} \leq \\ &\leq |x - y|^{\frac{1}{q}} \|u'\|_{L^p(a,b)}. \end{aligned}$$

Außerdem haben wir für $\varphi \in C_c^\infty(a,b)$, dass

$$\begin{aligned} \int_a^b \varphi'(x) v(x) dx &= \int_a^b \varphi'(x) \left(\int_c^x u'(s) ds \right) dx = \int_a^b \int_c^x \varphi'(x) u'(s) ds dx = \\ &= - \int_a^c \int_x^c \varphi'(x) u'(s) ds dx + \int_c^b \int_c^x \varphi'(x) u'(s) ds dx = \\ &\quad (\text{Integrationsfolge ändern wie in Abbildung 6.3}) \\ &= - \int_a^c \left(\int_a^s \varphi'(x) dx \right) u'(s) ds + \int_c^b \left(\int_s^b \varphi'(x) dx \right) u'(s) ds = \\ &= - \int_a^c \varphi(s) u'(s) ds - \int_c^b \varphi(s) u'(s) ds = - \int_a^b \varphi(s) u'(s) ds. \end{aligned}$$

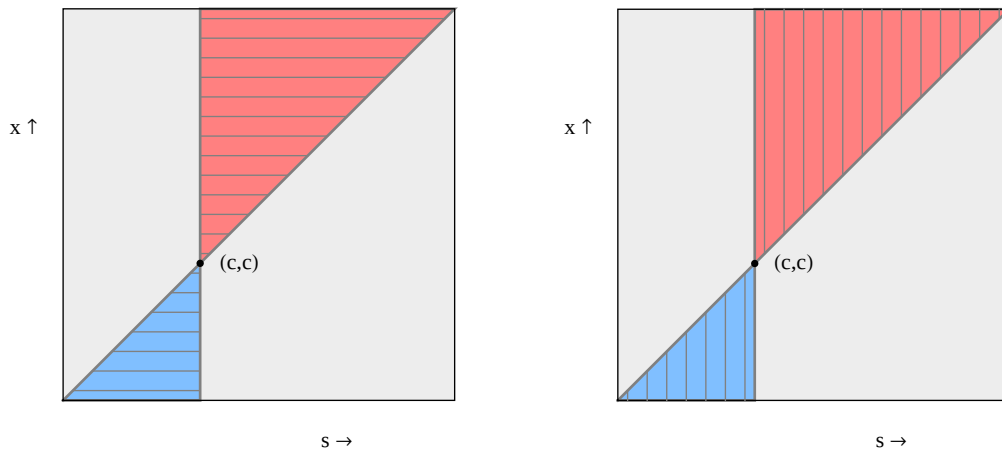


Abbildung 6.3: Links: erst s zwischen c und x . Rechts: erst x von 0 nach s bzw. von s nach 1.

So ist v schwach differenzierbar und es gilt

$$\int_a^b \varphi'(x) v(x) dx = - \int_a^b \varphi(s) u'(s) ds = \int_a^b \varphi'(s) u(s) ds.$$

Es folgt, dass

$$\int_a^b \varphi'(s) (v(s) - u(s)) ds = 0 \text{ für alle } \varphi \in C_0^\infty(a, b).$$

Mit Hilfe von Lemma 2.5.1, modifiziert wie in Lemma 5.4.1, folgt, dass es γ gibt derartig, dass $v(x) - u(x) = \gamma$ f.ü. Also nimmt man $\tilde{u} = v - \gamma$. ■

6.3 Approximationen

Die Räume $W_0^{k,p}(\Omega)$ haben wir definiert als Funktionenräume von Grenzwerten bezüglich der $\|\cdot\|_{W^{k,p}(\Omega)}$ -Norm von Funktionen aus $C_c^\infty(\Omega)$. Das bedeutet, dass wenn wir zeigen möchten, dass $u \in W_0^{k,p}(\Omega)$ gilt, wir eine Folge $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset C_c^\infty(\Omega)$ finden müssen, die u approximiert. Anders gesagt, wir müssen einen Weg in umgekehrter Richtung finden. Eine Möglichkeit, eine approximierende Folge zu finden, gibt uns der Friedrichs'sche Glätter aus Definition 4.3.10.

6.3.1 Konvolution, Faltung

Die Funktion $\varphi_1 \in C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$ hat man definiert durch

$$\varphi_1(x) = c_n \begin{cases} e^{\frac{-1}{1-|x|^2}} & \text{für } x \in B_1(0), \\ 0 & \text{für } x \notin B_1(0). \end{cases} \quad (6.4)$$

Die Konstante ist so gewählt, dass $\int_{B_1(0)} \varphi_1(x) dx = 1$ und man skaliert für $\varepsilon \in (0, 1)$ um $\varphi_\varepsilon \in C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$ mit Träger $\overline{B_\varepsilon(0)}$ zu bekommen:

$$\varphi_\varepsilon(x) = \varepsilon^{-n} \varphi_1(\varepsilon^{-1}x).$$

Definition 6.3.1 Die Konvolution oder Faltung von $v \in L_{loc}^1(\mathbb{R}^n)$ und $u \in C_c(\mathbb{R}^n)$ wird definiert durch

$$(v * u)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} v(x-y) u(y) dy. \quad (6.5)$$

Bemerkung 6.3.2 Wenn das Integral in (6.5) wohldefiniert ist, folgt

$$\int_{\mathbb{R}^n} v(x-y) u(y) dy = \int_{\mathbb{R}^n} u(x-y) v(y) dy.$$

Bemerkung 6.3.3 Die Konvolution kann man auch definieren für zum Beispiel $u \in L^p(\mathbb{R}^n)$ und $v \in L^q(\mathbb{R}^n)$, wenn $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Man kann leicht zwei Funktionen finden, die sich nicht konvolvieren lassen: $u(x) = v(x) = 1$.

Bemerkung 6.3.4 Man definiert $\varphi_\varepsilon * u$ auch für Funktionen $u \in L^1(\Omega)$ mit $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, indem man u außerhalb Ω fortsetzt durch 0:

$$\bar{u}(x) = \begin{cases} u(x) & \text{für } x \in \Omega, \\ 0 & \text{für } x \in \mathbb{R}^n \setminus \Omega, \end{cases}$$

und findet so

$$(\varphi_\varepsilon * u)(x) := (\varphi_\varepsilon * \bar{u})(x) = \int \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_\varepsilon(x-y) \bar{u}(y) dy = \int \int_{\Omega} \varphi_\varepsilon(x-y) u(y) dy. \quad (6.6)$$

Diese letzte Formel ist sogar wohldefiniert für $u \in L^1_{loc}(\Omega)$, wenn $x \in \Omega_\varepsilon$. Die Menge $\Omega_\varepsilon \subset \Omega$ wird definiert durch:

$$\Omega_\varepsilon := \{x \in \Omega; d(x, \partial\Omega) > \varepsilon\}. \quad (6.7)$$

Hier ist

$$d(x, A) = \inf \{|x - a|; a \in A\}, \quad (6.8)$$

die Distanz von x zu A .

Wenn Ω eine Zwiebel wäre, dann wäre bei Ω_ε eine ε -dicke Schicht entfernt.

6.3.2 Approximieren mit Friedrichs

Wir werden die Approximationen von u durch $(\varphi_\varepsilon * u)$ betrachten.

Wir haben schon gesehen, dass $u \in C(\mathbb{R}^n)$ auf kompakte Teilmengen, gleichmäßig durch $u_k = \varphi_{1/k} * u$ approximiert wird:

$$\begin{aligned} \|u - u_k\|_{C(K)} &= \sup_{x \in K} \left| \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_{1/k}(x - y) u(y) dy - u(x) \right| = \\ &= \sup_{x \in K} \left| \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_{1/k}(x - y) u(y) dy - \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_{1/k}(x - y) dy u(x) \right| = \\ &= \sup_{x \in K} \left| \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_{1/k}(x - y) (u(y) - u(x)) dy \right| = \\ &= \sup_{x \in K} \left| \int_{B_{1/k}(x)} \varphi_{1/k}(x - y) (u(y) - u(x)) dy \right|. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Weil u gleichmäßig stetig ist auf $K_1 = \{x \in \mathbb{R}^n; d(x, K) \leq 1\}$, gibt es zu jedem $\varepsilon > 0$ ein $\delta_\varepsilon > 0$ so, dass für alle $x, y \in K_1$ mit $|x - y| < \delta_\varepsilon$ folgt, dass $|u(x) - u(y)| < \varepsilon$. Also, sei $\varepsilon > 0$, dann nimmt man $k > \delta_\varepsilon^{-1}$ und findet aus (6.9), dass

$$\|u - u_k\|_{C(K)} < \sup_{x \in K} \int_{B_{1/k}(x)} |\varphi_{1/k}(x - y)| \varepsilon dy = \varepsilon.$$

Auch nicht-stetige Funktionen u werden durch $\varphi_\varepsilon * u$ approximiert, wenn $\varepsilon \downarrow 0$.

Theorem 6.3.5 Sei Ω ein Gebiet in $\mathbb{R}^n$. Folgendes gilt:

1. Für $u \in L^1_{loc}(\mathbb{R}^n)$ gilt $\varphi_\varepsilon * u \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$.
2. Für $u \in L^1_{loc}(\Omega)$ und $\varepsilon < \delta$ gilt $(\varphi_\varepsilon * u)|_{\overline{\Omega_\delta}} \in C^\infty(\overline{\Omega_\delta})$ mit Ω_δ definiert in (6.7).
3. Für $u \in L^1_{loc}(\Omega)$ mit $u = 0$ f.ü. $\Omega \setminus \Omega_\delta$ und $\varepsilon < \delta$ gilt $\varphi_\varepsilon * u \in C^\infty_0(\Omega)$.
4. Für $u \in L^1_{loc}(\Omega)$ gilt $\varphi_\varepsilon * u \rightarrow u$ f.ü.
5. Für $u \in L^p(\Omega)$ und $p \in [1, \infty)$ gilt

$$\|\varphi_\varepsilon * u\|_{L^p(\Omega)} \leq \|u\|_{L^p(\Omega)} \quad \text{und} \quad \lim_{\varepsilon \downarrow 0} \|\varphi_\varepsilon * u - u\|_{L^p(\Omega)} = 0.$$

Aufgabe 20 Zeige, dass $C^1[0, 1] \cap C_0[0, 1] \subset W^{1,p}_0(0, 1)$ für alle $p \in [1, \infty)$.

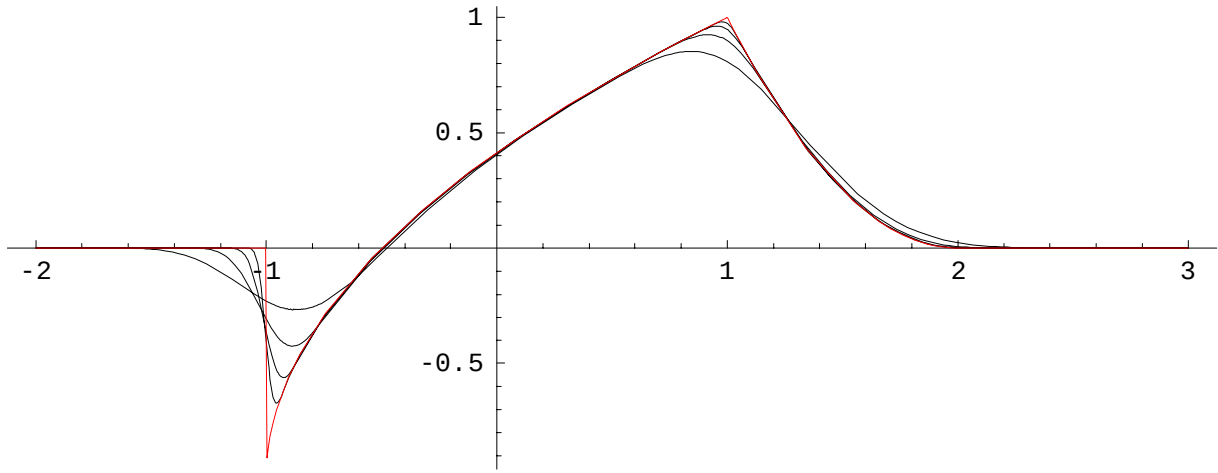


Abbildung 6.4: Glättungsfunktionen losgelassen auf eine Funktion mit sowohl Sprünge in u , u' als auch u'' .

Beweis. Wir setzen $u_\varepsilon := \varphi_\varepsilon * u$.

1. Für die Ableitung in e_i -Richtung betrachten wir

$$\frac{u_\varepsilon(x + \tau e_i) - u_\varepsilon(x)}{\tau} = \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\varphi_\varepsilon(x - y + \tau e_i) - \varphi_\varepsilon(x - y)}{\tau} u(y) dy$$

und der Limes für $\tau \rightarrow 0$ existiert, weil $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\varphi_\varepsilon(x - y + \tau e_i) - \varphi_\varepsilon(x - y)}{\tau}$ gleichmäßig konvergiert.

2. Definiere für $s > 0$

$$v_s(x) = \begin{cases} u(x) & \text{für } x \in \Omega_s, \\ 0 & \text{für } x \notin \Omega_s. \end{cases}$$

Für $s > 0$ folgt $v_s \in L^1_{loc}(\mathbb{R}^n)$ und mit 1., dass $\varphi_\varepsilon * v_s \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$. wenn $\varepsilon < \delta$ findet man

$$\varphi_\varepsilon * v_{\delta-\varepsilon}(x) = \varphi_\varepsilon * u(x) \text{ auf } \Omega_\delta.$$

3. Setze $\rho = d(\partial\Omega, \text{support}(u))$ und man findet, dass $u_\varepsilon \in C^\infty(\Omega_{\rho-\varepsilon})$ für $\varepsilon < \rho$. Außerdem hat man $\text{support } u_\varepsilon \subset \text{support } u + B_\varepsilon(0) \subset \Omega$.
4. Für diese Eigenschaft des Lebesgue-Integrals siehe [3].
5. Für $p = 1$ gilt mit Hilfe von dem Satz von Fubini-Tonelli

$$\begin{aligned} \|\varphi_\varepsilon * u\|_{L^1(\Omega)} &= \int_{\Omega} \left| \int_{\Omega} \varphi_\varepsilon(x - y) u(y) dy \right| dx \leq \\ &\leq \int_{\Omega} \int_{\Omega} \varphi_\varepsilon(x - y) |u(y)| dy dx = \int_{\Omega} \int_{\Omega} \varphi_\varepsilon(x - y) dx |u(y)| dy = \\ &= \int_{\Omega} |u(y)| dy = \|u\|_{L^1(\Omega)}. \end{aligned}$$

Für $p \in (1, \infty)$ gilt mit Hilfe von der Hölder-Ungleichung mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$

$$\begin{aligned} \|\varphi_\varepsilon * u\|_{L^p(\Omega)}^p &= \int_\Omega \left| \int_\Omega \varphi_\varepsilon(x-y) u(y) dy \right|^p dx \leq \\ &\leq \int_\Omega \left(\int_\Omega \varphi_\varepsilon(x-y)^{\frac{1}{q} + \frac{1}{p}} |u(y)| dy \right)^p dx \leq \\ &\leq \int_\Omega \left(\int_\Omega \varphi_\varepsilon(x-y) dy \right)^{p/q} \left(\int_\Omega \varphi_\varepsilon(x-y) |u(y)|^p dy \right) dx \leq \\ &\leq \int_\Omega \left(\int_\Omega \varphi_\varepsilon(x-y) |u(y)|^p dy \right) dx = \\ &= \|\varphi_\varepsilon * |u|^p\|_{L^1(\Omega)} \leq \| |u|^p \|_{L^1(\Omega)} = \|u\|_{L^p(\Omega)}^p. \end{aligned}$$

■

Variationsrechnung

Kapitel 7

Lineare Probleme und schwache Lösungen



7.1 Quadratische Funktionale

Der einfachste Typ von Funktionalen, die ein Minimum haben können, sind die quadratischen Funktionale. Sei Ω ein Gebiet in $\mathbb{R}^n$. Ein einfaches Beispiel mit $c \in C(\bar{\Omega})$ und $f \in L^2(\Omega)$ ist

$$J(u) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} (|\nabla u(x)|^2 + c(x) u(x)^2 - f(x) u(x)) dx.$$

Wenn man ein Minimum von J in $W_0^{1,2}(\Omega)$ sucht, dann bekommt man die (schwache Form der) Euler-Lagrange-Gleichung

$$0 = \partial J(u; v) = \int_{\Omega} (\nabla u(x) \cdot \nabla v(x) + c(x) u(x) v(x) - f(x) v(x)) dx \quad (7.1)$$

für alle $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$. Wenn u so ist, dass eine partielle Integration erlaubt ist, findet man, dass die zugehörige Differentialgleichung linear ist:

$$-\Delta u(x) + c(x) u(x) = f(x) \text{ in } \Omega.$$

In diesem Kapitel werden wir sehen, wie man für lineare Probleme wie (7.1) eine Lösung finden kann in einem schwachen Sinn.

7.2 Hilbert-Räume

Die Sobolev-Räume $W^{k,2}(\Omega)$ und $W_0^{k,2}(\Omega)$ sind auch Hilbert-Räume mit dem Skalarprodukt

$$\langle\langle u, v \rangle\rangle_{W^{k,2}(\Omega)} = \int_{\Omega} \sum_{|\alpha| \leq k} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)^{\alpha} u(x) \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)^{\alpha} v(x) dx.$$

Auf relativ einfache Art kann man im Hilbert-Raum oft die Existenz einer Lösung für eine lineare Differentialgleichung bekommen mit funktionalanalytischen Methoden. Das wichtigste Ergebnis ist der folgende Satz.

Theorem 7.2.1 (Darstellungssatz von F. Riesz für Hilbert-Räume) Sei H ein Hilbert-Raum mit Skalarprodukt $\langle \cdot, \cdot \rangle$ und sei $F \in H'$. Dann gibt es genau ein $u \in H$ derart, dass

$$F(v) = \langle u, v \rangle \text{ für alle } v \in H.$$

Für einen Beweis verweisen wir auf [3].

Beispiel 7.2.2 Sei $f \in L^2(\Omega)$ gegeben und nehme an, man sucht $u \in W^{1,2}(\Omega)$ derart, dass

$$\int_{\Omega} (\nabla u \cdot \nabla v + u v) dx = \int_{\Omega} f v dx \text{ für alle } v \in W^{1,2}(\Omega). \quad (7.2)$$

Wir bemerken, dass das Skalarprodukt auf $W^{1,2}(\Omega)$ definiert ist durch

$$\langle \langle u, v \rangle \rangle_{W^{1,2}(\Omega)} = \int_{\Omega} (\nabla u \cdot \nabla v + u v) dx.$$

Weil

$$\left| \int_{\Omega} f v dx \right| \leq \|f\|_{L^2(\Omega)} \|v\|_{L^2(\Omega)} \leq \|f\|_{L^2(\Omega)} \|v\|_{W^{1,2}(\Omega)},$$

ist die lineare Abbildung $v \mapsto \int_{\Omega} f v dx$ beschränkt und deshalb stetig, das heißt

$$\left(v \mapsto \int_{\Omega} f v dx \right) \in (W^{1,2}(\Omega))'.$$

Dann folgt aus dem Satz von Riesz, dass es genau ein $u \in W^{1,2}(\Omega)$ gibt mit $\langle \langle u, v \rangle \rangle_{W^{1,2}(\Omega)} = \int_{\Omega} f v dx$. Dieses u erfüllt die Euler-Lagrange Gleichung.

Wenn man partiell integrieren könnte, würde aus (7.2) folgen, dass

$$\int_{\Omega} (-\Delta u + u - f) v dx + \int_{\partial\Omega} \frac{\partial u}{\partial n} v d\sigma = 0 \text{ für alle } v \in W^{1,2}(\Omega) \quad (7.3)$$

und der Hauptsatz der Variationsrechnung liefert in zwei Schritten, erst auf Ω und dann auf $\partial\Omega$, dass

$$\begin{cases} -\Delta u + u = f & \text{in } \Omega, \\ \frac{\partial u}{\partial n} = 0 & \text{auf } \partial\Omega. \end{cases} \quad (7.4)$$

Für diese partielle Integration benötigt es jedoch mehr Regularität der Funktion u als wir bis jetzt haben. Deshalb betrachtet man einen schwächeren Typ von Lösungen.

7.3 Schwache Lösungen

Sei $a_{ij} \in C^1(\bar{\Omega})$, $c \in C(\bar{\Omega})$ und $f \in L^2(\Omega)$. Betrachte das Randwertproblem

$$\begin{cases} -\sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j}(x) \right) + c(x) u(x) = f(x) & \text{in } \Omega, \\ u(x) = 0 & \text{auf } \partial\Omega. \end{cases} \quad (7.5)$$

Definition 7.3.1 Eine Funktion $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ nennt man eine schwache Lösung von (7.5), wenn

$$\int_{\Omega} \left(\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} \frac{\partial v(x)}{\partial x_i} + c(x) u(x) v(x) \right) dx = \int_{\Omega} f(x) v(x) dx \quad (7.6)$$

für alle $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$.

Bemerkung 7.3.2 In (7.6) findet man die Euler-Lagrange Gleichung zum Minimierungsproblem für das Funktional $J : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} \frac{\partial u(x)}{\partial x_i} + \frac{1}{2} c(x) u(x)^2 - f(x) u(x) \right) dx.$$

Bemerkung 7.3.3 In (7.6) kann man sogar $a_{ij} \in C(\bar{\Omega})$ statt $C^1(\bar{\Omega})$ zulassen. Die Formulierung in (7.5) wird fragwürdig für solche a_{ij} .

Die Definition einer schwachen Lösung hängt sehr direkt ab von der Gleichung. Im nächsten Abschnitt zeigen wir noch einige Beispiele. Es ist relativ technisch und nur mäßig interessant.

7.3.1 Mehr schwache Lösungen

Auf ähnliche Art kann man auch das Randwertproblem

$$\begin{cases} - \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_{ij}(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} \right) + c(x) u(x) = f(x) & \text{in } \Omega, \\ \sum_{i,j=1}^n \nu_i a_{ij}(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} = 0 & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases} \quad (7.7)$$

betrachten.

Definition 7.3.4 Eine Funktion $u \in W^{1,2}(\Omega)$ nennt man eine schwache Lösung von (7.7), wenn

$$\int_{\Omega} \left(\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} \frac{\partial v(x)}{\partial x_i} + c(x) u(x) v(x) \right) dx = \int_{\Omega} f(x) v(x) dx \quad (7.8)$$

für alle $v \in W^{1,2}(\Omega)$.

Aufgabe 21 Zeigen Sie, dass eine Funktion $u \in C^2(\bar{\Omega})$, die eine schwache Lösung von (7.7) ist, auch eine klassische Lösung von (7.7) ist.

Aufgabe 22 Wie würde man eine schwache Lösung definieren zum

1. Randwertproblem

$$\begin{cases} - \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_{ij}(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} \right) + \sum_{j=1}^n b_j(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} + c(x) u(x) = f(x) & \text{in } \Omega, \\ u(x) = 0 & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases}$$

mit $a_{ij}, b_j \in C^1(\bar{\Omega})$, $c \in C(\bar{\Omega})$ und $f \in L^2(\Omega)$;

2. Randwertproblem

$$\begin{cases} - \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} + c(x) u(x) = f(x) & \text{in } \Omega, \\ u(x) = 0 & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases}$$

mit $a_{ij} \in C^1(\bar{\Omega})$, $c \in C(\bar{\Omega})$ und $f \in L^2(\Omega)$?

Das Energiefunktional für die Auslenkung einer dünnen Platte mit Projektion $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ in (3.8), nämlich

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} (\Delta u)^2 + (1 - \sigma) (u_{xy}^2 - u_{xx}u_{yy}) + f u \right) dx dy \quad (7.9)$$

führt, wenn diese Platte eingespannt ist, zum Randwertproblem

$$\begin{cases} \Delta^2 u(x) + f(x) = 0 & \text{in } \Omega, \\ u(x) = |\nabla u(x)| = 0 & \text{auf } \partial\Omega. \end{cases} \quad (7.10)$$

Wenn man vom Randwertproblem (7.10) ausgeht, bekommt man:

Definition 7.3.5 Die Funktion $u \in W_0^{2,2}(\Omega)$ heißt eine schwache Lösung zu (7.10), wenn

$$\int_{\Omega} (\Delta u \Delta v + f v) dx dy = 0 \text{ für alle } v \in W_0^{2,2}(\Omega). \quad (7.11)$$

Die Euler-Lagrange Gleichung zu (7.9) ist jedoch

$$\int_{\Omega} (\Delta u \Delta v + (1 - \sigma) (2u_{xy}v_{xy} - u_{xx}v_{yy} - u_{yy}v_{xx}) + f v) dx dy \quad (7.12)$$

für alle $v \in W_0^{2,2}(\Omega)$. Obwohl (7.11) und (7.12) nicht gleich sind, kann man zeigen, dass bei diesen Randbedingungen, beide Integralgleichungen äquivalent sind. Es gilt nämlich für $\varphi \in C_c^\infty(\Omega)$, dass

$$\int_{\Omega} u_{xy} \varphi_{xy} dx dy = \int_{\Omega} u \varphi_{xxyy} dx dy = \int_{\Omega} u_{xx} \varphi_{yy} dx dy = \int_{\Omega} u_{yy} \varphi_{xx} dx dy$$

und weil $W_0^{2,2}(\Omega) = \overline{C_c^\infty(\Omega)}^{\|\cdot\|_{W^{2,2}(\Omega)}}$ gilt, folgt für $v \in W_0^{2,2}(\Omega)$, dass

$$\int_{\Omega} (2u_{xy}v_{xy} - u_{xx}v_{yy} - u_{yy}v_{xx}) dx dy = 0.$$

Dies trifft nicht zu für andere Randwertbedingungen. Es zwingt uns auch, einmal genau zu betrachten, wie $u \in W_0^{2,2}(\Omega)$ und das punktweise „ $u(x) = |\nabla u(x)| = 0$ auf $\partial\Omega$ “ zusammenhängen.

Bemerkung 7.3.6 Wenn man einen stationären Punkt des Funktionals J sucht, ist die Euler-Lagrange Gleichung die richtige Formulierung für eine schwache Lösung. Wenn man argumentieren kann, dass schwache Lösungen auch klassische Lösungen sind, dann findet man durch eine partielle Integration das Randwertproblem. Oft möchte man dem umgekehrten Weg folgen: Ein Randwertproblem mit einer linearen partiellen Differentialgleichung möchte man schwach lösen mit Hilfe des Satzes von Riesz. Die schwache Formulierung einer Lösung ist jedoch nicht immer eindeutig (wenn überhaupt) bestimmt durch ein Randwertproblem wie (7.10). Und schon gar nicht kann man jede partielle Differentialgleichung als Euler-Lagrange Gleichung bekommen. Für lineare Differentialgleichungen (und quadratische Funktionale) führt dies zu der folgenden Darstellung der Zusammenhänge der drei Problemformulierungen:

$$\left. \begin{array}{l} \boxed{\text{stat } J(u)} \\ \boxed{u \in H(\Omega)} \end{array} \right\} \longrightarrow \left. \begin{array}{l} \partial J(u; v) = 0 \quad \forall v \in H(\Omega) \\ = \\ \text{schwache Lösung in } H(\Omega) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \longrightarrow \\ \longleftarrow - ? \end{array} \boxed{\begin{array}{l} Lu = f \text{ in } \Omega \\ Bu = 0 \text{ auf } \partial\Omega \end{array}}$$

7.4 Poincaré, Friedrichs und Wirtinger

Das Funktional

$$J(u) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} (|\nabla u(x)|^2 + c(x) u(x)^2 - f(x) u(x)) dx.$$

ist konvex, wenn $c(x) \geq c_0 > 0$, und hat dann also höchstens ein Minimum. Wir werden sehen, dass man diese Bedingung abschwächen kann, wenn man zum Beispiel Funktionen in $W_0^{1,2}(\Omega)$ betrachtet. Auf Seite 40 hatten wir dies schon angekündigt. Die Grundidee ist:

Wenn man eine Schranke für u' hat, und man u an einer Stelle kennt, dann hat man eine Schranke für u .

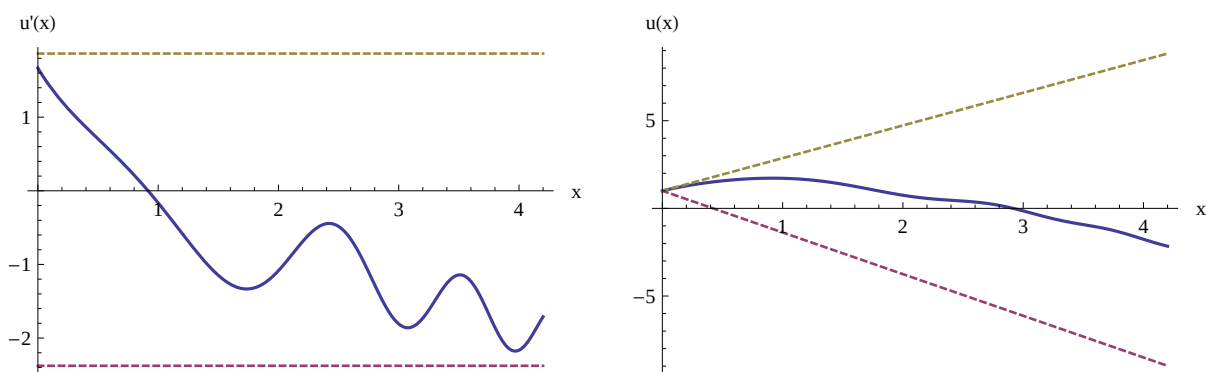


Abbildung 7.1: Schranken für u' und $u(0)$ geben Schranken für u .

In umgekehrter Richtung kann man nichts machen:

Wenn man eine Schranke für u hat, hat man noch keine Schranke für u' .

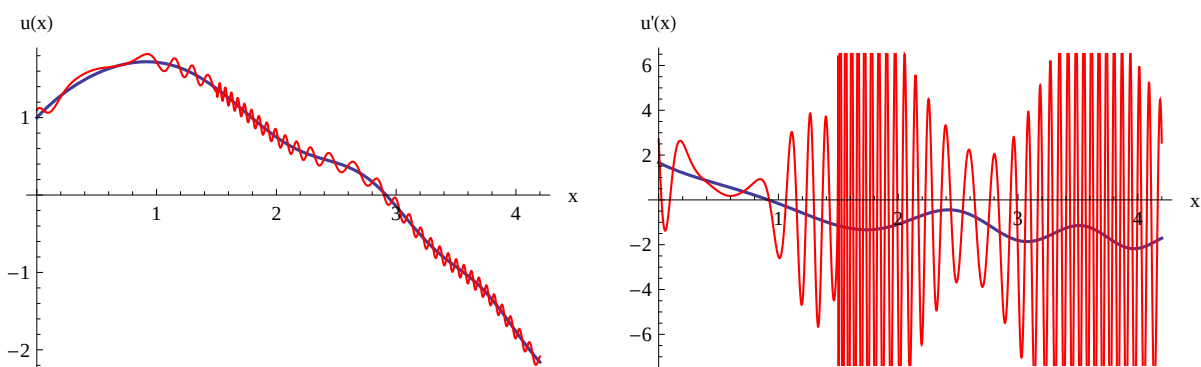


Abbildung 7.2: Schranken für u geben keine Schranken für u' .

Für differenzierbare Funktionen in einer Dimension, sagen wir $u \in C^1[a, b]$, findet man sofort, dass wenn

$$m \leq u'(x) \leq M \text{ für alle } x \in [a, b]$$

gilt, dann folgt, dass

$$u(x) + m(x - a) \leq u(x) \leq u(a) + M(x - a) \text{ für alle } x \in [a, b].$$

Verwendet man die Norm $\|\cdot\|_{L^\infty(a,b)}$, so findet man für $u \in C^1[a, b]$, dass

$$\|u\|_{L^\infty(a,b)} \leq |u(a)| + (b-a) \|u'\|_{L^\infty(a,b)}.$$

Für $u \in C^1[a, b] \cap C_0[a, b]$ findet man sogar, dass

$$\|u\|_{L^\infty(a,b)} \leq \frac{1}{2} (b-a) \|u'\|_{L^\infty(a,b)}.$$

Derartige Ungleichungen gibt es auch für andere Normen.

Lemma 7.4.1 (Poincaré-Friedrichs-Ungleichung für $n = 1$ und $p = 2$)

1. Für $u \in W_0^{1,2}(a, b)$ gilt

$$\int_a^b u(x)^2 dx \leq \left(\frac{b-a}{\pi}\right)^2 \int_a^b u'(x)^2 dx. \quad (7.13)$$

2. Für $u \in W^{1,2}(a, b)$ gilt

$$\int_a^b (u(x) - \bar{u})^2 dx \leq 4 \left(\frac{b-a}{\pi}\right)^2 \int_a^b u'(x)^2 dx, \quad (7.14)$$

$$\text{mit } \bar{u} = \frac{1}{b-a} \int_a^b u(x) dx.$$

Bemerkung 7.4.2 Übrigens ist $\left(\frac{b-a}{\pi}\right)^2$ die kleinst mögliche Konstante für (7.13). Die Funktion u , definiert durch $u(x) = \sin\left(\frac{x-a}{b-a}\pi\right)$, ist in $W_0^{1,2}(a, b)$ und liefert eine Gleichheit in (7.13).

Bemerkung 7.4.3 Ungleichungen des ersten Typs werden oft nach Friedrichs benannt. Die des zweiten Typs nach Poincaré. Da sie jedoch sehr verwandt sind, ist es üblich diese Art Ungleichungen mit dem Namen der beiden zu benennen: die Poincaré-Friedrichs Ungleichungen.

Beweis. Die erste Behauptung zeigt man wie folgt. Durch Skalierung reicht es, wenn man zeigt, dass für $u \in W_0^{1,2}(0, 1)$ gilt

$$\int_0^1 u(x)^2 dx \leq \frac{1}{\pi^2} \int_0^1 u'(x)^2 dx. \quad (7.15)$$

Weil $W_0^{1,2}(0, 1)$ als Vervollständigung von $u \in C_c^\infty[0, 1]$ definiert ist, reicht es wenn wir (7.15) für solche Funktionen zeigen. Für eine solche Funktion u hat man, dass $x \mapsto \frac{u(x)}{\sin(\pi x)}$ und ihre erste Ableitung stetig auf $[0, 1]$ sind. Dann findet man

$$\begin{aligned} 0 &\leq \int_0^1 \sin(\pi x)^2 \left(\left(\frac{u(x)}{\sin(\pi x)} \right)' \right)^2 dx = \\ &= \int_0^1 (\sin(\pi x))^2 \left(\frac{u'(x)}{\sin(\pi x)} - \pi \frac{u(x) \cos(\pi x)}{\sin(\pi x)^2} \right)^2 dx = \\ &= \int_0^1 \left(u'(x)^2 - 2\pi \frac{\cos(\pi x)}{\sin(\pi x)} u(x) u'(x) + \left(\pi \frac{\cos(\pi x)}{\sin(\pi x)} \right)^2 u(x)^2 \right) dx = \\ &= \int_0^1 \left(u'(x)^2 - 2\pi \frac{\cos(\pi x)}{\sin(\pi x)} u(x) u'(x) + \frac{\pi^2}{\sin(\pi x)^2} u(x)^2 - \pi^2 u(x)^2 \right) dx = \\ &= - \left[\pi \frac{\cos(\pi x)}{\sin(\pi x)} u(x)^2 \right]_0^1 + \int_0^1 (u'(x)^2 - \pi^2 u(x)^2) dx = \\ &= \int_0^1 u'(x)^2 dx - \pi^2 \int_0^1 u(x)^2 dx. \end{aligned}$$

Für die zweite Behauptung reicht es auch, wenn wir die Ungleichung für $u \in W^{1,2}(0,1)$ zeigen. Zusätzlich dürfen wir annehmen, dass $\bar{u} = 0$. Weil $u \in C[0,1]$ gilt und wir $\bar{u} = 0$ angenommen haben, gibt es $c \in (0,1)$ mit $u(c) = 0$. Wir definieren anschließend die Funktion $v : [-c, 2-c] \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$v(x) = \begin{cases} u(-x) & \text{für } x \in [-c, 0), \\ u(x) & \text{für } x \in [0, 1], \\ u(2-x) & \text{für } x \in (1, 2-c]. \end{cases} \quad (7.16)$$

Es gilt $v \in W_0^{1,2}(-c, 2-c)$,

$$\int_{-c}^{2-c} v(x)^2 dx = 2 \int_0^1 u(x)^2 dx \text{ und } \int_{-c}^{2-c} v'(x)^2 dx = 2 \int_0^1 u'(x)^2 dx.$$

Das Ergebnis folgt, wenn man den ersten Teil anwendet auf v . ■

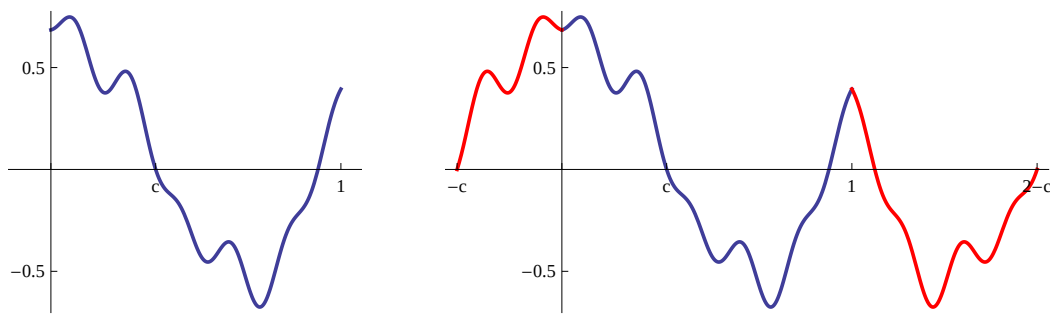


Abbildung 7.3: Darstellung der Erweiterung aus (7.16)

Lemma 7.4.4 (Wirtinger) Für $u \in W^{1,2}(a,b)$ mit $u(a) = u(b)$ und $\int_a^b u(x) dx = 0$ gibt es $C > 0$ so, dass

$$\int_a^b u(x)^2 dx \leq C \int_a^b u'(x)^2 dx.$$

Beweis. Dies ist ein Spezialfall von (7.13). ■

Aufgabe 23 Nehmen wir an, es gibt ein $u \in C^2[a,b]$, das die Bedingungen von Lemma 7.4.4 erfüllt und das den minimalen Wert C liefert. Welchen Wert hat C ?

Ähnliche Ungleichungen findet man auch für den mehrdimensionalen Fall und sogar auch für andere Potenzen als 2.

Theorem 7.4.5 (Poincaré-Friedrichs) Nehme an, dass Ω ein beschränktes Gebiet ist und $p \in [1, \infty)$. Dann gibt es $c_{p,\Omega}$ derartig, dass für $u \in W_0^{1,p}(\Omega)$ gilt

$$\int_{\Omega} |u(x)|^p dx \leq c_{p,\Omega} \int_{\Omega} |\nabla u|^p dx.$$

Beweis. Sei $a > 0$. In einer Dimension hat man für $u \in C^1[0,a]$ mit $u(0) = 0$ folgendes. Erstens nehmen wir $p \in (1, \infty)$ und finden, dass für $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$

$$|u(x)| = \left| \int_0^x u'(s) ds \right| \leq \left(\int_0^x |u'(s)|^p ds \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_0^x 1 ds \right)^{\frac{1}{q}} \leq \|u'\|_{L^p(0,a)} |x|^{\frac{1}{q}} \quad (7.17)$$

und damit

$$\begin{aligned} \|u\|_{L^p(0,a)} &= \left(\int_0^a |u(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \leq \|u'\|_{L^p(0,a)} \left(\int_0^a |x|^{\frac{p}{q}} dx \right)^{\frac{1}{p}} \leq \\ &\leq \left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{p}} a \|u'\|_{L^p(0,a)} \leq a \|u'\|_{L^p(0,a)}. \end{aligned} \quad (7.18)$$

Für $p = 1$ können wir (7.17) ersetzen durch

$$|u(x)| = \left| \int_0^x u'(s) ds \right| \leq \|u'\|_{L^1(0,a)}$$

und (7.18) folgt ebenso. Weil $C^1[0, a]$ dicht in $W^{1,p}(0, a)$ liegt, findet man

$$\|u\|_{L^p(0,a)} \leq a \|u'\|_{L^p(0,a)} \text{ für alle } u \in W^{1,p}(0, a) \cap C[0, a] \text{ mit } u(0) = 0$$

Bemerke, dass wegen $W^{1,p}(0, a) \subset C[a, b]$ (jedes $u \in W^{1,p}(0, a)$ hat einen stetigen Vertreter) auch $u(0) = 0$ einen Sinn macht für $u \in W^{1,p}(0, a)$.

Anschließend nehmen wir an, dass gilt $\Omega \subset \{x \in \mathbb{R}^n; 0 < x_1 < a\}$. Für $u \in C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$ und jedes $x' \in \mathbb{R}^{n-1}$ ist

$$x_1 \mapsto \bar{u}(x_1, \tilde{x}) := \begin{cases} u(x_1, \tilde{x}) & \text{für } x \in \Omega \\ 0 & \text{für } x \notin \Omega \end{cases}$$

eine $W^{1,\infty}(0, a)$ -Funktion und

$$\|\bar{u}(\cdot, \tilde{x})\|_{L^p(0,a)} \leq a \left\| \frac{\partial}{\partial x_1} \bar{u}(\cdot, \tilde{x}) \right\|_{L^p(0,a)}.$$

Mit dem Satz von Fubini-Tonelli finden wir

$$\begin{aligned} \|u\|_{L^p(\Omega)} &= \|\bar{u}\|_{L^p(\mathbb{R}^n)} = \left(\int_{\mathbb{R}^{n-1}} \|\bar{u}(\cdot, \tilde{x})\|_{L^p(0,a)}^p d\tilde{x} \right)^{\frac{1}{p}} \leq \\ &\leq a \left(\int_{\mathbb{R}^{n-1}} \left\| \frac{\partial}{\partial x_1} \bar{u}(\cdot, \tilde{x}) \right\|_{L^p(0,a)}^p d\tilde{x} \right)^{\frac{1}{p}} = \\ &= a \left\| \frac{\partial}{\partial x_1} \bar{u} \right\|_{L^p(\Omega)} = a \left\| \frac{\partial}{\partial x_1} u \right\|_{L^p(\Omega)} \leq a \|\nabla u\|_{L^p(\Omega)}. \end{aligned}$$

Man schließt ab mit der Bemerkung, dass $C^1(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$ liegt dicht in $W_0^{1,p}(\Omega)$. ■

7.5 Folgen von Poincaré-Friedrichs-Wirtinger

Theorem 7.5.1 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt, $a_{ij}, c \in C(\bar{\Omega})$, $f \in L^2(\Omega)$ und

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_i} \frac{\partial u(x)}{\partial x_j} + c(x) u(x)^2 - f(x) u(x) \right) dx. \quad (7.19)$$

Betrachte

$$\min_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} J(u).$$

Sei C_P so, dass $\|u\|_{L^2(\Omega)} \leq C_P \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}$ für alle $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ und nehme an:

1. $\{a_{ij}\}$ erfüllt die Legendre-Hadamard-Bedingung: es gibt $C_{LH} > 0$ so, dass für jede $x \in \Omega$ und $\xi \in \mathbb{R}^n$

$$a_{ij}(x)\xi_i\xi_j \geq C_{LH} |\xi|^2;$$

2. es gibt $\varepsilon > 0$ so, dass $c(x) \geq \varepsilon - C_{LH}C_P^{-1}$ für einen $\varepsilon > 0$.

Dann hat J genau ein Minimum $\tilde{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)$.

Bemerkung 7.5.2 Wir brauchen also nicht unbedingt $c(x) \geq 0$.

Bemerkung 7.5.3 Wenn $a_{ij} \in C^1(\bar{\Omega})$ ist die Legendre-Hadamard-Bedingung genau die Bedingung die besagt, dass die zugehörige partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung elliptisch ist.

Korollar 7.5.4 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt und sei $f \in L^2(\Omega)$. Das Funktional $J : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u(x)|^2 - f(x)u(x) \right) dx$$

hat genau ein Minimum in $W_0^{1,2}(\Omega)$.

Beweis von Theorem 7.5.1. Wir zeigen getrennt, dass es höchstens und dass es mindestens einen stationären Punkt von J gibt und dass dieser stationärer Punkt ein Minimum ist.

Behauptung 7.5.5 Das Funktional J hat höchstens einen stationären Punkt $\tilde{u}$ ($\partial J(\tilde{u}; v) = 0$ für alle $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$) und wenn dieser Punkt existiert, ist er ein Minimum.

Weil

$$\begin{aligned} \partial^2 J(u; \varphi) &= \int_{\Omega} \left(\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x_i} \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x_j} + c(x) \varphi(x)^2 \right) dx \\ &\geq \int_{\Omega} (C_{LH} |\nabla \varphi(x)|^2 + (\varepsilon - C_{LH}C_P^{-1}) \varphi(x)^2) dx \\ &= \int_{\Omega} ((\tfrac{1}{2}\varepsilon C_P + C_{LH} - \tfrac{1}{2}\varepsilon C_P) |\nabla \varphi(x)|^2 + (\tfrac{1}{2}\varepsilon + \tfrac{1}{2}\varepsilon - C_{LH}C_P^{-1}) \varphi(x)^2) dx \\ &\geq \int_{\Omega} \tfrac{1}{2}\varepsilon (C_P |\nabla \varphi(x)|^2 + \varphi(x)^2) dx \geq C_{\varepsilon} \|\varphi\|_{W^{1,2}(\Omega)}^2 \end{aligned} \quad (7.20)$$

gilt, ist $J(u)$ strikt konvex. Wenn $\tilde{u}$ ein stationärer Punkt ist, dann gilt sogar, dass $\tilde{u}$ ein Minimum ist, weil

$$J(u) \geq J(\tilde{u}) + C_{\varepsilon} \|u - \tilde{u}\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}^2.$$

Für quadratische Funktionale gilt nämlich

$$J(u) = J(v) + \partial J(u; u - v) + \tfrac{1}{2} \partial^2 J(u; u - v).$$

Behauptung 7.5.6 Es gibt mindestens einen stationären Punkt für J .

Wir definieren für $u, v \in W_0^{1,2}(\Omega)$ die bilineare Abbildung¹

$$\langle\langle u, v \rangle\rangle_* := \int_{\Omega} \left(\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_i} \frac{\partial v(x)}{\partial x_j} + c(x) u(x) v(x) \right) dx.$$

Diese bilineare Abbildung ist ein Skalarprodukt. Die einzige Eigenschaft, die uns Sorgen machen könnte, ist die Positiv-Definitheit. Diese Eigenschaft zeigt man jedoch wie folgt. Aus (7.20) folgt, dass $\|\cdot\|_*$, definiert durch $\|u\|_* = \langle\langle u, u \rangle\rangle_*^{1/2}$, tatsächlich positiv-definit ist, denn

$$\|u\|_* \geq \sqrt{C_\varepsilon} \|u\|_{W^{1,2}(\Omega)}.$$

Beide Normen sind sogar äquivalent, weil auch gilt, dass

$$\|u\|_* \leq \sqrt{n} \max_{1 \leq i,j \leq n} \|a_{ij}\|_{L^\infty(\Omega)}^{1/2} \|u\|_{W^{1,2}(\Omega)}.$$

Wegen des Satzes von Riesz gibt es also genau ein $\tilde{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)$ so, dass

$$\langle\langle \tilde{u}, v \rangle\rangle_* = \int_{\Omega} f(x) v(x) dx \text{ für alle } v \in W_0^{1,2}(\Omega).$$

Dieses $\tilde{u}$ ist ein stationärer Punkt für J . ■

7.6 Lax-Milgram

Was macht man, wenn man

$$\begin{cases} -\Delta u(x) + b_1(x) \frac{\partial}{\partial x_1} u(x) + c(x) u(x) = f(x) & \text{in } \Omega, \\ u(x) = 0 & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases} \quad (7.21)$$

lösen möchte? Dieses Problem lässt sich nicht so leicht mit dem Satz von Riesz schwach lösen, denn man kann leider nicht wie in Theorem 7.5.1 ein passendes Skalarprodukt definieren. Die Differentialgleichung ist auch nicht sofort erkennbar als Euler-Lagrange Gleichung.

Für solchen Fälle gibt es eine Erweiterung des Satzes von Riesz für die Existenz einer schwachen Lösung. Für eine Formulierung müssen wir erst einige Begriffe wiederholen/festlegen.

Definition 7.6.1 Sei H ein Hilbert-Raum und sei $B : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ eine bilineare Abbildung. Diese Abbildung heißt

1. beschränkt, wenn es $\beta \in \mathbb{R}^+$ gibt mit $|B(u, v)| \leq \beta \|u\|_H \|v\|_H$ für alle $u, v \in H$;
2. koerzitiv, wenn es $\alpha \in \mathbb{R}^+$ gibt mit $\alpha \|u\|_H^2 \leq B(u, u)$ für alle $u \in H$.

¹Eine Abbildung $B : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ heißt bilinear, wenn für alle $u, u_1, u_2, v, v_1, v_2 \in H$ und $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ folgendes gilt:

- a) die Linearität im ersten Argument: $B(c_1 u_1 + c_2 u_2, v) = c_1 B(u_1, v) + c_2 B(u_2, v)$ und
- b) die Linearität im zweiten Argument: $B(u, c_1 v_1 + c_2 v_2) = c_1 B(u, v_1) + c_2 B(u, v_2)$;

Theorem 7.6.2 (Lax-Milgram) Sei $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Hilbert-Raum und sei die bilineare Abbildung $B : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ beschränkt und koerzitiv. Dann gibt es für jedes $F \in H'$ genau ein $u \in H$ so, dass

$$B(u, v) = F(v) \text{ für alle } v \in H.$$

Beweis. Der Beweis braucht mehrere Schritte. Die Norm ist wie üblich definiert durch $\|u\| = \sqrt{\langle u, u \rangle}$.

1. Der erste Schritt funktioniert dem ersten Eindruck nach falsch herum. Nehmen wir an, dass $u \in H$ fixiert ist. Weil $(v \mapsto B(u, v)) \in H'$ gibt es genau ein $w \in H$ mit

$$\langle w, v \rangle = B(u, v) \text{ für alle } v \in H. \quad (7.22)$$

Wir definieren die lineare Abbildung $A : H \rightarrow H$ durch

$$A(u) = w.$$

Es gilt also

$$\langle A(u), v \rangle = B(u, v) \text{ für alle } v \in H.$$

Die Linearität von A folgt aus der Eindeutigkeit in (7.22): Wenn $A(u_1) = w_1$ und $A(u_2) = w_2$, dann folgt

$$\langle c_1 w_1 + c_2 w_2, v \rangle = B(c_1 u_1 + c_2 u_2, v) \text{ für alle } v \in H$$

und dies bedeutet, dass

$$A(c_1 u_1 + c_2 u_2) = c_1 w_1 + c_2 w_2.$$

Weil A linear ist, ist $A(H) = \{A(u) ; u \in H\}$ ein linearer Teilraum von H .

2. $A : H \rightarrow H$ ist beschränkt:

$$\|Au\|^2 = \langle Au, Au \rangle = B(u, Au) \leq \beta \|u\| \|Au\|$$

und man findet $\|Au\| \leq \beta \|u\|$.

3. $A : H \rightarrow H$ ist injektiv: Weil

$$\alpha \|u\|^2 \leq B(u, u) = \langle Au, u \rangle \leq \|u\| \|Au\|$$

folgt $\alpha \|u\| \leq \|Au\|$ und die Injektivität.

4. $A(H)$ ist abgeschlossen: Sei $\{w_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge in $A(H)$. Dann gibt es eine Folge $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ in H mit $A(u_n) = w_n$. Weil

$$\alpha \|u_n - u_m\| \leq \|w_n - w_m\|$$

gilt, ist $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge in H und es gibt einen Grenzwert $u_\infty \in H$. Weil A beschränkt ist, ist A stetig und es gilt

$$w_n = A(u_n) \rightarrow A(u_\infty) \in A(H) \text{ für } n \rightarrow \infty.$$

5. $A : H \rightarrow H$ ist surjektiv: Nehmen wir an, $A(H) \neq H$. Wir werden zeigen, dass es für $w \in H \setminus A(H)$ ein derartiges $\tilde{w} \in A(H)$ gibt, dass $w - \tilde{w} \in A(H)^\perp$ und dass

$$0 < d := \inf_{u \in A(H)} \|w - u\| = \|w - \tilde{w}\|.$$

Sei $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset A(H)$ mit

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|w - u_n\| = \inf_{u \in A(H)} \|w - u\| = d.$$

Dann gilt, weil auch $\frac{1}{2}(u_n + u_m) \in A(H)$, dass²

$$\begin{aligned} \|u_n - u_m\|^2 &= 2\|w - u_n\|^2 + 2\|w - u_m\|^2 - \|2w - (u_n + u_m)\|^2 \\ &= 2\|w - u_n\|^2 + 2\|w - u_m\|^2 - 4\left\|w - \frac{1}{2}(u_n + u_m)\right\|^2 \\ &\leq 2\|w - u_n\|^2 + 2\|w - u_m\|^2 - 4d^2 \rightarrow 0 \text{ für } n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Also ist $\{u_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge in H und deshalb konvergent in H . Der Grenzwert $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n$ ist unser $\tilde{w}$ und $\|w - \tilde{w}\| = d$. Weil $A(H)$ abgeschlossen ist, gilt $\tilde{w} \in A(H)$ und folgt $d > 0$. Für $u \in A(H)$ gilt

$$\|w - \tilde{w}\|^2 \leq \|w - \tilde{w} + tu\|^2 = \|w - \tilde{w}\|^2 + 2t\langle w - \tilde{w}, u \rangle + t^2\|u\|^2$$

und so sieht man, dass $\langle w - \tilde{w}, u \rangle = 0$. Die letzte Gleichheit bedeutet $w - \tilde{w} \in A(H)^\perp$.

Anschließend zeigen wir den Widerspruch. Setze $u_0 = d^{-1}(w - \tilde{w})$. Dann gilt $u_0 \in A(H)^\perp$, $\|u_0\|_H = 1$ und

$$\alpha \leq \alpha \|u_0\|^2 \leq B(u_0, u_0) = \langle A(u_0), u_0 \rangle = 0.$$

6. Nochmals den Satz von Riesz anwenden zeigt, dass es für $F \in H'$ ein $w \in H$ gibt mit

$$\langle w, v \rangle = F(v) \text{ für alle } v \in H.$$

Aus den vorherigen Schritten wissen wir, dass es für jedes $w \in H = A(H)$ ein $u \in H$ gibt mit $Au = w$. Es folgt, dass

$$B(u, v) = \langle Au, v \rangle = \langle w, v \rangle \text{ für alle } v \in H.$$

Also haben wir die Existenz eines $u \in H$ gefunden mit

$$B(u, v) = F(v) \text{ für alle } v \in H.$$

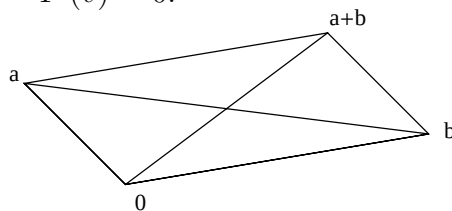
7. Die Eindeutigkeit: Wenn es zwei Lösungen gäbe, sagen wir u und $\tilde{u}$, dann findet man mit $v = u - \tilde{u}$, dass

$$\begin{aligned} \alpha \|u - \tilde{u}\|_H^2 &\leq B(u - \tilde{u}, u - \tilde{u}) = B(u - \tilde{u}, v) = \\ &= B(u, v) - B(\tilde{u}, v) = F(v) - F(v) = 0. \end{aligned}$$

²Für einen Hilbert-Raum $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ mit $\|u\| = \sqrt{\langle u, u \rangle}$ gilt:

$$\|a + b\|^2 + \|a - b\|^2 = 2\|a\|^2 + 2\|b\|^2$$

für alle $a, b \in H$.



Der Beweis ist komplett. ■

Wir können mit dem Satz von Lax-Milgram eine schwache Lösung für (7.21) bekommen, wenn $c(x) \geq c_0$ und man c_0 genügend groß nimmt. Eine schwache Formulierung des Randwertproblems ist

$$\int_{\Omega} \left(\nabla u(x) \cdot \nabla v(x) + b_1(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_1} v(x) + c(x) u(x) v(x) - f(x) v(x) \right) dx = 0$$

für alle $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$.

Setzt man

$$B(u, v) = \int_{\Omega} \left(\nabla u(x) \cdot \nabla v(x) + b_1(x) \frac{\partial u(x)}{\partial x_1} v(x) + c(x) u(x) v(x) \right) dx,$$

kann man wie folgt die zweite Bedingung von Lax-Milgram erfüllen:

$$\begin{aligned} B(u, u) &= \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2 - \|b_1\|_{L^\infty(\Omega)} \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)} \|u\|_{L^2(\Omega)} + c_0 \|u\|_{L^2(\Omega)}^2 \\ &\geq \frac{1}{2} \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2 + \left(c_0 - \frac{1}{2} \|b_1\|_{L^\infty(\Omega)}^2 \right) \|u\|_{L^2(\Omega)}^2, \end{aligned} \quad (7.23)$$

wenn wir annehmen, dass $c_0 > \frac{1}{2} \|b_1\|_{L^\infty(\Omega)}^2$. Wir haben in (7.23) die folgende Ungleichung verwendet:

$$axy \leq \frac{1}{2}x^2 + \frac{a^2}{2}y^2.$$

Man könnte sogar noch zusätzlich Poincaré-Friedrichs anwenden für eine schärfere Abschätzung.

Variationsrechnung

Kapitel 8



$W^{k,p}$ -Funktionen und Rand

8.1 Verhalten am Rand

Die $W^{k,p}(\Omega)$ -Räume hat man definiert als die Räume der schwach k -mal differenzierbaren Funktionen, bei denen diese Ableitungen in $L^p(\Omega)$ liegen. Die $W_0^{k,p}(\Omega)$ -Räume hat man definiert als die Räume, die genau all die Funktionen enthalten, die man bezüglich der $W^{k,p}(\Omega)$ -Norm mit $C_c^\infty(\Omega)$ -Funktionen approximieren kann. Weil $W^{k,p}(\Omega)$ ein Banachraum ist, gilt $W_0^{k,p}(\Omega) \subset W^{k,p}(\Omega)$. Inwiefern ist diese 0 eine Einschränkung? Was bedeutet diese 0 genau für die Randbedingungen? Wenn wir eine Funktion $u \in W_0^{1,p}(\Omega)$ nehmen, gilt für diese Funktion, dass $u(x) = 0$ für $x \in \partial\Omega$?

Beispiel 8.1.1 Betrachten wir die Funktion $f : \overline{B_1(0)} \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1-|x|^2}{1-x_1} & \text{für } x \in \overline{B_1(0)} \setminus \{(1, 0, \dots, 0)\}, \\ 2 & \text{für } x = (1, 0, \dots, 0). \end{cases} \quad (8.1)$$

Ein paar Eigenschaften dieser Funktion sind:

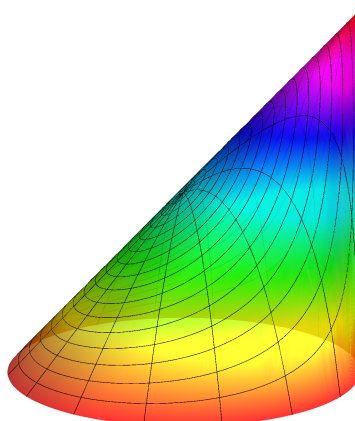


Abbildung 8.1: Die Darstellung der Funktion aus (8.1) für $n = 2$ könnte man auch beim Karneval verwenden.

$$1. \lim_{x_1 \uparrow 1} f(x_1, 0, \dots, 0) = \lim_{x_1 \uparrow 1} \frac{1-x_1^2}{1-x_1} = 2.$$

2. $f \in L^\infty(B_1(0))$ und $\|f\|_{L^\infty(B_1(0))} = 2$. Dies sieht man wegen des ersten Punktes und weil für $x_1 < 1$ gilt

$$0 \leq \frac{1 - |x|^2}{1 - x_1} \leq \frac{1 - x_1^2}{1 - x_1} = 1 + x_1 \leq 2.$$

3. $f = 0$ auf $\partial B_1(0)$ f.ü. Genauer gesagt: für $x \in \partial B_1(0) \setminus \{(1, 0, \dots, 0)\}$ gilt $f(x) = 0$.

4. $f \in C(\overline{B_1(0)} \setminus \{(1, 0)\})$ und $f \notin C(\overline{B_1(0)})$.

5. $f \in W^{1,p}(\Omega)$ für alle $p \in [1, \frac{n+1}{2})$. Die Rechnerei vereinfacht sich etwas, wenn man Polarkoordinaten nimmt mit Zentrum $(1, 0, \dots, 0)$, also

$$\begin{aligned} 1 - x_1 &= r \cos \varphi, \\ (x_2, \dots, x_n) &= r \omega \sin \varphi, \end{aligned}$$

mit $\omega \in \mathbb{S}^{n-2}$. Aus $x \in B_1(0)$ wird

$$(1 - r \cos \varphi)^2 + |r \omega \sin \varphi|^2 < 1$$

und es folgt nach Vereinfachung, dass

$$r < 2 \cos \varphi.$$

Dann finden wir für $\tilde{f}(r, \varphi, \omega) := f(1 - r \cos \varphi, r \omega \sin \varphi)$, dass

$$\begin{aligned} \tilde{f}(r, \varphi, \omega) &= \frac{1 - (1 - r \cos \varphi)^2 - |r \omega \sin \varphi|^2}{r \cos \varphi} = 2 - \frac{r}{\cos \varphi} \\ \frac{\partial}{\partial r} \tilde{f}(r, \varphi, \omega) &= \frac{-1}{\cos \varphi} \quad \text{und} \quad \frac{\partial}{\partial \varphi} \tilde{f}(r, \varphi, \omega) = \frac{-r \sin \varphi}{(\cos \varphi)^2}. \end{aligned}$$

Die Funktion ist nicht abhängig von ω und daher sind die restlichen Ableitungen gleich 0. Wir finden

$$|\nabla f| = \sqrt{\left(\frac{\partial \tilde{f}}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \varphi}\right)^2} = \frac{1}{(\cos \varphi)^2}.$$

Für $n - 2p > -1$ folgt

$$\begin{aligned} \int_{B_1(0)} |\nabla f|^p dx &= \sigma_{n-2} \int_{\varphi=-\frac{1}{2}\pi}^{\frac{1}{2}\pi} \int_{r=0}^{2 \cos \varphi} \left| \frac{1}{(\cos \varphi)^2} \right|^p r^{n-1} dr d\varphi = \\ &= n^{-1} 2^n \sigma_{n-2} \int_{\varphi=-\frac{1}{2}\pi}^{\frac{1}{2}\pi} (\cos \varphi)^{n-2p} d\varphi < \infty. \end{aligned}$$

Dies bedeutet, dass $f \in W^{1,p}(B_1(0))$ für $p \in [1, \frac{n+1}{2})$.

6. $f \in W_0^{1,p}(B_1(0))$. Um dies zu zeigen, müssen wir für jedes $\varepsilon > 0$ ein derartiges $f_\varepsilon \in C_c^\infty(B_1(0))$ finden, dass

$$\|f - f_\varepsilon\|_{W^{1,p}(B_1(0))} < \varepsilon.$$

Das ist leider sehr technisch. Eine Möglichkeit ist es, erst für die Funktion $f_{1,\delta}$, definiert durch

$$f_{1,\delta}(x) = \begin{cases} f((1-\delta)^{-1}x) & \text{für } |x| < 1-\delta, \\ 0 & \text{für } |x| \geq 1-\delta, \end{cases}$$

zu zeigen, dass $\|f_{1,\delta_1} - f\|_{W^{1,p}(B_1(0))} < \frac{1}{2}\varepsilon$ gilt für ein genügend kleines δ_1 . Man kann dies zeigen, weil $f = 0$ auf $\partial B_1(0)$ f.ü. Anschließend zeigt man für $\delta_2 < \delta_1$, dass $f_{2,\delta_2} = \varphi_{\delta_2} * f_{1,\delta_1} \in C_c^\infty(B_1(0))$, und dass $\|f_{1,\delta_1} - f_{2,\delta_2}\|_{W^{1,p}(B_1(0))} < \frac{1}{2}\varepsilon$, wenn man δ_1 klein genug nimmt.

8.1.1 Wie definiert man Regularität vom Rand?

Den Rand einer Menge Ω definiert man wie folgt:

$$\partial\Omega = \overline{\Omega} \setminus \Omega^\circ = \overline{\Omega} \cap \overline{\Omega}^c.$$

Wenn Ω ein Gebiet ist, dann ist es offen, und es gilt $\partial\Omega = \overline{\Omega} \setminus \Omega$. Für die meisten Randwertprobleme braucht man einen Rand, der nicht allzu kompliziert ist. Wir werden nur solche Gebiete betrachten, bei denen der Rand lokal immer eine reguläre Mannigfaltigkeit ist, und diese Mannigfaltigkeit soll Ω und $(\overline{\Omega})^c$ genau trennen.

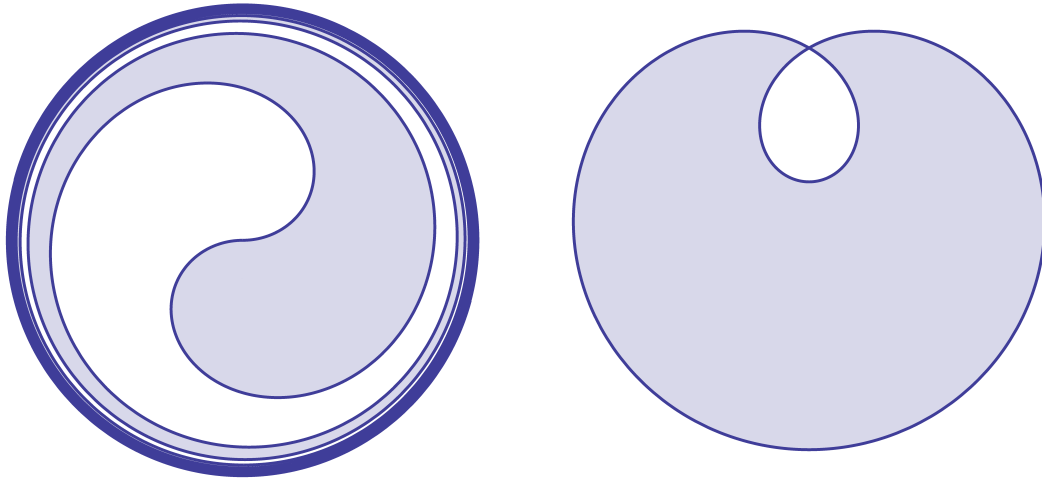


Abbildung 8.2: Gebiete mit solchen Rändern wollen wir vermeiden.

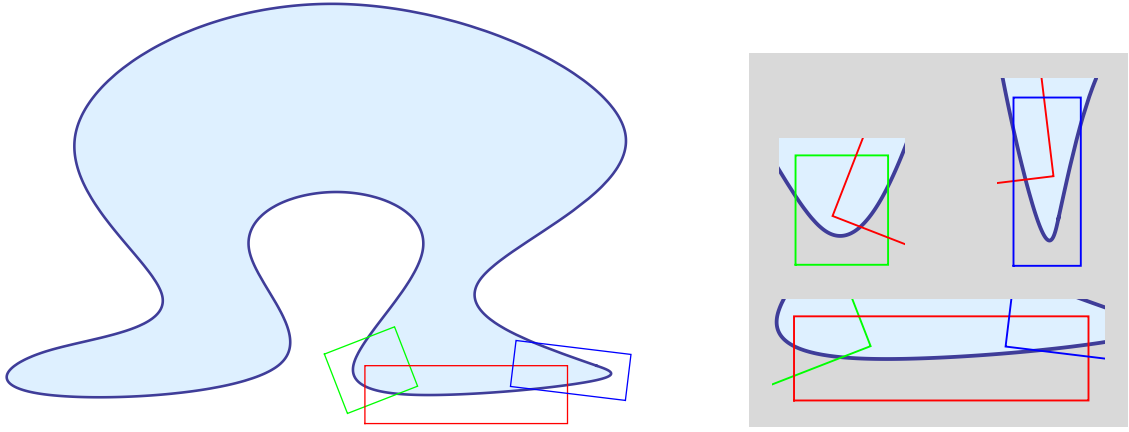
Wir betrachten Gebiete $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, für deren Rand folgendes gilt:

- Der Rand wird durch endlich viele offene Blöcke A_j , $j = 1, \dots, m$, überdeckt. Jeden Block A_j beschreiben wir in seinem eigenen lokalen kartesischen Koordinatensystem als

$$A_j = \underbrace{(a_1^j, b_1^j) \times \cdots \times (a_{n-1}^j, b_{n-1}^j)}_{\cong: A'_j} \times (a_n^j, b_n^j),$$

und die Koordinatensysteme kann man so wählen, dass es für jeden Block A_j eine Funktion $f_j \in C(\overline{A'_j}; (a_n^j, b_n^j))$ gibt, derart dass

$$\Omega \cap A_j = \{(y', y_n) \in A_j; y_n \geq f_j(y')\}.$$

Abbildung 8.3: Ein Ω mit drei der randüberdeckenden Blöcke.

Definition 8.1.2 Wir sagen $\partial\Omega \in C^{k,\gamma}$, wenn der Rand sich, wie soeben beschrieben, von endlich vielen Blöcken A_j überdecken lässt und wenn für die dazugehörigen Funktionen gilt: $f_j \in C^{k,\gamma}(\bar{A}'_j)$.

In jedem Block kann man eine Transformation T_j definieren wie folgt:

$$T_j(y_1, \dots, y_{n-1}, y_n) = (y_1, \dots, y_{n-1}, y_n - f_j(y_1, \dots, y_{n-1})).$$

Diese Transformation bügelt den Rand lokal glatt auf die Hyperebene $\{y_n = 0\}$ und hat die gleiche Regularität wie f_j . Es gilt außerdem, dass

$$\int_{\Omega \cap A_j} |u(y)| dy = \int_{A'_j} \int_0^{b_j - f_j(x')} |u(x', x_n + f_j(x'))| dx_n dx',$$

und

$$\int_{\partial\Omega \cap A_j} |u(y)| d\sigma_y = \int_{A'_j} |u(x', f_j(x'))| w(x') dx'$$

für $w(x') = \sqrt{\det \left(I + \left(\frac{\partial f(x')}{\partial x'_i} \frac{\partial f(x')}{\partial x'_j} \right) \right)}$.

Wenn man den Rand $\partial\Omega$ mit endlich vielen Blöcken, sagen wir $\{A_j\}_{j=1}^m$, überdeckt hat, kann man eine Funktion auf Ω oder $\bar{\Omega}$ betrachten, als die Summe von $m+1$ Funktionen, die ihre Träger genau auf den A_j und auf Ω haben. Dies schafft man mit Hilfe einer Zerlegung der Eins.

Definition 8.1.3 Sei Ω ein Gebiet in $\mathbb{R}^n$. Dann heißt $\{\zeta_j : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}; j = 1, \dots, \ell\}$ eine Zerlegung der Eins¹ auf Ω , wenn

1. $\zeta_j \in C^\infty(\bar{\Omega})$,
2. $0 \leq \zeta_j(x) \leq 1$ für alle $x \in \bar{\Omega}$,
3. $\sum_{j=1}^\ell \zeta_j(x) = 1$ für alle $x \in \bar{\Omega}$.

Lemma 8.1.4 Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ und sei $\{O_m\}_{m=1}^k$ eine offene Überdeckung von $\bar{\Omega}$. Dann gibt es eine Zerlegung der Eins $\{\zeta_m\}_{m=1}^k$ mit

$$\text{support}(\zeta_m) \subset O_m \text{ für alle } m \in \{1, \dots, k\}.$$

¹Zerlegung der Eins = *partition of unity*

Beweis. Für $k = 2$ fragt man einen Topologen. Für $k > 2$ beweist man dies mit vollständiger Induktion. ■

Weil sich die Blöcke überlappen, kann man die Zerlegung der Eins $\{\zeta_i\}$ so wählen, dass $\text{support}(\zeta_i) \subset A_i$ für $1 \leq i \leq m$ und $\text{support}(\zeta_{m+1}) \subset \Omega$. Für eine stetige Funktion $u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ oder $u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ findet man, dass für $u_i = \zeta_i u$ gilt

$$\text{support}(u_i) \subset A_i \text{ für } i \leq m \text{ und } \sum_{i=1}^{m+1} u_i = u.$$

8.1.2 Intermezzo zum Träger einer Funktion

Bis jetzt haben wir den Träger einer Funktion $u \in C(\Omega)$ definiert durch

$$\text{support}(u) = \overline{\{x \in \Omega; u(x) \neq 0\}}. \quad (8.2)$$

Für Funktionenklassen, also zum Beispiel für ein Element aus $L^p(\Omega)$, ist diese Definition nicht passend.

Definition 8.1.5 Für Lebesgue-messbare Funktionen $u : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ betrachtet man alle offenen Mengen ω_i , für die gilt $u = 0$ f.ü. auf ω_i . Man definiert

$$\text{support}(u) = \mathbb{R}^n \setminus \left(\bigcup \omega_i \right). \quad (8.3)$$

Bemerkung 8.1.6 Für Lebesgue-messbare Funktionen $u : \Omega \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, definiert man $\text{support}(u) = \text{support}(\tilde{u})$ für

$$\tilde{u}(x) = \begin{cases} u(x) & \text{für } x \in \Omega, \\ 0 & \text{für } x \notin \Omega. \end{cases}$$

Bemerkung 8.1.7 Diese Definition vom Träger ist nur vernünftig, wenn $u = 0$ f.ü. auf $\bigcup \omega_i$. Wenn $u = 0$ f.ü. auf ω_i , dann gilt $u = 0$ f.ü. auf jeder abzählbaren Vereinigung von ω_i -s und nicht auf überabzählbaren Vereinigungen. Es gibt jedoch fast immer überabzählbar viele solche ω_i -s. Folgendes hilft uns weiter. Jede offene Menge A in $\mathbb{R}^n$ kann man bekommen durch eine abzählbare Vereinigung von $B_r(q)$ mit $r \in \mathbb{Q}^+$ und $q \in \mathbb{Q}^n$. Das heißt $\omega_i = \bigcup_{j \in \mathbb{N}} B_{r_{ij}}(q_{ij})$ für bestimmte r_{ij} und q_{ij} . Dann hat man

$$\bigcup_i \omega_i = \bigcup_i \bigcup_{j \in \mathbb{N}} B_{r_{ij}}(q_{ij}).$$

Weil es nur abzählbar viele solche $B_r(q)$ gibt, ist auch diese Vereinigung abzählbar. Die abzählbare Vereinigung von Nullmengen $\{x \in B_{r_{ij}}(q_{ij}); f(x) \neq 0\}$ ist wiederum eine Nullmenge und daher folgt, dass $u = 0$ f.ü. auf $\bigcup \omega_i$.

Weil die Vereinigung offener Mengen wiederum offen ist, ist $\text{support}(u)$ abgeschlossen.

Aufgabe 24 1. Zeigen Sie, dass (8.2) für $u \in L^1(\Omega)$ nicht wohldefiniert ist, sondern abhängt vom gewählten Vertreter.

2. Zeigen Sie, dass (8.3) für $u \in L^1(\Omega)$ wohldefiniert ist, da diese Definition nicht abhängt von den gewählten Vertreter.

3. Zeigen Sie, dass die Definitionen in (8.2) und (8.3) übereinstimmen für $u \in C(\Omega)$.

8.2 Fortsetzen einer Funktion

Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ mit genügend glattem Rand. Wir möchten eine Funktion auf Ω zu einer Funktion auf $\mathbb{R}^n$ fortsetzen auf eine sehr strukturierten Art. Genauer gesagt, wir möchten Operatoren E_k^Ω zur Verfügung haben, die folgendes erfüllen:

Definition 8.2.1 $E_k^\Omega : C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \rightarrow C_b^{k,\gamma}(\mathbb{R}^n)$ beziehungsweise $E_k^\Omega : W^{k,p}(\bar{\Omega}) \rightarrow W^{k,p}(\mathbb{R}^n)$ nennt man *Fortsetzungsoperator*, wenn

1. E_k^Ω ein beschränktes lineares Funktional ist: $E_k^\Omega \in L\left(C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}); C_b^{k,\gamma}(\mathbb{R}^n)\right)$ bzw. $E_k^\Omega \in L\left(W^{k,p}(\bar{\Omega}); W^{k,p}(\mathbb{R}^n)\right)$;
2. $(E_k^\Omega u)|_{\bar{\Omega}} = I$, die Einschränkung² der Fortsetzung³ gibt die Identität.

In einer Dimension hat man folgende Beispiele.

Beispiel 8.2.2 Definiere $E_0 : C_b[0, \infty) \rightarrow C_b(\mathbb{R})$ und auch $E_0 : W^{1,p}(\mathbb{R}^+) \rightarrow W^{1,p}(\mathbb{R})$ durch

$$(E_0 u)(x) := \begin{cases} u(x) & \text{für } x \geq 0, \\ u(-x) & \text{für } x < 0. \end{cases}$$

Man zeigt für $E_0 : C_b[0, \infty) \rightarrow C_b(\mathbb{R})$ direkt, dass beide Eigenschaften erfüllt sind. Für $E_0 : W^{1,p}(\mathbb{R}^+) \rightarrow W^{1,p}(\mathbb{R})$ ist ein Beweis schon etwas schwieriger.

Beispiel 8.2.3 Definiere $E_0 : C[0, 1] \rightarrow C_b(\mathbb{R})$ und auch $E_0 : W^{1,p}((0, 1)) \rightarrow W^{1,p}(\mathbb{R})$ durch

$$(E_0 u)(x) := \begin{cases} 0 & \text{für } x \in (-\infty, -1], \\ u(-x) \chi\left(x + \frac{1}{2}\right) & \text{für } x \in (-1, 0), \\ u(x) & \text{für } x \in [0, 1], \\ u(2-x) \left(1 - \chi\left(x - \frac{3}{2}\right)\right) & \text{für } x \in (1, 2), \\ 0 & \text{für } x \in [2, \infty). \end{cases}$$

Die Funktion χ , definiert durch

$$\chi(x) = \left(\varphi_{\frac{1}{4}} * H\right)(x)$$

ist gleich 0 für $x < \frac{1}{4}$ und ist gleich 1 für $x > \frac{1}{4}$; $\varphi_{\frac{1}{4}}$ ist der Friedrichsche Glätter und H ist die Heaviside Funktion, definiert in (6.3).

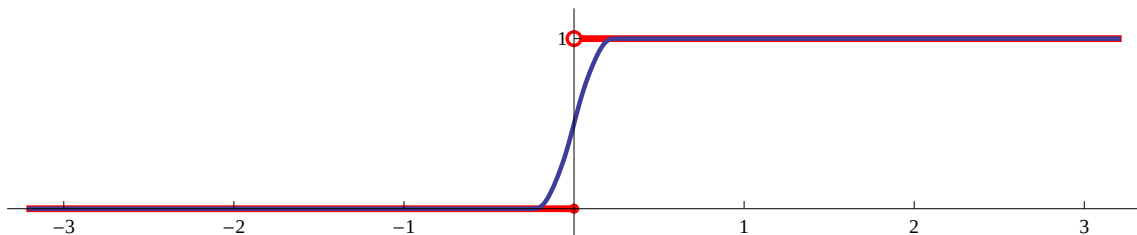


Abbildung 8.4: Skizze zu H und χ

²Einschränkung = *restriction*

³Fortsetzung = *extension*

Beispiel 8.2.4 Definiere $E_1 : C_b^1[0, \infty) \rightarrow C_b^1(\mathbb{R})$ durch

$$(E_1 u)(x) := \begin{cases} u(x) & \text{für } x \geq 0, \\ -3u(-x) + 4u(-\frac{1}{2}x) & \text{für } x < 0. \end{cases}$$

Man findet, dass

$$\begin{aligned} \lim_{x \uparrow 0} (E_1 u)(x) &= (E_1 u)(0), \\ \lim_{x \uparrow 0} (E_1 u)(x) &= (E_1 u)'(0) = \lim_{x \downarrow 0} (E_1 u)(x), \end{aligned}$$

und

$$\|E_1 u\|_{L^\infty(\mathbb{R})} \leq 7 \|u\|_{L^\infty[0, \infty)}.$$

Aufgabe 25 Definieren Sie einen stetigen linearen Fortsetzungsoperator

$$E_1 : C^1[0, 1] \rightarrow C_b^1(\mathbb{R})$$

und zeigen Sie, dass Ihr Operator E_1 die gewünschten Eigenschaften hat.

Für $E_k \in L(C_b^{k, \gamma}[0, \infty); C_b^{k, \gamma}(\mathbb{R}))$ und für $E_k \in L(W^{k+1, p}[0, \infty); W^{k+1, p}(\mathbb{R}))$ definiert man

$$(E_k u)(x) := \begin{cases} u(x) & \text{für } x \geq 0, \\ \sum_{i=1}^{k+1} c_i u(-\frac{1}{i}x) & \text{für } x < 0, \end{cases} \quad (8.4)$$

mit den Konstanten c_i bestimmt durch

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ -1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{3} & \cdots & -\frac{1}{k+1} \\ 1 & (\frac{1}{2})^2 & (\frac{1}{3})^2 & \cdots & (\frac{1}{k+1})^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ (-1)^k & (-\frac{1}{2})^k & (-\frac{1}{3})^k & \cdots & (-\frac{1}{k+1})^k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Diese Gleichung findet man durch

$$\lim_{x \uparrow 0} \left(\frac{d}{dx} \right)^m (E_k u)(x) = \lim_{x \downarrow 0} \left(\frac{d}{dx} \right)^m u(x) \text{ für } m \in \{0, \dots, k\}.$$

Lemma 8.2.5 Sei $k \in \mathbb{N}$, $\gamma \in [0, 1]$ und $p \in [1, \infty]$. Dann ist E_k , definiert in (8.4), eine stetige lineare Fortsetzung sowohl von $C_b^{k, \gamma}[0, \infty)$ nach $C_b^{k, \gamma}(\mathbb{R})$, als auch von $W^{k+1, p}[0, \infty)$ nach $W^{k+1, p}(\mathbb{R})$.

Aufgabe 26 Zeige, dass $E_k \in L(C_b^k[0, \infty); C_b^k(\mathbb{R}))$.

Wie geht man vor in mehreren Dimensionen? Eine explizite Konstruktion konstruiert man wie folgt für ein Gebiet mit C^k -Rand.

1. Nehme eine offene Überdeckung⁴ des Randes wie in der Definition 8.1.2. Dann ist $\{A_1, \dots, A_m, \Omega, \mathbb{R}^n \setminus \bar{\Omega}\}$ eine offene Überdeckung von $\mathbb{R}^n$. Wir nehmen eine zugehörige Zerlegung der Eins, dass heißt, ζ_j mit

$$\begin{cases} \text{support}(\zeta_j) \subset A_j \text{ für } j = 1, \dots, m, \\ \text{support}(\zeta_{m+1}) \subset \Omega, \\ \text{support}(\zeta_{m+2}) \subset \mathbb{R}^n \setminus \bar{\Omega}. \end{cases}$$

⁴Überdeckung = covering

2. Setze für $j = 1, \dots, m$

$$\tilde{u}_j = \begin{cases} (\zeta_j \cdot u) \circ S_j^{-1} & \text{für } S_j x \in \text{support}(\zeta_j), \\ 0 & \text{für } S_j x \notin \text{support}(\zeta_j), \end{cases} \quad (8.5)$$

mit den zu A_i gehörenden lokalen Koordinaten

$$S_j \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n - f_j(y_1, \dots, y_{n-1}) \end{pmatrix}.$$

Die Abbildung S_j „bügelt“ den Rand flach.

3. Definiere für $j = 1, \dots, m$

$$E^j \tilde{u}_j(x_1, \dots, x_n) = (E_k \tilde{u}_j(x_1, \dots, x_{n-1}, \cdot))(x_n),$$

Dies ist die eindimensionale Erweiterung in x_n -Richtung mit den ersten $n - 1$ Koordinaten als Parameter.

4. Schließlich schiebt man die Funktionen zurück zu A_j und addiert diese Funktionen:

$$E_k^\Omega u = \sum_{j=1}^m (E^j \tilde{u}_j) \circ S_j + \zeta_{m+1} u.$$

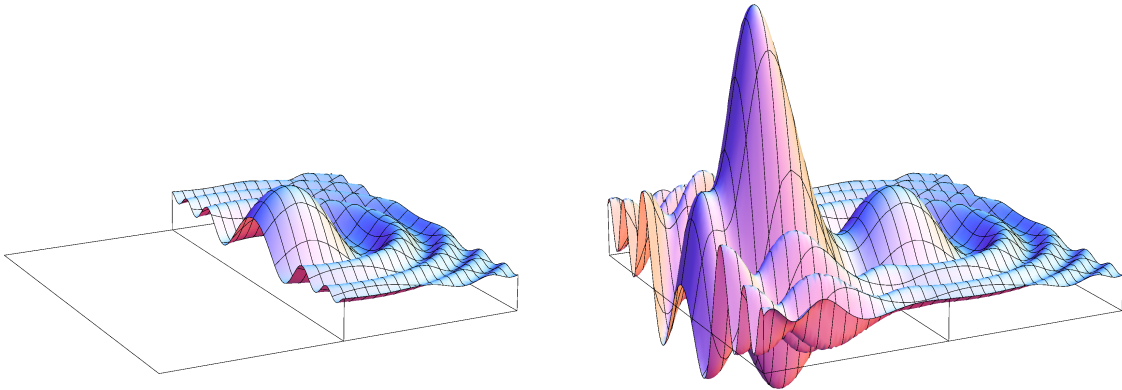


Abbildung 8.5: Darstellung einer Funktion $u \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$ und ihre Fortsetzung $\tilde{u} = E_1(u) \in C^1(\mathbb{R}^2)$.

Lemma 8.2.6 Wenn $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt ist und $\partial\Omega \in C^{k+1}$, dann gilt für den oben konstruierten Operator E_k^Ω :

1. $E_k^\Omega : C^{\ell, \gamma}(\bar{\Omega}) \rightarrow C_b^{\ell, \gamma}(\mathbb{R}^n)$ ist stetig für jedes ℓ mit $\ell \leq k$,
2. $E_k^\Omega : W^{\ell, p}(\Omega) \rightarrow W^{\ell, p}(\mathbb{R}^n)$ ist stetig für jedes $\ell \leq k$ und $p \in [1, \infty]$.

Beweis. Die erste Behauptung beweist man geradeaus. Die zweite Aussage ist schwieriger zu beweisen. Man soll zeigen, dass die schwache Ableitungen von $E_k^\Omega(u)$ bis Ordnung ℓ auch in eine Umgebung des Randes existieren und diese Ableitungen da in L^p -Sinne beschränkt sind durch $\|u\|_{W^{\ell, p}(\Omega)}$. Der einfachste Weg ist es u durch $\{u_m\}_{m \in \mathbb{N}} \subset C^{\ell, \gamma}(\bar{\Omega})$ in $\|\cdot\|_{W^{\ell, p}(\Omega)}$ -Norm zu approximieren. ■

Aufgabe 27 Die Bedingung, dass man $\partial\Omega \in C^1$ hat, ist nicht immer notwendig, wenn man noch extra Randbedingungen hat. Konstruiere eine Fortsetzung $\tilde{E} : C_b^1([0, \infty)^2) \cap C_0([0, \infty)^2) \rightarrow C_b^1(\mathbb{R}^2)$.

Aufgabe 28 Sei $u : \bar{B}_1(0) \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ und setze

$$\hat{E}u(x) = \begin{cases} u(x) & \text{für } |x| \leq 1, \\ 2u\left(\frac{2x}{|x|^2+1}\right) - u\left(\frac{x}{|x|^2}\right) & \text{für } |x| > 1. \end{cases}$$

Für welche $k \in \mathbb{N}$ ist $\hat{E} : C_b^k(\bar{B}) \rightarrow C_b^k(\mathbb{R}^n)$ wohldefiniert?

8.3 Einschränken auf dem Rand

Wie wir schon mal gesehen haben, ist eine $L^p(\Omega)$ oder $W^{k,p}(\Omega)$ -Funktion nicht unbedingt wohldefiniert in Nullmengen, weil man eigentlich Äquivalenzklassen betrachtet. Trotzdem kann man manchmal sagen, dass es in so einer Äquivalenzklasse eine Funktion gibt, die stetig ist und die damit an jedem Punkt festliegt. Zum Beispiel haben wir gesehen, dass in einer Dimension jede Äquivalenzklasse $f \in W^{1,p}(a, b)$ einen stetigen Vertreter hat, den wir ohne viel Zögern auch f genannt haben. Dann kann man den Randwert festlegen als den Randwert dieser stetiger Vertreter. Kann man so etwas auch in höheren Dimensionen haben? Im Allgemeinen sind Funktionen vom L^p -Typ nur fast überall festgelegt und das bedeutet, dass so eine Funktion auf Nullmengen wie $\partial\Omega$ nicht bestimmt ist.

Theorem 8.3.1 Sei $p \in (1, \infty)$ und $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt und $\partial\Omega \in C^1$. Dann gilt folgendes:

1. Für jedes $u \in W^{1,p}(\Omega)$ gibt es eine Folge von $C^1(\bar{\Omega})$ -Funktionen $\{u_m\}_{m=1}^\infty$ für die gilt

$$\|u - u_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} \rightarrow 0 \text{ für } m \rightarrow \infty. \quad (8.6)$$

2. Sei $u \in W^{1,p}(\Omega)$ und sei $\{u_m\}_{m=1}^\infty$ eine Folge von $C^1(\bar{\Omega})$ -Funktionen für die (8.6) gilt. Dann gibt es $v \in L^p(\partial\Omega)$ derart, dass

$$\left\|v - (u_m)|_{\partial\Omega}\right\|_{L^p(\partial\Omega)} \rightarrow 0 \text{ für } m \rightarrow \infty.$$

Dieser Limes v hängt nur von u ab und nicht von der Folge $\{u_m\}_{m=1}^\infty$.

Durch diese ersten beiden Aussagen ist $T : W^{1,p}(\Omega) \rightarrow L^p(\partial\Omega)$ durch $Tu := v$ wohldefiniert.

3. T ist ein beschränkter linearer Operator: $T \in L(W^{1,p}(\Omega), L^p(\partial\Omega))$.
4. Für $u \in W^{1,p}(\Omega) \cap C(\bar{\Omega})$ gilt $Tu = u|_{\partial\Omega}$ f.ü. (in Dimension $n - 1$) auf $\partial\Omega$.

Bemerkung 8.3.2 T heißt Spuroperator⁵; Tu heißt Spur von u .

Beweis. Wir beweisen die Aussagen in mehreren Schritten.

⁵Spur = trace

1. Weil $\partial\Omega \in C^1$, gibt es eine Fortsetzung $E_1^\Omega : W^{1,p}(\Omega) \rightarrow W^{1,p}(\mathbb{R}^n)$. Wir definieren mit Hilfe des Friedrichschen Glätters

$$u_m := \varphi_{1/m} * E_1^\Omega(u).$$

Aus den Eigenschaften von der Glättungsfunktion findet man $u_m \in C^1(\mathbb{R}^n)$ und $\|E_1^\Omega(u) - u_m\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)} \rightarrow 0$ für $m \rightarrow \infty$ und so auch $u \in C^1(\bar{\Omega})$ und die Konvergenz auf Ω .

2. Es reicht, wenn wir zeigen können, dass für $\tilde{u}_j$ wie in (8.5), der Spuroperator die gewünschten Eigenschaften hat. Erst beweisen wir eine Abschätzung für $u \in C^1(\bar{\Omega})$ und somit $u_j = \zeta_j u \in C^1(\bar{\Omega} \cap \bar{A}_j)$. Bemerke, dass

$$\text{support}(u_j) \subset \bar{\Omega} \cap A_j. \quad (8.7)$$

Man hat

$$\int_{\partial\Omega \cap \bar{A}_j} |u_j|^p d\sigma_y = \int_{B_j} |\tilde{u}_j|^p J dx' \leq C \int_{B_j} |\tilde{u}_j|^p dx',$$

wobei $J = \sqrt{1 + |\nabla f_j|^2}$ beschränkt ist, weil $f_j \in C^1(\bar{B}_j)$. Weil der transformierte Rand jetzt flach ist und $\tilde{u}_j$ einen kompakten Träger hat, kann man vom Rand ins Gebiet ‘hinein’ integrieren und findet mit

$$\tilde{u} = u \circ T_j^{-1}, \quad \tilde{\zeta}_j = \zeta_j \circ T_j^{-1} \quad \text{und} \quad \tilde{u}_j = \tilde{\zeta}_j \tilde{u},$$

dass

$$|\tilde{u}_j(x', a)|^p - |\tilde{u}_j(x', 0)|^p = \int_0^a \frac{\partial}{\partial x_n} |\tilde{u}_j(x', x_n)|^p dx_n$$

und wegen (8.7), gilt für a genügend groß, dass $|\tilde{u}_j(x', a)|^p = 0$. Es folgt

$$\begin{aligned} \int_{B_j} |\tilde{u}_j|^p dx' &= - \int_{B_j} \int_0^a \frac{\partial}{\partial x_n} \left(\tilde{\zeta}_j^p \cdot |\tilde{u}|^p \right) dx_n dx' = \\ &= - \int_{B_j} \int_0^a \left(\left(\frac{\partial}{\partial x_n} \left(\tilde{\zeta}_j \right)^p \right) |\tilde{u}|^p + \left(\tilde{\zeta}_j \right)^p \cdot p |\tilde{u}|^{p-2} \tilde{u} \frac{\partial}{\partial x_n} \tilde{u} \right) dx_n dx' \leq \\ &\leq C \int_{B_j \times [0, a]} \left(|\tilde{u}|^p + |\tilde{u}|^{p-1} \left| \frac{\partial}{\partial x_n} \tilde{u} \right| \right) dx \leq \\ &\leq C \int_{B_j \times [0, a]} \left(|\tilde{u}|^p + \frac{p-1}{p} |\tilde{u}|^p + \frac{1}{p} \left| \frac{\partial}{\partial x_n} \tilde{u} \right|^p \right) dx \leq \\ &\leq C' \|u\|_{W^{1,p}(\Omega \cap A_j)}. \end{aligned}$$

Wir haben dabei die Ungleichung von Young benutzt: $ab \leq \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{q}b^q$ für $a, b > 0$ und $p, q > 1$ mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Es folgt weiter, dass

$$\begin{aligned} \|u\|_{L^p(\partial\Omega)} &= \left(\int_{\partial\Omega} |u|^p d\sigma_y \right)^{1/p} = \left(\int_{\partial\Omega} \left| \sum_{j=1}^\ell \zeta_j u \right|^p d\sigma_y \right)^{1/p} \leq \\ &\leq c_p \left(\sum_{j=1}^\ell \int_{\partial\Omega} |\zeta_j u|^p d\sigma_y \right)^{1/p} \leq \tilde{C} \|u\|_{W^{1,p}(\Omega)}. \end{aligned}$$

Wenn also $\{u_m\}_{m=1}^\infty$ eine Folge von $C^1(\bar{\Omega})$ -Funktionen ist, für die gilt

$$\|u - u_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} \rightarrow 0 \quad \text{für } m \rightarrow \infty,$$

dann gilt auch

$$\|u_m - u_k\|_{L^p(\partial\Omega)} \leq \tilde{C} \|u_m - u_k\|_{W^{1,p}(\Omega)}$$

und $\{(u_m)_{|\partial\Omega}\}_{m=1}^\infty$ ist eine Cauchyfolge in $L^p(\partial\Omega)$ und damit konvergent.

Auf identische Weise zeigt man, dass der Limes nicht von der Wahl der Folge abhängt. Wenn man zwei derartige Folgen hat, nennen wir sie $\{u_m\}$ und $\{w_m\}$, so gilt

$$\begin{aligned} \|u_m - w_m\|_{L^p(\partial\Omega)} &\leq \tilde{C} \|u_m - w_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} \leq \\ &\leq \tilde{C} (\|u_m - u\|_{W^{1,p}(\Omega)} + \|u - w_m\|_{W^{1,p}(\Omega)}) \rightarrow 0. \end{aligned}$$

So ist T wohldefiniert.

3. Die Linearität von T folgt aus $\lim_{m \rightarrow \infty} (au_m + bw_m) = a \lim_{m \rightarrow \infty} u_m + b \lim_{m \rightarrow \infty} w_m$ und die Eigenschaften einer Norm. Weil

$$\begin{aligned} \|Tu - (u_m)_{|\partial\Omega}\|_{L^p(\partial\Omega)} &= \lim_{k \rightarrow \infty} \|(u_k)_{|\partial\Omega} - (u_m)_{|\partial\Omega}\|_{L^p(\partial\Omega)} \leq \\ &\leq \lim_{k \rightarrow \infty} \tilde{C} \|u_k - u_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} = \tilde{C} \|u - u_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} \end{aligned}$$

gilt, ist T beschränkt.

4. Es bleibt übrig zu zeigen, dass es für $u \in W^{1,p}(\Omega) \cap C(\bar{\Omega})$ tatsächlich das Ergebnis gibt, das wir uns gewünscht haben: $Tu = u_{|\partial\Omega}$. Für solche u gilt, dass $u_m = \varphi_{1/m} * E_1^\Omega u \in C^1(\bar{\Omega})$, $\|u_m - u\|_{C(\bar{\Omega})} \rightarrow 0$ und $\|u_m - u\|_{W^{1,p}(\Omega)} \rightarrow 0$. Es folgt

$$\|Tu - u_m\|_{L^p(\partial\Omega)} \leq \tilde{C} \|u - u_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} \rightarrow 0,$$

$$\|u_m - u_{|\partial\Omega}\|_{L^p(\partial\Omega)} \leq |\partial\Omega| \|u_m - u_{|\partial\Omega}\|_{C(\partial\Omega)} \leq |\partial\Omega| \|u_m - u\|_{C(\bar{\Omega})} \rightarrow 0$$

und dann auch

$$\|Tu - u_{|\partial\Omega}\|_{L^p(\partial\Omega)} \leq \|Tu - u_m\|_{L^p(\partial\Omega)} + \|u_m - u_{|\partial\Omega}\|_{L^p(\partial\Omega)} \rightarrow 0$$

und $Tu = u_{|\partial\Omega}$ fast überall (in Dimension $n - 1$) auf $\partial\Omega$. ■

Aufgabe 29 Zeigen Sie die Ungleichung von Young: für $a, b > 0$ und $p, q > 1$ mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ gilt

$$ab \leq \frac{1}{p} a^p + \frac{1}{q} b^q.$$

Theorem 8.3.3 Sei $p \in (1, \infty)$ und sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ mit $\partial\Omega \in C^1$. Für $u \in W^{1,p}(\Omega)$ und den Spuroperator definiert in Theorem 8.3.1 gilt:

$$u \in W_0^{1,p}(\Omega) \Leftrightarrow Tu = 0.$$

Beweis. $\Rightarrow$. Wenn $u \in W_0^{1,p}(\Omega)$, dann gibt es eine Folge $\{u_m\} \subset C_c^\infty(\Omega)$, die in $\|\cdot\|_{W^{1,p}(\Omega)}$ -Norm zu u konvergiert. Die Behauptung folgt aus

$$\|Tu\|_{L^p(\partial\Omega)} = \|Tu - u_m\|_{L^p(\partial\Omega)} \leq C \|u - u_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} \rightarrow 0.$$

$\Leftarrow$. Die Annahme, dass $\partial\Omega \in C^1$, spielt hier eine wesentliche Rolle und daher kann man vermuten, dass der Beweis nicht so einfach sein kann. Als erstes sei bemerkt, dass $\partial\Omega \in C^1$ uns erlaubt, den Rand mit $S : C^1(\Omega; \mathbb{R}_+^n)$ lokal glattzubügeln. Dies erlaubt uns eine Zerlegung der Eins anzuwenden und lokal $\Omega \cap A_i$ als Teil vom Halbraum $\mathbb{R}_+^n := \mathbb{R}^{n-1} \times \mathbb{R}^+$ zu betrachten. Die Funktion $\tilde{u}_i := (\zeta_i u) \circ S^{-1} \in W^{1,p}(\mathbb{R}_+^n)$ hat einen kompakten Träger und $Tu = 0$ liefert $T\tilde{u}_i = 0$. Wir schreiben weiter wieder u statt $\tilde{u}_i$.

1. Als ersten Schritt zeigen wir eine Abschätzung. Wenn $Tu = 0$, dann gibt es Funktionen $\{u_m\}_{m \in \mathbb{N}} \subset C^1(\overline{\mathbb{R}_+^n})$ derart, dass

$$\|u_m - u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}_+^n)} \rightarrow 0 \quad \text{und} \quad \|u_m\|_{L^p(\mathbb{R}^{n-1} \times \{0\})} \rightarrow 0.$$

Vom Rand hinauf integrieren liefert

$$u_m(x', x_n) = u_m(x', 0) + \int_0^{x_n} \left(\frac{\partial}{\partial x_n} u_m \right)(x', s) ds$$

und

$$\begin{aligned} |u_m(x', x_n)|^p &\leq C_p \left(|u_m(x', 0)|^p + \left| \int_0^{x_n} \left(\frac{\partial}{\partial x_n} u_m \right)(x', s) ds \right|^p \right) \\ &\leq C_p \left(|u_m(x', 0)|^p + \int_0^{x_n} \left| \left(\frac{\partial}{\partial x_n} u_m \right)(x', s) \right|^p ds \left(\int_0^{x_n} 1 ds \right)^{p-1} \right). \end{aligned}$$

Man bekommt

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} |u_m(x', x_n)|^p dx' &\leq \\ &\leq C_p \left(\int_{\mathbb{R}^{n-1}} |u_m(x', 0)|^p dx' + x_n^{p-1} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \int_0^{x_n} \left| \left(\frac{\partial}{\partial x_n} u_m \right)(x', s) \right|^p ds dx' \right). \end{aligned}$$

Nehmen wir $m \rightarrow \infty$, so folgt

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} |u(x', x_n)|^p dx' &\leq C_p x_n^{p-1} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \int_0^{x_n} \left| \left(\frac{\partial}{\partial x_n} u \right)(x', s) \right|^p ds dx' \\ &\leq C_p x_n^{p-1} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \int_0^{x_n} |(\nabla u)(x', s)|^p ds dx'. \end{aligned} \quad (8.8)$$

2. Als erste Annäherung konstruieren wir eine Funktion mit kompaktem Träger. Wir definieren $\chi \in C^\infty([0, \infty))$ durch

$$\chi(x) = \left(\varphi_{\frac{1}{4}} * H\left(\frac{3}{2} - \cdot\right) \right)(x).$$

Es gilt $\chi(x) = 1$ auf $[0, 1]$ und $\chi(x) = 0$ auf $[2, \infty)$.

Wir betrachten

$$w_m(x) = u(x) (1 - \chi(mx_n)) \quad \text{für } x \in \overline{\mathbb{R}_+^n}$$

und finden

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_m}{\partial x_n}(x) &= \frac{\partial u}{\partial x_n}(x) (1 - \chi(mx_n)) - mu(x) \chi'(mx_n), \\ \frac{\partial w_m}{\partial x'}(x) &= \frac{\partial u}{\partial x'}(x) (1 - \chi(mx_n)). \end{aligned}$$

Wir behaupten, dass

$$\|w_m - u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}_+^n)} \rightarrow 0. \quad (8.9)$$

Man findet sofort, dass

$$\|w_m - u\|_{L^p(\mathbb{R}_+^n)} = \|\chi(m \cdot_n) u\|_{L^p(\mathbb{R}_+^n)} \rightarrow 0 \text{ für } m \rightarrow \infty.$$

Weiter gilt

$$\|\nabla(w_m - u)\|_{L^p(\mathbb{R}_+^n)} \leq \|\chi(m \cdot_n) \nabla u\|_{L^p(\mathbb{R}_+^n)} + \|m\chi'(m \cdot_n) u\|_{L^p(\mathbb{R}_+^n)}. \quad (8.10)$$

Auch hier findet man sofort, dass $\|\chi(m \cdot_n) \nabla u\|_{L^p(\mathbb{R}_+^n)} \rightarrow 0$ für $m \rightarrow \infty$ und es bleibt nur der letzte Term in (8.10), für die man Konvergenz nach 0 zu zeigen hat:

$$\begin{aligned} \|m\chi'(m \cdot_n) u\|_{L^p(\mathbb{R}_+^n)}^p &= \int_0^{2/m} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} m^p |\chi'(mx_n)|^p |u(x', x_n)|^p dx' dx_n \\ &\leq m^p \|\chi'\|_\infty^p \int_0^{2/m} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} |u(x', x_n)|^p dx' dx_n \\ &\leq m^p \|\chi'\|_\infty^p \int_0^{2/m} C_p x_n^{p-1} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \int_0^{x_n} |(\nabla u)(x', s)|^p ds dx' dx_n \\ &\leq m^p \|\chi'\|_\infty^p \int_0^{2/m} C_p x_n^{p-1} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \int_0^{2/m} |(\nabla u)(x', s)|^p ds dx' dx_n \\ &= m^p \|\chi'\|_\infty^p \frac{C_p}{p} \left(\frac{2}{m}\right)^p \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \int_0^{2/m} |(\nabla u)(x', s)|^p ds dx' \\ &\leq C_{p,\chi} \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \int_0^{2/m} |(\nabla u)(x', s)|^p ds dx'. \end{aligned} \quad (8.11)$$

Wir verwendeten (8.8). Der Term in (8.11) geht nach 0 für $m \rightarrow \infty$ und so finden wir, dass (8.9) gilt.

3. Wir glätten für eine approximierende Folge in $C_c^\infty(\mathbb{R}_+^n)$. Weil $w_m(x', x_n) = 0$ gilt für $x_n < m^{-1}$, können wir den Friedrichschen Glätter mit $\varepsilon = \frac{1}{2}m^{-1}$ auf w_m loslassen, das heißt, wir betrachten

$$v_n = \varphi_{\frac{1}{2m}} * w_m$$

und finden, dass $v_n \in C_c^\infty(\mathbb{R}_+^n)$ und

$$\|w_m - v_n\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}_+^n)} \rightarrow 0. \quad (8.12)$$

Man findet $\|v_m - u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}_+^n)} \rightarrow 0$ und dies bedeutet $u \in W_0^{1,p}(\mathbb{R}_+^n)$.

Zurucktransformieren und Zusammenkleben liefert uns für die ursprüngliche Funktion, dass $u \in W_0^{1,p}(\Omega)$. ■

Variationsrechnung

Kapitel 9



Funktionenräume und ihr Zusammenhang I

9.1 Hölder und Sobolev

Inzwischen haben wir Bekanntschaft gemacht mit zwei Typen von Funktionenräumen: $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})$ und $W^{k,p}(\Omega)$. Fast trivialerweise findet man auf einem beschränkten Gebiet $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ mit $\partial\Omega \in C^1$ folgende Einbettungen¹ für $k, \ell, m, \mu \in \mathbb{N}$, $\gamma, \beta \in [0, 1]$ und $p, q \in [1, \infty]$:

$$\begin{aligned} \text{wenn } k > \ell: & \quad C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow C^{\ell,\beta}(\bar{\Omega}), \\ \text{wenn } k = \ell \text{ und } \gamma \geq \beta: & \quad C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow C^{\ell,\beta}(\bar{\Omega}), \\ \text{wenn } k \geq m: & \quad C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow W^{m,p}(\Omega), \\ \text{wenn } k \geq m \text{ und } p \geq q: & \quad W^{k,p}(\Omega) \hookrightarrow W^{m,q}(\Omega). \end{aligned}$$

Die Notation „ $\hookrightarrow$ “ ist nicht Standard. Manchmal schreibt man auch beispielsweise $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \subset C^{\ell,\beta}(\bar{\Omega})$, meint dann jedoch nicht nur, dass die eine Menge die andere enthält, sondern auch, dass die Identität $\mathcal{I} : C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \rightarrow C^{\ell,\beta}(\bar{\Omega})$ stetig ist. Eine lineare Abbildung $L : X \rightarrow Y$ ist stetig, genau dann, wenn sie linear beschränkt ist. Also ist $\mathcal{I} : X \rightarrow Y$ eine Einbettung, wenn es $C \in \mathbb{R}^+$ gibt so, dass $\|x\|_Y \leq C \|x\|_X$ für alle $x \in X$.

9.1.1 Eine Einbettung in einer Dimension

In einer Dimension haben wir in Lemma 6.2.7 schon gesehen, dass Funktionen $u \in W^{1,p}(a, b)$ stetig sind, oder besser gesagt, dass man für jede Funktionenklasse in $W^{1,p}(a, b)$ eine vertretende Funktion finden kann, die in $C^0[a, b]$ liegt. Wenn wir die Funktionenklasse mit ihrem Vertreter identifizieren, kann man sagen, dass

$$W^{1,p}(a, b) \subset C^0[a, b].$$

Für die Einbettung soll man noch zeigen, dass $\|u\|_{C^0[a,b]} \leq C \|u\|_{W^{1,p}(a,b)}$. Schauen wir uns

$$v(x) = u(x) - \frac{1}{b-a} \int_a^b u(s) ds$$

¹Einbettung = *imbedding* (U.S.), *embedding* (U.K.)

an. Aus dem Lemma folgt, dass wir u und deshalb auch v stetig nehmen dürfen. Und weil v eine Nullstelle hat, sage $x_0 \in [a, b]$ finden wir, mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, wie im Beweis von Lemma 6.2.7, dass

$$\begin{aligned} \|v\|_{C^0[a,b]} &= \sup_{x \in [a,b]} |v(x)| = \sup_{x \in [a,b]} |v(x) - v(x_0)| = \sup_{x \in [a,b]} \left| \int_{x_0}^x v'(s) ds \right| = \\ &= \sup_{x \in [a,b]} \left| \int_{x_0}^x u'(s) ds \right| \leq \int_a^b |u'(s)| ds \leq \left| \int_a^b 1 ds \right|^{\frac{1}{q}} \left| \int_a^b |u'(s)|^p ds \right|^{\frac{1}{p}} \leq \\ &\leq (b-a)^{\frac{1}{q}} \|u'\|_{L^p(a,b)} \end{aligned}$$

und wir finden fast genauso

$$\left| \frac{1}{b-a} \int_a^b u(s) ds \right| \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b |u(s)| ds \leq (b-a)^{\frac{1}{q}-1} \|u\|_{L^p(a,b)}.$$

Zusammen ergibt dies

$$\begin{aligned} \|u\|_{C^0[a,b]} &= \sup_{x \in [a,b]} \left| v(x) + \frac{1}{b-a} \int_a^b u(s) ds \right| \leq \\ &\leq \|v\|_{C^0[a,b]} + \left| \frac{1}{b-a} \int_a^b u(s) ds \right| \leq c \|u\|_{W^{1,p}(a,b)}. \end{aligned}$$

Um auch in höheren Dimensionen derartige Sätze beweisen zu können, braucht man einige Abschätzungen.

9.1.2 Für $p < n$ von $W^{1,p}(\Omega)$ zu $L^q(\Omega)$

Aus der Definition folgt sofort, dass $W^{1,p}(\Omega) \subset L^p(\Omega)$ und dass

$$\|u\|_{L^p(\Omega)} \leq \|u\|_{W^{1,p}(\Omega)} \text{ für alle } u \in W^{1,p}(\Omega).$$

Die Frage ist, ob man das p in $L^p(\Omega)$ noch etwas verbessern kann und der folgende Satz liefert uns die Antwort im Fall, dass $p < n$.

Theorem 9.1.1 (Gagliardo-Nirenberg-Sobolev Ungleichung) Sei $n \in \mathbb{N}^+$ und $p \in [1, n)$. Für alle $u \in C_c^1(\mathbb{R}^n)$ gilt

$$\|u\|_{L^{\frac{pn}{n-p}}(\mathbb{R}^n)} \leq \frac{(n-1)p}{n-p} \|\nabla u\|_{L^p(\mathbb{R}^n)}.$$

Beweis. Angefangen wird mit $p = 1$. Weil u einen kompakten Träger hat, findet man

$$u(x) = \int_{-\infty}^{x_i} \frac{\partial u}{\partial y_i}(x_1, \dots, y_i, \dots, x_n) dy_i,$$

$$|u(x)| \leq \int_{\mathbb{R}} |\nabla u(x_1, \dots, y_i, \dots, x_n)| dy_i,$$

$$|u(x)|^n \leq \prod_{i=1}^n \int_{\mathbb{R}} |\nabla u(x_1, \dots, y_i, \dots, x_n)| dy_i.$$

Nach x_1 integrieren liefert

$$\int_{\mathbb{R}} |u(x)|^{\frac{n}{n-1}} dx_1 \leq \int_{\mathbb{R}} \left(\prod_{i=1}^n \int_{\mathbb{R}} |\nabla u(x_1, \dots, y_i, \dots, x_n)| dy_i \right)^{\frac{1}{n-1}} dx_1 = (*).$$

Weil der erste Term im Integral nicht von x_1 abhängt, kann man schreiben

$$(*) = \left(\int_{\mathbb{R}} |\nabla u(y_1, x_2, \dots, x_n)| dy_1 \right)^{\frac{1}{n-1}} \int_{\mathbb{R}} \prod_{i=2}^n \left(\int_{\mathbb{R}} |\nabla u(x_1, \dots, y_i, \dots, x_n)| dy_i \right)^{\frac{1}{n-1}} dx_1. \quad (9.1)$$

Verwenden wir wiederholt die Hölder-Ungleichung, dann kann man zeigen, dass:

$$\int |a_2|^{\frac{1}{n-1}} \dots |a_n|^{\frac{1}{n-1}} dx \leq \left(\int |a_2| dx \right)^{\frac{1}{n-1}} \dots \left(\int |a_n| dx \right)^{\frac{1}{n-1}}.$$

Diese Version verwenden wir um (9.1) abzuschätzen durch:

$$\begin{aligned} (*) &\leq \left(\int_{\mathbb{R}} |\nabla u(y_1, x_2, \dots, x_n)| dy_1 \right)^{\frac{1}{n-1}} \prod_{i=2}^n \left(\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} |\nabla u(x_1, \dots, y_i, \dots, x_n)| dy_i dx_1 \right)^{\frac{1}{n-1}} \\ &= \left(\int_{\mathbb{R}} |\nabla u| dx_1 \right)^{\frac{1}{n-1}} \prod_{i=2}^n \left(\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} |\nabla u| dx_i dx_1 \right)^{\frac{1}{n-1}}. \end{aligned} \quad (9.2)$$

Als nächsten Schritt integrieren wir nach x_2 und folgern aus (9.2), dass

$$\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} |u|^{\frac{n}{n-1}} dx_1 dx_2 \leq \left(\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} |\nabla u| dx_1 dx_2 \right)^{\frac{2}{n-1}} \prod_{i=3}^n \left(\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} |\nabla u| dx_i dx_1 dx_2 \right)^{\frac{1}{n-1}}. \quad (9.3)$$

Wenn wir nach x_3 integrieren, folgt aus (9.3), dass

$$\begin{aligned} &\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} |u|^{\frac{n}{n-1}} dx_1 dx_2 dx_3 \leq \\ &\leq \left(\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} |\nabla u| dx_1 dx_2 dx_3 \right)^{\frac{3}{n-1}} \prod_{i=4}^n \left(\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} |\nabla u| dx_i dx_1 dx_2 dx_3 \right)^{\frac{1}{n-1}} \end{aligned} \quad (9.4)$$

Wenn wir diese Abschätzungen fortsetzen, finden wir schlussendlich, dass

$$\int_{\mathbb{R}^n} |u|^{\frac{n}{n-1}} dx \leq \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\nabla u| dx \right)^{\frac{n}{n-1}},$$

und damit haben wir das gewünschte Ergebnis im Falle $p = 1$ bekommen.

Für $p \in (1, n)$ geht man wie folgt vor

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^n} |u|^{\frac{np}{n-p}} dx &= \int_{\mathbb{R}^n} \left(|u|^{\frac{(n-1)p}{n-p}} \right)^{\frac{n}{n-1}} dx \leq \left(\int_{\mathbb{R}^n} \left| \nabla \left(|u|^{\frac{(n-1)p}{n-p}} \right) \right| dx \right)^{\frac{n}{n-1}} = \\ &= \left(\frac{(n-1)p}{n-p} \right)^{\frac{n}{n-1}} \left(\int_{\mathbb{R}^n} \left| u|^{\frac{n(p-1)}{n-p}} |\nabla u| dx \right| dx \right)^{\frac{n}{n-1}} \leq \end{aligned} \quad (9.5)$$

Mit der Hölder-Ungleichung folgt

$$\begin{aligned} (9.5) &\leq \left(\frac{(n-1)p}{n-p} \right)^{\frac{n}{n-1}} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |u|^{\frac{n(p-1)}{n-p} \frac{p}{p-1}} dx \right)^{\frac{n}{n-1} \frac{p-1}{p}} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\nabla u|^p dx \right)^{\frac{n}{n-1} \frac{1}{p}} = \\ &= \left(\frac{(n-1)p}{n-p} \right)^{\frac{n}{n-1}} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |u|^{\frac{np}{n-p}} dx \right)^{\frac{n}{p} \frac{p-1}{n-1}} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\nabla u|^p dx \right)^{\frac{n}{n-1} \frac{1}{p}} \end{aligned}$$

und man findet, weil $1 - \frac{n}{p} \frac{p-1}{n-1} = \frac{n-p}{pn} \frac{n}{n-1} > 0$, dass

$$\left(\int_{\mathbb{R}^n} |u|^{\frac{np}{n-p}} dx \right)^{\frac{n-p}{pn} \frac{n}{n-1}} \leq \left(\frac{(n-1)p}{n-p} \right)^{\frac{n}{n-1}} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\nabla u|^p dx \right)^{\frac{n}{n-1} \frac{1}{p}}.$$

Diese Gleichung liefert genau

$$\|u\|_{L^{\frac{np}{n-p}}(\Omega)} \leq \frac{(n-1)p}{n-p} \|\nabla u\|_{L^p(\Omega)}.$$

■

Korollar 9.1.2 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und $\partial\Omega \in C^1$. Sei $p \in [1, n)$. Dann gilt $W^{1,p}(\Omega) \subset L^{\frac{np}{n-p}}(\Omega)$ und es gibt sogar $c = c(n, p, \Omega)$ derartig, dass

$$\|u\|_{L^{\frac{np}{n-p}}(\Omega)} \leq c(n, p, \Omega) \|u\|_{W^{1,p}(\Omega)} \text{ für alle } u \in W^{1,p}(\Omega).$$

Für solche Ω und p gilt also

$$W^{1,p}(\Omega) \hookrightarrow L^{\frac{np}{n-p}}(\Omega).$$

Beweis. Weil Ω beschränkt und $\partial\Omega \in C^1$ gibt es eine Fortsetzung $E^1(u)$ mit

$$E^1(u)|_{\Omega} = u \text{ und } \|E^1(u)\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)} \leq C_E \|u\|_{W^{1,p}(\Omega)}.$$

Als nächstes benutzt man die Glättungsfunktion $\varphi_{1/m}$ und man findet eine Folge

$$u_m := \varphi_{1/m} * E^1(u) \in C^1(\mathbb{R}^n)$$

derartig, dass $u_m \rightarrow E^1(u)$ in $W^{1,p}(\Omega)$. Weil

$$\|u_m - u_k\|_{L^{\frac{np}{n-p}}(\Omega)} \leq c(n, p, \Omega) \|u_m - u_k\|_{W^{1,p}(\Omega)} \rightarrow 0,$$

ist $\{u_m\}_{m=1}^{\infty}$ eine Cauchyfolge in $L^{\frac{np}{n-p}}(\Omega)$ und konvergiert zu einer Funktion v . Weil

$$\begin{aligned} \|u - v\|_{L^p(\Omega)} &\leq \|u - u_m\|_{L^p(\Omega)} + \|u_m - v\|_{L^p(\Omega)} \leq \\ &\leq \|u - u_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} + |\Omega|^{\frac{1}{n}} \|u_m - v\|_{L^{\frac{pn}{n-p}}(\Omega)} \rightarrow 0, \end{aligned}$$

folgt, dass $u - v = 0$ und $u = v \in L^{\frac{pn}{n-p}}(\Omega)$. Weil $u_m \rightarrow E^1(u)$ in $L^{\frac{pn}{n-p}}(\mathbb{R}^n)$ und

$$\begin{aligned} \|u_m\|_{L^{\frac{pn}{n-p}}(\mathbb{R}^n)} &\leq \frac{(n-1)p}{n-p} \|\nabla u_m\|_{L^p(\mathbb{R}^n)} \leq \frac{(n-1)p}{n-p} \|u_m\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)} \leq \\ &\leq \frac{(n-1)p}{n-p} \left(\|u_m - E^1(u)\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)} + \|E^1(u)\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)} \right) \leq \\ &\leq \frac{(n-1)p}{n-p} \left(\|u_m - E^1(u)\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)} + C_E \|u\|_{W^{1,p}(\Omega)} \right) \end{aligned}$$

gilt auch

$$\begin{aligned} \|u\|_{L^{\frac{pn}{n-p}}(\Omega)} &\leq \|u_m - E^1(u)\|_{L^{\frac{pn}{n-p}}(\mathbb{R}^n)} + \|u_m\|_{L^{\frac{pn}{n-p}}(\mathbb{R}^n)} \leq \\ &\leq \|u_m - E^1(u)\|_{L^{\frac{pn}{n-p}}(\mathbb{R}^n)} + \frac{(n-1)p}{n-p} \left(\|u_m - u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)} + C_E \|u\|_{W^{1,p}(\Omega)} \right) \\ &\rightarrow \frac{(n-1)p}{n-p} C_E \|u\|_{W^{1,p}(\Omega)} \text{ für } m \rightarrow \infty, \end{aligned}$$

und die Abschätzung ist bewiesen. ■

Korollar 9.1.3 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und sei $p \in [1, n)$. Dann gilt $W_0^{1,p}(\Omega) \subset L^{\frac{np}{n-p}}(\Omega)$ und es gibt sogar $c = c(n, p, \Omega)$ derartig, dass

$$\|u\|_{L^{\frac{np}{n-p}}(\Omega)} \leq c(n, p, \Omega) \|u\|_{W_0^{1,p}(\Omega)} \text{ für alle } u \in W_0^{1,p}(\Omega).$$

Beweis. Weil $W_0^{1,p}(\Omega) = \overline{C_c^\infty(\Omega)}^{\|\cdot\|_{W_0^{1,p}(\Omega)}}$ gibt es, unabhängig von der Regularität des Randes, eine Folge $u_m \in C_c^\infty(\Omega)$ mit $\|u_m - u\|_{W_0^{1,p}(\Omega)} \rightarrow 0$ für $m \rightarrow \infty$. Man kann diese Funktionen außerhalb Ω durch 0 fortsetzen und verfährt weiter wie oben. ■

9.1.3 Für $p > n$ von $W^{1,p}(\Omega)$ zu $C^{0,\gamma}(\bar{\Omega})$

Theorem 9.1.4 (Morrey's Ungleichung) Sei $n \in \mathbb{N}^+$ und $p \in (n, \infty]$. Dann gibt es $c_{p,n} > 0$ so, dass für alle $u \in C^1(\mathbb{R}^n)$ gilt

$$\|u\|_{C^{0,1-\frac{n}{p}}(\mathbb{R}^n)} \leq c_{p,n} \|u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)}.$$

Beweis. Für $p = \infty$ findet man

$$\|u\|_{C^{0,1-\frac{n}{p}}(\mathbb{R}^n)} = \|u\|_{C^{0,1}(\mathbb{R}^n)} = \|u\|_{L^\infty(\mathbb{R}^n)} + \sup_{x \neq y \in \mathbb{R}^n} \frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|}.$$

Setzt man $z = x - y$ und $v(t) = u(x + tz)$, so findet man für ein $t \in (0, 1)$, dass

$$u(x) - u(y) = v(1) - v(0) = v'(t) = (x - y) \cdot \nabla u(x + tz).$$

Dies bedeutet, dass

$$\sup_{x \neq y \in \mathbb{R}^n} \frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|} \leq \|\nabla u\|_{L^\infty(\mathbb{R}^n)}$$

und das Ergebnis ist bewiesen.

Für $p < \infty$ fängt man an eine solche Abschätzung auf einer Kugel $B_r(0)$ zu beweisen. Wie im Beweis von Theorem 9.1.1 ist der erste Schritt eine passende Beziehung zwischen u und ∇u herzustellen. Für $x \in \partial B_s(0)$ hat man

$$|u(x) - u(0)| = \left| \int_{t=0}^1 \frac{\partial}{\partial t} (u(tx)) \, dt \right| = \left| \int_{t=0}^1 x \cdot (\nabla u)(tx) \, dt \right| \leq s \int_{t=0}^1 |\nabla u(tx)| \, dt$$

und so auch

$$\int_{\partial B_s(0)} |u(x) - u(0)| \, d\sigma_x \leq s \int_{\partial B_s(0)} \int_{t=0}^1 |\nabla u(tx)| \, dt \, d\sigma_x = \quad (9.6)$$

Wir substituieren $\omega = \frac{x}{|x|} = \frac{x}{s}$ und $\rho = |tx| = ts$ und finden

$$\begin{aligned} (9.6) &= s \int_{|\omega|=1} \int_{\rho=0}^s |\nabla u(\rho\omega)| \frac{1}{s} d\rho s^{n-1} d\omega \\ &= s^{n-1} \int_{|\omega|=1} \int_{\rho=0}^s (|\nabla u(\rho\omega)| |\rho\omega|^{1-n}) \rho^{n-1} d\rho d\omega = \\ &= s^{n-1} \int_{B_s(0)} (|\nabla u(y)| |y|^{1-n}) \, dy \leq s^{n-1} \int_{B_r(0)} |\nabla u(y)| |y|^{1-n} \, dy. \end{aligned}$$

Wir schreiben $\omega_n = \int_{\partial B_1(0)} 1 d\sigma$. Es folgt

$$|\partial B_r(0)| = \int_{\partial B_r(0)} 1 d\sigma = \omega_n r^{n-1} \text{ und } |B_r(0)| = \int_{B_1(0)} 1 dx = \frac{\omega_n}{n} r^n.$$

Das Integrieren mit s von 0 bis r liefert uns:

$$\begin{aligned} \int_{B_r(0)} |u(x) - u(0)| dx &\leq \left(\int_{B_r(0)} |\nabla u(y)| |y|^{1-n} dy \right) \left(\int_0^r s^{n-1} ds \right) = \\ &= \frac{r^n}{n} \int_{B_r(0)} |\nabla u(y)| |y|^{1-n} dy \leq \\ &\leq \frac{r^n}{n} \left(\int_{B_r(0)} |y|^{(1-n)\frac{p}{p-1}} dy \right)^{\frac{p-1}{p}} \left(\int_{B_r(0)} |\nabla u(y)|^p dy \right)^{\frac{1}{p}} = \\ &= \frac{r^n}{n} \left(\omega_n \int_0^r s^{-\frac{n-1}{p-1}} ds \right)^{\frac{p-1}{p}} \left(\int_{B_r(0)} |\nabla u(y)|^p dy \right)^{\frac{1}{p}} = \\ &= \frac{\omega_n^{1-\frac{1}{p}}}{n} \left(\frac{p-1}{p-n} \right)^{1-\frac{1}{p}} r^{n+1-\frac{n}{p}} \|\nabla u\|_{L^p(B_r(0))}. \end{aligned}$$

So finden wir für eine Abschätzung für $|u(y)|$, nämlich dass

$$\begin{aligned} |B_r(0)| |u(0)| &\leq \int_{B_r(0)} |u(x)| dx + \int_{B_r(0)} |u(x) - u(0)| dx \leq \\ &\leq |B_r(0)|^{1-1/p} \|u\|_{L^p(B_r(0))} + \frac{\omega_n^{1-1/p}}{n} \left(\frac{p-1}{p-n} \right)^{1-\frac{1}{p}} r^{n+1-\frac{n}{p}} \|\nabla u\|_{L^p(B_r(0))}, \end{aligned}$$

und wir folgern, dass für $r = 1$ und $0 = y$ und sogar für beliebige $y \in \mathbb{R}^n$, folgendes gilt:

$$\begin{aligned} |u(y)| &\leq c_{n,p} \left(\|u\|_{L^p(B_1(0))} + \|\nabla u\|_{L^p(B_1(0))} \right) \leq \\ &\leq c_{n,p} \left(\|u\|_{L^p(\mathbb{R}^n)} + \|\nabla u\|_{L^p(\mathbb{R}^n)} \right) \leq \tilde{c}_{n,p} \|u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)} \end{aligned}$$

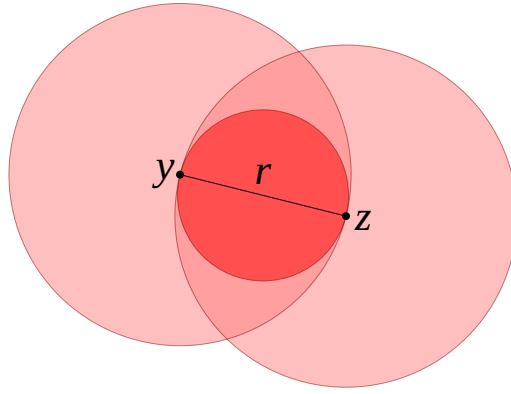
Wenn man anschließend das Supremum nimmt, findet man

$$\|u\|_{\infty} \leq \tilde{c}_{n,p} \|u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)}. \quad (9.7)$$

Für den zweiten Term in den Norm müssen wir $\frac{|u(y)-u(z)|}{|y-z|^\gamma}$ abschätzen. Sei nun $y, z \in \mathbb{R}^n$ mit $z \neq y$ und setze $r = |y - z|$. Siehe Abbildung 9.1.

Weil $B_{r/2}(\frac{1}{2}(y+z)) \subset B_r(y) \cap B_r(z)$ finden wir, dass

$$\begin{aligned} |B_{r/2}(0)| |u(y) - u(z)| &= \int_{B_{r/2}(\frac{1}{2}(y+z))} |u(y) - u(z)| dx \leq \\ &\leq \int_{B_{r/2}(\frac{1}{2}(y+z))} |u(y) - u(x)| dx + \int_{B_{r/2}(\frac{1}{2}(y+z))} |u(x) - u(z)| dx \leq \\ &\leq \int_{B_r(y)} |u(x) - u(y)| dx + \int_{B_r(z)} |u(x) - u(z)| dx \leq \\ &\leq \frac{\omega_n^{1-1/p}}{n} \left(\frac{p-1}{p-n} \right)^{1-\frac{1}{p}} r^{n+1-\frac{n}{p}} \left(\|\nabla u\|_{L^p(B_r(y))} + \|\nabla u\|_{L^p(B_r(z))} \right) \leq \\ &\leq 2 \frac{\omega_n^{1-1/p}}{n} \left(\frac{p-1}{p-n} \right)^{1-\frac{1}{p}} r^{n+1-\frac{n}{p}} \|\nabla u\|_{L^p(B_r(y) \cup B_r(z))}, \end{aligned}$$

Abbildung 9.1: y und z und die Kugeln

und mit $|B_{r/2}(0)| = \omega_n \left(\frac{1}{2}r\right)^{n-1}$ folgt

$$\frac{|u(y) - u(z)|}{|y - z|^{1-\frac{n}{p}}} \leq \hat{c}_{n,p} \|\nabla u\|_{L^p(\mathbb{R}^n)}. \quad (9.8)$$

Wenn wir in (9.8) das Supremum für $y \neq z \in \mathbb{R}^n$ nehmen, gibt dies uns die passende Abschätzung:

$$[u]_{1-\frac{n}{p}} \leq \hat{c}_{n,p} \|u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)}. \quad (9.9)$$

Kombiniert man (9.7) und (9.9), dann folgt:

$$\|u\|_{C^{0,1-\frac{n}{p}}(\mathbb{R}^n)} = \|u\|_{\infty} + [u]_{1-\frac{n}{p}} \leq C_{n,p} \|u\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)}.$$

■

Korollar 9.1.5 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und $\partial\Omega \in C^1$. Nehme an $u \in W^{1,p}(\Omega)$ mit $p \in (n, \infty]$. Dann gilt $u \in C^{0,1-\frac{n}{p}}(\bar{\Omega})$ und es gibt $c = c(n, p, \Omega)$ derartig, dass

$$\|u\|_{C^{0,1-\frac{n}{p}}(\bar{\Omega})} \leq c(n, p, \Omega) \|u\|_{W^{1,p}(\Omega)}.$$

Also gilt

$$W^{1,p}(\Omega) \hookrightarrow C^{0,1-\frac{n}{p}}(\bar{\Omega}).$$

Beweis. Man nehme wieder die Fortsetzung $E^1(u)$ und man findet

$$u_m := \varphi_{1/m} * E^1(u) \rightarrow E^1(u) \text{ in } W^{1,p}(\mathbb{R}^n).$$

Wegen dieser Abschätzung folgt

$$\|u_m - u_k\|_{C^{0,1-\frac{n}{p}}(\bar{\Omega})} \leq C \|u_m - u_k\|_{W^{1,p}(\mathbb{R}^n)}$$

und dass $\{u_m\}_{m=1}^{\infty}$ eine Cauchyfolge in $C^{0,1-\frac{n}{p}}(\bar{\Omega})$ bildet. So hat $\{u_m\}_{m=1}^{\infty}$ einen Limes $v \in C^{0,1-\frac{n}{p}}(\bar{\Omega})$. Weiter geht man ähnlich vor wie in dem Beweis von Korollar 9.1.2 mit nur einer Ausnahme, nämlich $u = v$ f.ü. Man findet ja eigentlich nur, dass u einen $C^{0,1-\frac{n}{p}}(\bar{\Omega})$ -Vertreter hat. ■

Variationsrechnung

Kapitel 10



Funktionenräume und ihr Zusammenhang II

10.1 Morrey, Gagliardo, Sobolev und Nirenberg

Wir können die beiden Hauptergebnisse aus dem letzten Kapitel kombinieren um weitere Einbettungssätze zu formulieren.

Definition 10.1.1 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und sei X ein Hölder- oder Sobolev-Raum auf Ω . Wir definieren den Regularitätsindex $N(X)$ wie folgt:

- Für $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})$ mit $k \in \mathbb{N}$ und $\gamma \in [0, 1]$ setzen wir

$$N(C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})) = (k, k + \gamma).$$

- Für $W^{k,p}(\Omega)$ mit $k \in \mathbb{N}$ und $p \in [1, \infty]$ setzen wir

$$N(W^{k,p}(\Omega)) = (k, k - n/p).$$

- Wir schreiben $N(X) \gneq N(Y)$, wenn $N(X)_1 \geq N(Y)_1$ und $N(X)_2 > N(Y)_2$.

Theorem 10.1.2 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet mit $\partial\Omega \in C^1$. Seien X und Y Hölder- oder Sobolev-Räume wie in Definition 10.1.1. Dann gilt folgendes:

$$N(X) \gneq N(Y) \Rightarrow X \hookrightarrow Y.$$

Bemerkung 10.1.3 Meistens braucht man für $X \hookrightarrow Y$ nur $N(X) \geq N(Y)$. Es gibt jedoch einige Ausnahmen:

- Für $p = n \neq 1$ gibt es keine Einbettung von $W^{k,n}(\Omega)$ nach $W^{k-1,\infty}(\Omega)$.

Bemerke, dass

$$N(W^{k,n}(\Omega)) = (k, k - 1) \geq (k - 1, k - 1) = N(W^{k-1,\infty}(\Omega)).$$

Für eine komplette Übersicht zu diesen Einbettungen verweisen wir auf dem Buch von Adams und Fournier, [1, Theorem 4.12].

Übrigens gilt $W^{k-1,\infty}(\Omega) = C^{k-1,1}(\bar{\Omega})$ im Sinne, dass jede Funktion in $W^{k-1,\infty}(\Omega)$ einen Vertreter in $C^{k-1,1}(\bar{\Omega})$ hat.

Bemerkung 10.1.4 Man kann auch zeigen, dass $X \hookrightarrow Y \Rightarrow N(X) \geq N(Y)$.

Bemerkung 10.1.5 Im folgenden Beweis werden Korollar 9.1.2 und Korollar 9.1.5 öfters verwendet, und das gelingt nur, wenn man auch in den Zwischenschritten nicht einen der in Bemerkung 10.1.3 genannten Fälle begegnet.

Beweis. Wir müssen 4 Fälle unterscheiden.

1) Wenn $X = C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})$ und $Y = W^{\ell,q}(\Omega)$, dann folgt aus $N(X) \geq N(Y)$, dass $k \geq \ell$. Die Einbettung folgt sofort.

2) Wenn $X = W^{k,p}(\Omega)$ und $Y = W^{\ell,q}(\Omega)$, dann bedeutet $N(X) \geq N(Y)$, dass

$$k \geq \ell \text{ und } k - \frac{n}{p} > \ell - \frac{n}{q}. \quad (10.1)$$

Für $k = \ell$ folgt $p > q$ und das Ergebnis folgt aus $\|u\|_{L^q(\Omega)} \leq |\Omega|^{\frac{1}{q} - \frac{1}{p}} \|u\|_{L^p(\Omega)}$.

Für $k > \ell$ nehmen wir erst an, dass $\frac{n}{p} \notin \mathbb{N}$ und wir setzen $m = \left\lfloor \frac{n}{p} \right\rfloor$. Wenn $k \leq m + \ell$ gilt, findet man durch wiederholte Anwendung von Korollar 9.1.2, dass

$$W^{k,p}(\Omega) \hookrightarrow W^{k-1, \frac{np}{n-p}}(\Omega) \hookrightarrow W^{k-2, \frac{np}{n-2p}}(\Omega) \hookrightarrow \dots \hookrightarrow W^{\ell, \frac{np}{n-(k-\ell)p}}(\Omega) \quad (10.2)$$

und die Bedingung in (10.1) liefert $W^{\ell, \frac{np}{n-(k-\ell)p}}(\Omega) \hookrightarrow W^{\ell,q}(\Omega)$. Wenn $k > m + \ell$ gilt, findet man:

$$W^{k,p}(\Omega) \hookrightarrow W^{k-1, \frac{np}{n-p}}(\Omega) \hookrightarrow W^{k-2, \frac{np}{n-2p}}(\Omega) \hookrightarrow \dots \hookrightarrow W^{k-m, \frac{np}{n-mp}}(\Omega) \quad (10.3)$$

und mit Korollar 9.1.5 dass

$$W^{k-m, \frac{np}{n-mp}}(\Omega) \hookrightarrow C^{k-m-1, 1-\frac{n-mp}{p}}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow C^{\ell, 1-\frac{n-mp}{p}}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow W^{\ell,q}(\Omega). \quad (10.4)$$

Wenn $\frac{n}{p} \in \mathbb{N}$, dann fangen wir an mit $W^{k,p}(\Omega) \hookrightarrow W^{k,p-\varepsilon}(\Omega)$ für $\varepsilon > 0$ aber genügend klein und benutzen den Spielraum, den wir durch die Ungleichung in (10.1) haben.

3) Wenn $X = C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})$ und $Y = C^{\ell,\delta}(\bar{\Omega})$, dann bedeutet $N(X) \geq N(Y)$, dass entweder $k > \ell$ oder $k = \ell$ mit $\gamma > \delta$. Wenn $\partial\Omega \in C^{0,1}$, dann gibt es eine Konstante c_Ω so, dass es für jedes Paar Punkte $x, y \in \bar{\Omega}$ eine glatte Kurve $k : [0, 1] \rightarrow \Omega$ mit $k(0) = x$ und $k(1) = y$ gibt mit

$$|x - y| \leq \ell_{x,y} := \int_0^1 |k'(t)| dt \leq c_\Omega |x - y|.$$

Wenn man diese Kurve nach Bogenlänge umparametrisiert und dann den Mittelwertsatz anwendet, gibt es $s \in (0, \ell_{x,y})$ derart, dass

$$\begin{aligned} |u(x) - u(y)| &= |u(k(\ell_{x,y})) - u(k(0))| = \left| \ell_{x,y} \frac{d}{dt} u(k(t)) \Big|_{t=s} \right| = \\ &= \ell_{x,y} |\nabla u(k(s)) \cdot k'(s)| \leq \ell_{x,y} |\nabla u(k(s))| \leq c_\Omega |x - y| |\nabla u(k(s))|. \end{aligned}$$

Es folgt, dass

$$\frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|} \leq c_\Omega \|\nabla u\|_{L^\infty(\Omega)}.$$

Weil auch folgendes gilt für $0 \leq \gamma < \delta \leq 1$,

$$\frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\gamma} \leq \frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\delta} \sup_{a,b \in \Omega} |a - b|^{\delta-\gamma},$$

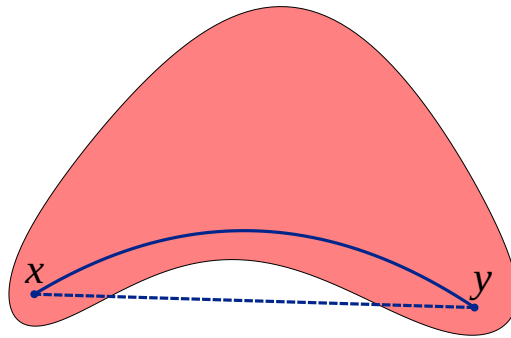


Abbildung 10.1: Bei nicht-konvexen Gebieten muss man mal einen Umweg nehmen. Wenn Ω ein beschränktes Gebiet ist, also offen und zusammenhängend, und wenn $\partial\Omega \in C^{0,1}$ gilt, dann gilt für den Umweg $\ell_{x,y} \leq c_\Omega |x - y|$.

findet man die betreffende Einbettungen.

4) Wenn $X = W^{k,p}(\Omega)$ und $Y = C^{\ell,\gamma}(\bar{\Omega})$, dann bedeutet $N(X) \succeq N(Y)$, dass

$$k - \frac{n}{p} > \ell + \gamma \quad (10.5)$$

und es folgt, dass

$$k - \left\lfloor \frac{n}{p} \right\rfloor > \ell.$$

Wiederum mit $m = \left\lfloor \frac{n}{p} \right\rfloor$ und $\frac{n}{p} \notin \mathbb{N}$, finden wir wie in (10.3) und (10.4), dass

$$W^{k,p}(\Omega) \hookrightarrow C^{k-m-1, 1-\frac{n-mp}{p}}(\bar{\Omega}).$$

Wenn $k - m - 1 = \ell$, dann sind wir fertig weil (10.5) liefert, dass

$$\gamma < 1 - \frac{n-mp}{p}.$$

Wenn $k - m - 1 > \ell$, dann sind wir fertig mit Hilfe des dritten Abschnitts. Auch hier können wir im Falle, dass $\frac{n}{p} \in \mathbb{N}$ gilt, einen ε -Spielraum einbauen. ■

10.2 Altes und Neues zur Stetigkeit

Bevor wir uns mit der Kompaktheit beschäftigen, wiederholen und erweitern wir mal kurz einige der verschiedenen Sorten von Stetigkeit.

Definition 10.2.1 Seien X und V normierte Vektorräume.

1. Die Funktion $f : X \rightarrow V$ heißt stetig in $x \in X$, wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \quad \forall y \in X : \|x - y\|_X < \delta \Rightarrow \|f(x) - f(y)\| < \varepsilon.$$

2. Die Funktion $f : X \rightarrow V$ heißt stetig, wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \forall x \in X \quad \exists \delta > 0 \quad \forall y \in X : \|x - y\|_X < \delta \Rightarrow \|f(x) - f(y)\| < \varepsilon.$$

3. Die Funktion $f : X \rightarrow V$ heißt *gleichmäßig stetig*,¹ wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in X \forall y \in X : \|x - y\|_X < \delta \Rightarrow \|f(x) - f(y)\| < \varepsilon.$$

Für die Gleichmäßigkeit bezüglich einer Indexmenge verwendet man *gleichgradig*:

1. Die Funktionenmenge $\{f_i : X \rightarrow V\}_{i \in I}$ heißt *gleichgradig stetig*² in $x \in X$, wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall i \in I \forall y \in X : \|x - y\|_X < \delta \Rightarrow \|f_i(x) - f_i(y)\| < \varepsilon.$$

2. Die Funktionenmenge $\{f_i : X \rightarrow V\}_{i \in I}$ heißt *gleichgradig stetig*, wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \forall x \in X \exists \delta > 0 \forall i \in I \forall y \in X : \|x - y\|_X < \delta \Rightarrow \|f_i(x) - f_i(y)\| < \varepsilon.$$

3. Die Funktionenmenge $\{f_i : X \rightarrow V\}_{i \in I}$ heißt *gleichmäßig gleichgradig stetig*, wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \forall x \in X \forall i \in I \exists \delta > 0 \forall y \in X : \|x - y\|_X < \delta \Rightarrow \|f_i(x) - f_i(y)\| < \varepsilon.$$

Für $V = \mathbb{R}$ gibt es auch noch *halbstetige*³ Funktionen:

Definition 10.2.2 Sei X ein normierter Vektorraum.

1. Die Funktion $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *unterhalbstetig*,⁴ wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \forall x \in X \exists \delta > 0 \forall y \in X : \|x - y\|_X < \delta \Rightarrow f(y) > f(x) - \varepsilon.$$

2. Die Funktion $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *oberhalbstetig*,⁵ wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \forall x \in X \exists \delta > 0 \forall y \in X : \|x - y\|_X < \delta \Rightarrow f(y) < f(x) + \varepsilon.$$

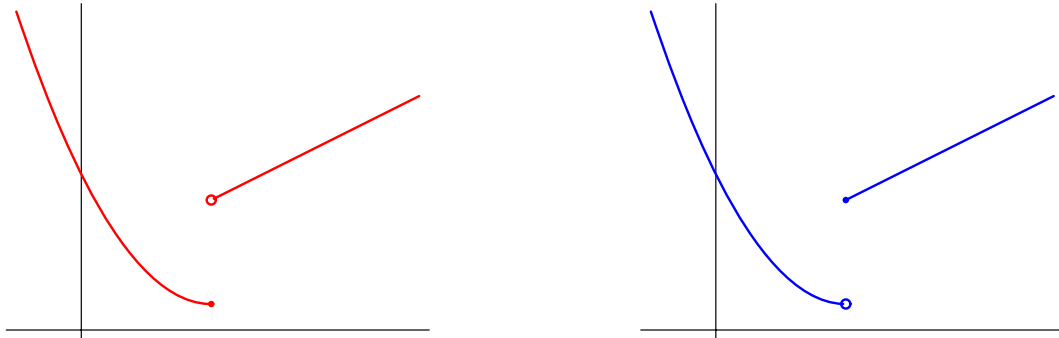


Abbildung 10.2: Unterhalbstetig und oberhalbstetig

Aufgabe 30 Stetigkeit und Halbستetigkeit sind auch mit Hilfe von Folgen zu definieren. Zum Beispiel kann man auch sagen, dass f *unterhalbfolgenstetig* in $x \in X$ ist, wenn für jede Folge $\{x_k\}_{k=1}^{\infty} \subset X$ mit $\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = x$ gilt $\liminf_{k \rightarrow \infty} f(x_k) \geq f(x)$. Zeige (unterhalb)stetig und (unterhalb)folgenstetig sind äquivalente Definitionen.

¹gleichmäßig stetig = *uniformly continuous*

²gleichgradig stetig = *equicontinuous*

³halbستetig = *semicontinuous*

⁴unterhalbستetig = *lower semicontinuous*

⁵oberhalbستetig = *upper semicontinuous*

Schlussendlich folgt dann noch schwache Folgenstetigkeit.

Definition 10.2.3 Sei X ein normierter Vektorraum.

1. Die Funktion $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt schwach folgenstetig in $x \in X$, wenn für jede Folge $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset X$ mit $x_k \rightharpoonup x$ in X gilt, dass $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_k) = f(x)$.
2. Die Funktion $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt schwach unterhalbfolgenstetig⁶ in $x \in X$, wenn für jede Folge $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset X$ mit $x_k \rightharpoonup x$ in X gilt, dass $\liminf_{k \rightarrow \infty} f(x_k) \geq f(x)$.

Vielleicht tönt diese letzte Definition wie die marode Macke eines masochistischen Mathematikers, aber es wird sich zeigen, dass genau diese Definition eine wichtige Rolle spielt in der Variationsrechnung.

Bemerkung 10.2.4 Übrigens ist schwach folgenstetig stärker als folgenstetig, denn es gibt im Allgemeinen mehr Folgen $\{x_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ mit $x_k \rightharpoonup x$, als Folgen mit $x_k \rightarrow x$. Denn, wenn ich schwach bin, so bin ich stark (2. Korinther 12-10).

10.3 Kompakte Abbildungen

Eine Teilmenge K von einem topologischen Vektorraum X heißt kompakt, wenn für jede Überdeckung von K mit offenen Mengen $\{\mathcal{O}_i\}_{i \in I}$ endlich viele dieser offenen Mengen schon reichen, um K zu überdecken. Für einen normierten Vektorraum ist die folgende Definition oft bequemer.

Definition 10.3.1 Sei X ein normierter Vektorraum. Die Teilmenge K heißt kompakt, wenn jede Folge in K einen Häufungswert in K hat, oder noch anders gesagt, wenn jede Folge in K eine konvergente Teilfolge hat mit Limes in K .

Bemerkung 10.3.2 Die Teilmenge M heißt präkompakt, wenn jede Folge in M eine konvergente Teilfolge hat. Anders gesagt, wenn $\overline{M}$ kompakt ist.

Aufgabe 31 Kompaktheit in der hier stehenden Definition heißt eigentlich folgenkompakt⁷. Für einen normierten Raum ist folgenkompakt äquivalent mit kompakt.

Definition 10.3.3 Seien X und Y Banachräume.

1. Die Funktion $f : X \rightarrow Y$ heißt kompakt⁸, wenn für jede beschränkte Menge A gilt, dass $\overline{f(A)}$ kompakt ist.
2. Die Funktion $f : X \rightarrow Y$ heißt vollstetig⁹, wenn f stetig und kompakt ist.

Aufgabe 32 Zeigen Sie, dass eine kompakte lineare Funktion vollstetig ist.

⁶schwach unterhalbfolgenstetig = weakly sequentially lower semicontinuous

⁷folgenkompakt = sequentially compact

⁸kompakt = compact

⁹vollstetig = completely continuous

10.4 Kompakte Einbettungen

Theorem 10.4.1 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt $\partial\Omega \in C^1$. Seien $k, \ell \in \mathbb{N}$ und $\gamma, \delta \in [0, 1]$. Wenn $k + \gamma > \ell + \delta$, dann ist $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow C^{\ell,\delta}(\bar{\Omega})$ kompakt.

Beweis. Es reicht, wenn wir zeigen, dass $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow C^{k,0}(\bar{\Omega})$ kompakt ist für $\gamma > 0$ und dass $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow C^{k,\delta}(\bar{\Omega})$ kompakt ist für $\gamma > \delta$.

Wenn wir eine beschränkte Menge A in $C^{0,\gamma}(\bar{\Omega})$ nehmen, sagen wir

$$\sup_{f \in A} \|f\|_{C^{0,\gamma}(\bar{\Omega})} \leq M,$$

dann gilt für alle $f \in A$, dass

$$|f(x) - f(y)| \leq M |x - y|^\gamma.$$

Dann sind die Funktionen aus A gleichmäßig beschränkt und gleichmäßig gleichgradig stetig. Aus dem Satz von Arzela-Ascoli (Siehe Theorem C.5) folgt, dass jede Folge in A eine in $C(\bar{\Omega})$ konvergente Teilfolge hat, die sogar gleichmäßig konvergiert. Das heißt, dass A präkompakt in $C(\bar{\Omega})$ ist.

Für $k > 0$ und für A eine durch M beschränkte Menge in $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})$ finden wir für jede Folge $\{f_j\}_{j \in \mathbb{N}}$, dass die eine in $C(\bar{\Omega})$ konvergente Teilfolge hat. Für diese Teilfolge gibt es eine weitere Teilfolge derart, dass $\{\partial_1 f_{j_m}\}_{m \in \mathbb{N}}$ in $C(\bar{\Omega})$ konvergiert usw. Wir finden so eine Teilfolge, wiederum $\{\partial^\alpha f_{j_m}\}_{m \in \mathbb{N}}$ genannt, die für jedes $\alpha \in \mathbb{N}^n$ mit $|\alpha| \leq k$ in $C(\bar{\Omega})$ konvergiert. Die gleichmäßige Konvergenz zeigt uns sogar, dass

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \partial^\alpha f_{j_m} = \partial^\alpha \left(\lim_{m \rightarrow \infty} f_{j_m} \right).$$

Dann gilt $f := \lim_{m \rightarrow \infty} f_{j_m} \in C^k(\bar{\Omega})$ und es folgt, dass A präkompakt ist in $C^k(\bar{\Omega})$.

Für $C^{k,\gamma}(\bar{\Omega}) \hookrightarrow C^{k,\delta}(\bar{\Omega})$ reicht dies noch nicht. Es reicht aber wenn wir zeigen können, dass $\{f_{j_m}\}_{m \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge ist in $C^{k,\delta}(\bar{\Omega})$. Und dafür reicht es, wenn wir zeigen, dass für $\alpha \in \mathbb{N}^n$ mit $|\alpha| \leq k$

$$[\partial^\alpha f_{j_m} - \partial^\alpha f_{j_\ell}]_\delta = \sup_{x,y \in \bar{\Omega}} \frac{|\partial^\alpha (f_{j_m}(x) - f_{j_\ell}(x)) - \partial^\alpha (f_{j_m}(y) - f_{j_\ell}(y))|}{|x - y|^\delta}$$

nach 0 konvergiert für $k, \ell \rightarrow \infty$. Für $u \in C^{0,\gamma}(\bar{\Omega})$ und $\delta \in (0, \gamma)$ gilt

$$\begin{aligned} \frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\delta} &= \left(\frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\gamma} \right)^{\delta/\gamma} |u(x) - u(y)|^{1-\delta/\gamma} \\ &\leq \left(\frac{|u(x) - u(y)|}{|x - y|^\gamma} \right)^{\delta/\gamma} (|u(x)| + |u(y)|)^{1-\delta/\gamma}, \end{aligned}$$

und wir finden

$$[u]_\delta \leq [u]_\gamma^{\delta/\gamma} (2 \|u\|_\infty)^{1-\delta/\gamma}.$$

Für $\{f_j\}_{j \in \mathbb{N}} \subset A$ gilt $\|f_i - f_j\|_{C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})} \leq 2M$ und es folgt für die in $C^k(\bar{\Omega})$ konvergierende Teilfolge $\{f_{j_m}\}_{m \in \mathbb{N}}$, dass

$$[\partial^\alpha f_{j_m} - \partial^\alpha f_{j_\ell}]_\delta \leq (2M)^{\delta/\gamma} \left(2 \|f_{j_m} - f_{j_\ell}\|_{C^k(\bar{\Omega})} \right)^{1-\delta/\gamma}.$$

Das bedeutet, diese Teilfolge ist auch eine Cauchy-Folge in $C^{k,\delta}(\bar{\Omega})$ und weil $C^{k,\delta}(\bar{\Omega})$ vollständig ist, konvergiert diese Teilfolge in $C^{k,\delta}(\bar{\Omega})$. ■

Theorem 10.4.2 (Rellich-Kondrachov) Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt und $\partial\Omega \in C^1$.

- Wenn $p < n$ und $q < \frac{np}{n-p}$ gilt, dann ist die Einbettung $W^{1,p}(\Omega) \hookrightarrow L^q(\Omega)$ kompakt.
- Wenn $p > n$ und $\gamma < 1 - \frac{n}{p}$ gilt, dann ist die Einbettung $W^{1,p}(\Omega) \hookrightarrow C^{0,\gamma}(\overline{\Omega})$ kompakt.

Bemerkung 10.4.3 Ähnliches gilt auch für Hölder- und Sobolev-Räume höherer Ordnung. Wenn X, Y aus den Klassen der Hölder-Räume $C^{k,\delta}(\overline{\Omega})$ und Sobolev-Räume $W^{k,p}(\Omega)$ genommen werden mit $N(X) \geq N(Y)$, dann ist die Einbettung $X \hookrightarrow Y$ kompakt. Weiter kann man zeigen, dass wenn die Einbettung $X \hookrightarrow Y$ existiert und $N(X)_2 = N(Y)_2$, diese Einbettung nicht kompakt ist.

Beweis. Wir werden anfangen mit der zweiten Aussage. Weil $\gamma < 1 - \frac{n}{p}$ gilt, gibt es $\delta \in \left(\gamma, 1 - \frac{n}{p}\right)$. Theorem 10.4.1 sagt aus, dass $C^{0,\delta}(\overline{\Omega}) \hookrightarrow C^{0,\gamma}(\overline{\Omega})$ kompakt ist. Wegen Korollar 9.1.5 gilt $W^{1,p}(\Omega) \hookrightarrow C^{0,\delta}(\overline{\Omega})$ und das Ergebnis folgt, wenn wir beides kombinieren.

Die erste Aussage ist wesentlich schwieriger zu beweisen. Sei $\{f_m\}_{m \in \mathbb{N}}$ eine beschränkte Folge in $W^{1,p}(\Omega)$, sagen wir $\|f_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} \leq M$. Weil $\partial\Omega \in C^1$ angenommen worden ist, können wir diese Funktionen fortsetzen zu $Ef_m \in W^{1,p}(\mathbb{R}^n)$ und wir dürfen annehmen, dass $\text{support}(Ef_m) \subset V$ für ein beschränktes Gebiet V , das Ω enthält. Wir glätten diese Ef_m mit dem Friedrichschen Glätter und definieren

$$f_m^\varepsilon := \varphi_\varepsilon * Ef_m.$$

Wir wissen, dass $\|f_m^\varepsilon - Ef_m\|_{L^q(V)} \rightarrow 0$ für $\varepsilon \downarrow 0$ aber möchten noch zeigen, dass die Konvergenz gleichmäßig bezüglich m ist. Für $v \in C^1(\mathbb{R}^n)$ mit $\text{support}(v) \subset \tilde{V}$ mit $V \subset\subset \tilde{V}$ gilt

$$\begin{aligned} v^\varepsilon(x) - v(x) &= \int_{B_\varepsilon(0)} \varphi_\varepsilon(z) (v(x+z) - v(x)) dz = \\ &= \int_{B_\varepsilon(0)} \varphi_\varepsilon(z) \int_{t=0}^1 \left(\frac{d}{dt} v(x+tz) \right) dt dz = \\ &= \int_{B_\varepsilon(0)} \varphi_\varepsilon(z) \int_{t=0}^1 (\nabla v(x+tz) \cdot z) dt dz \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \int_{\tilde{V}} |v^\varepsilon(x) - v(x)| dx &\leq \int_{\mathbb{R}^n} \int_{B_\varepsilon(0)} \varphi_\varepsilon(z) \int_{t=0}^1 \varepsilon |\nabla v(x+tz)| dt dz dx \\ &= \int_{B_\varepsilon(0)} \varphi_\varepsilon(z) \int_{t=0}^1 \varepsilon \int_{\mathbb{R}^n} |\nabla v(x+tz)| dx dt dz \\ &= \varepsilon \int_{\mathbb{R}^n} |\nabla v(x)| dx = \varepsilon \int_{\tilde{V}} |\nabla v(x)| dx \leq \varepsilon |\tilde{V}|^{1-\frac{1}{p}} \left(\int_{\tilde{V}} |\nabla v(x)|^p dx \right)^{1/p}. \end{aligned}$$

Weil man $Ef_m \in W^{1,p}(V)$ durch v wie oben approximieren kann, gilt auch

$$\|f_m^\varepsilon - Ef_m\|_{L^1(V)} \leq c\varepsilon \|Ef_m\|_{W^{1,p}(V)} \leq \tilde{c}\varepsilon \|f_m\|_{W^{1,p}(\Omega)}$$

mit $\tilde{c}$ unabhängig von m . Außerdem gilt für $p^* = \frac{np}{n-p}$ und $\frac{1}{q} = \frac{\theta}{1} + \frac{1-\theta}{p^*}$ für ein $\theta \in (0, 1)$, dass

$$\|u\|_{L^q(V)} \leq \|u\|_{L^1(V)}^\theta \|u\|_{L^{p^*}(V)}^{1-\theta}. \quad (10.6)$$

In Theorem 6.3.5 haben wir gesehen, dass $\|f_m^\varepsilon\|_{L^1(V)} \leq \|Ef_m\|_{L^1(V)}$. So finden wir mit der Gagliardo-Nirenberg-Sobolev Ungleichung, dass

$$\begin{aligned} \|f_m^\varepsilon - Ef_m\|_{L^q(V)} &\leq \|f_m^\varepsilon - Ef_m\|_{L^1(V)}^\theta \|f_m^\varepsilon - Ef_m\|_{L^{p^*}(V)}^{1-\theta} \\ &\leq \left(\tilde{c}\varepsilon \|f_m\|_{W^{1,p}(\Omega)}\right)^\theta \left(2\|Ef_m\|_{L^{p^*}(V)}\right)^{1-\theta} \leq \\ &\leq C\varepsilon^\theta \|f_m\|_{W^{1,p}(\Omega)} \leq CM\varepsilon^\theta. \end{aligned} \quad (10.7)$$

Als nächsten Schritt möchten wir zeigen, dass für jedes $\varepsilon > 0$ die Funktionen $\{f_m^\varepsilon\}_{m \in \mathbb{N}}$ die Bedingungen von Arzela-Ascoli erfüllen. Die Beschränktheit folgt aus

$$\begin{aligned} |f_m^\varepsilon(x)| &= |(\varphi_\varepsilon * Ef_m)(x)| \leq \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_\varepsilon(x-y) |Ef_m(y)| dy \leq \\ &\leq \|\varphi_\varepsilon\|_{L^\infty(B_\varepsilon(0))} \|Ef_m\|_{L^1(V)} \leq c\varepsilon^{-n} \|f_m\|_{L^1(\Omega)} \leq c_1 M\varepsilon^{-n} \end{aligned}$$

und die gleichgradige Stetigkeit aus

$$\begin{aligned} |\nabla f_m^\varepsilon(x)| &= |(\nabla \varphi_\varepsilon * Ef_m)(x)| \leq \int_{\mathbb{R}^n} |\nabla \varphi_\varepsilon(x-y)| |Ef_m(y)| dy \leq \\ &\leq \|\nabla \varphi_\varepsilon\|_{L^\infty(B_\varepsilon(0))} \|Ef_m\|_{L^1(V)} \leq c\varepsilon^{-n-1} \|f_m\|_{L^1(\Omega)} \leq c_1 M\varepsilon^{-n-1}. \end{aligned}$$

Wegen (10.7) gibt es $\varepsilon_1 > 0$ derart, dass für $\varepsilon \in (0, \varepsilon_1]$ gilt

$$\|f_m^\varepsilon - Ef_m\|_{L^q(V)} < \frac{1}{2}.$$

Mit Arzela-Ascoli gibt es eine Teilfolge $\{f_{m_1,k}^{\varepsilon_1}\}_{k \in \mathbb{N}}$ von $\{f_m^{\varepsilon_1}\}_{m \in \mathbb{N}}$, die gleichmäßig konvergiert in $C(\bar{V})$. Dann gilt insbesondere, dass $\{f_{m_1,k}^{\varepsilon_1}\}_{k \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge in $L^q(V)$ ist.

Wegen (10.7) gibt es $\varepsilon_2 \in (0, \varepsilon_1]$ derart, dass für $\varepsilon \in (0, \varepsilon_2]$ gilt

$$\|f_m^\varepsilon - Ef_m\|_{L^q(V)} < \frac{1}{4}.$$

Mit Arzela-Ascoli gibt es eine Teilfolge $\{f_{m_2,k}^{\varepsilon_2}\}_{k \in \mathbb{N}}$ von $\{f_{m_1,k}^{\varepsilon_2}\}_{k \in \mathbb{N}}$, die gleichmäßig konvergiert in $C(\bar{V})$. Dann gilt insbesondere, dass $\{f_{m_2,k}^{\varepsilon_2}\}_{k \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge in $L^q(V)$ ist.

Dieses Prozedere setzen wir fort.

Wir betrachten nun die Folge $\{f_{m_k,k}\}_{k \in \mathbb{N}}$. Sei $\delta > 0$. Wir nehmen j derart, dass für $\varepsilon \in (0, \varepsilon_j]$ gilt

$$\|f_m^\varepsilon - Ef_m\|_{L^q(V)} < \frac{1}{3}\delta.$$

und finden für $\ell > k$, dass

$$\begin{aligned} \|f_{m_k,k} - f_{m_\ell,\ell}\|_{L^q(\Omega)} &\leq \|Ef_{m_k,k} - Ef_{m_\ell,\ell}\|_{L^q(V)} \leq \\ &\leq \|f_{m_k,k}^{\varepsilon_j} - Ef_{m_k,k}\|_{L^q(V)} + \|f_{m_k,k}^{\varepsilon_j} - f_{m_\ell,\ell}^{\varepsilon_j}\|_{L^q(V)} + \|f_{m_\ell,\ell}^{\varepsilon_j} - Ef_{m_\ell,\ell}\|_{L^q(V)} \leq \\ &\leq \frac{2}{3}\delta + \|f_{m_k,k}^{\varepsilon_j} - f_{m_\ell,\ell}^{\varepsilon_j}\|_{L^q(V)}. \end{aligned}$$

Weil $\{f_{m_{j,k}}^{\varepsilon_j}\}_{k \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge in $L^q(V)$ ist, und $\{f_{m_{k,k}}^{\varepsilon_j}\}_{k \geq j}$ eine Teilfolge ist, kann man zeigen, dass es k_j gibt derart, dass für $k, \ell \geq j$ gilt $\|f_{m_{k,k}}^{\varepsilon_j} - f_{m_{\ell,\ell}}^{\varepsilon_j}\|_{L^q(V)} < \frac{1}{3}\delta$. Weil wir dies für jedes $\delta > 0$ zeigen können, folgt, dass $\{f_{m_{k,k}}\}_{k \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge ist in $L^q(\Omega)$. ■

Variationsrechnung

Kapitel 11



Die direkten Methoden

11.1 Drei Hauptbestandteile

11.1.1 Koerzitiv, reflexiv und schwach unterhalbstetig

Um die Existenz eines Minimums für das Funktional J im Banachraum X zu beweisen, benutzt man oft die folgenden drei Bestandteile.

- **Koerzitivität:**¹

Nehmen wir an, dass J wohldefiniert ist auf X und eine untere Schranke hat. Damit gibt es ein Infimum von J auf X und wenn es ein Infimum gibt, dann gibt es eine Minimalfolge. Eine Folge $\{u_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset X$ heißt Minimalfolge, wenn

$$\lim_{k \rightarrow \infty} J(u_k) = \inf_{u \in X} J(u).$$

Definition 11.1.1 Das Funktional $J : X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt koerzitiv, wenn

$$\|u\|_X \rightarrow \infty \Rightarrow J(u) \rightarrow \infty,$$

oder genauer gesagt:

Für alle $N > 0$ gibt es $M > 0$ derart, dass $\|u\|_X > M \Rightarrow J(u) > N$.

Aus der Koerzitivität folgt, dass eine Minimalfolge gleichmäßig beschränkt ist: es gibt $M > 0$ mit

$$\|u_k\|_X \leq M.$$

Manchmal wird Koerzitivität des Funktional J auch definiert als:

Es gibt eine stetige Funktion $p : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = \infty$ und

$$J(u) \geq p(\|u\|_X).$$

Dann ist sowohl die untere Schranke als auch das Verhalten in ∞ bestimmt.

Die Koerzitivität sorgt dafür, dass eine Minimalfolge uns nicht davonrennt.

¹Koerzitivität = coercivity, koerzitiv = coercive

- **Reflexiver Banachraum:**

$$X'' = X.$$

Dann sagt Kakutani (Theorem 5.3.12), dass jede beschränkte Folge eine schwach konvergente Teilfolge hat. Wenn das Funktional außerdem nach unten beschränkt und koerzitiv ist, finden wir, dass eine Minimalfolge $\{u_k\}_{k=1}^\infty$ beschränkt ist in X und damit eine schwach konvergente Teilfolge $\{u_{k_m}\}_{m \in \mathbb{N}}$ hat:

Es gibt also $\bar{u} \in X$ derart, dass $u_{k_m} \rightharpoonup \bar{u}$ in X .

Die Reflexivität liefert einen Kandidaten für ein Minimum.

- **Schwach Unterhalbfolgenstetigkeit:**

$$v_k \rightharpoonup v \Rightarrow \liminf_{k \rightarrow \infty} J(v_k) \geq J(v).$$

Wenn $\{u_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ eine Minimalfolge in X ist, ist auch jede Teilfolge $\{u_{k_m}\}_{m \in \mathbb{N}}$ eine Minimalfolge und es gilt

$$\lim_{m \rightarrow \infty} J(u_{k_m}) = \inf_{u \in X} J(u).$$

Wegen der unteren Schranke und der Koerzitivität von J , und wegen der Reflexivität von X , gibt es eine schwach konvergente Minimalfolge und man findet mit der schwachen Unterhalbfolgenstetigkeit, dass

$$\lim_{m \rightarrow \infty} J(u_{k_m}) = \liminf_{m \rightarrow \infty} J(u_{k_m}) \geq J(\bar{u}).$$

Es folgt, dass

$$J(\bar{u}) \geq \inf_{u \in X} J(u) = \lim_{m \rightarrow \infty} J(u_{k_m}) \geq J(\bar{u})$$

und

$$J(\bar{u}) = \inf_{u \in X} J(u).$$

Der Kandidat erfüllt unsere Wünsche: er gibt ein Minimum.

Weiter soll noch bemerkt werden, dass Stetigkeit nicht ausreicht. Wir haben nämlich keine konvergente Folge, sondern bloß eine schwach konvergente Folge. Und wieso verlangen wir nur Halbstetigkeit? Die Antwort ist, dass man meistens halt nicht mehr erwarten kann.

Theorem 11.1.2 *Sei X ein reflexiver Banachraum und sei das Funktional $J : X \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Wenn J nach unten beschränkt, koerzitiv und schwach unterhalbfolgenstetig ist, dann hat J ein Minimum.*

Bemerkung 11.1.3 *Man kann X auch ersetzen durch eine Teilmenge $A \subset X$, wenn diese Teilmenge abgeschlossen ist bezüglich der schwachen Topologie, das heißt, wenn aus $A \ni u_k \rightharpoonup u$ folgt, dass $u \in A$.*

11.1.2 Anwendung auf ein Dirichlet-Problem

Damit wird oft folgendes Randwertproblem angedeutet:

$$\begin{cases} -\Delta u = f & \text{in } \Omega, \\ u = g & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases} \quad (11.1)$$

wobei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ ist und die Funktionen f und g vorgeschrieben sind. Eine dazu passende variationelle Formulierung ist folgende.

Finde ein Minimum für $J : \{u = u_1 + u_g; u_1 \in W_0^{1,2}(\Omega)\}$, wobei $u_g \in W^{1,2}(\Omega)$ so ist, dass $Tu_g = g$ und

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 - f u \right) dx. \quad (11.2)$$

Damit dieses Funktional wohldefiniert ist nehmen wir $f \in L^2(\Omega)$ und legen statt g die Funktion $u_g \in W^{1,2}(\Omega)$ fest.

Homogene Randwerte

„Homogene Randwerte“ bedeutet, dass $u_g = 0$. Das heißt, wir suchen ein Minimum für $J : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch (11.2).

1. **Koerzitiv.** Die Ungleichung von Poincaré besagt, es gibt $C_P \in \mathbb{R}^+$ so, dass

$$\int_{\Omega} u^2 dx \leq C_P \int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx.$$

Damit kann man zeigen, dass, anstelle der Standardnorm $\|\cdot\|_{W^{1,2}(\Omega)}$ auch $\|\cdot\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}$, definiert durch

$$\|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} := \left(\int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx \right)^{1/2},$$

als Norm benutzt werden darf. Anders gesagt $\|\cdot\|_{W^{1,2}(\Omega)}$ und $\|\cdot\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}$ sind äquivalente Normen für $W_0^{1,2}(\Omega)$. Mit Young's Ungleichung findet man als nächstes

$$\int_{\Omega} u f dx = \int_{\Omega} (\varepsilon^{1/2} u) (\varepsilon^{-1/2} f) dx \leq \frac{\varepsilon}{2} \|u\|_{L^2(\Omega)}^2 + \frac{1}{2\varepsilon} \|f\|_{L^2(\Omega)}^2.$$

Nimmt man $\varepsilon = \frac{1}{2} C_P^{-1}$, so folgt

$$\begin{aligned} J(u) &\geq \frac{1}{2} \int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx - \frac{\varepsilon}{2} \|u\|_{L^2(\Omega)}^2 - \frac{1}{2\varepsilon} \|f\|_{L^2(\Omega)}^2 \geq \\ &\geq \left(\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon}{2} C_P \right) \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}^2 - \frac{1}{2\varepsilon} \|f\|_{L^2(\Omega)}^2 \geq \\ &\geq \frac{1}{4} \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}^2 - C_P \|f\|_{L^2(\Omega)}^2, \end{aligned}$$

und Koerzitivität.

2. **Reflexiver Banachraum.** $W_0^{1,2}(\Omega)$ ist sogar ein Hilbertraum. Man darf also annehmen, dass es eine schwach konvergente Minimalfolge gibt.
3. **Schwach unterhalbfolgenstetig.** Sei $\{u_k\}_{k=1}^n \subset W_0^{1,2}(\Omega)$ eine schwach konvergente Folge mit $\bar{u}$ als schwachen Limes. Dann gilt

$$\begin{aligned} J(u_k) - J(\bar{u}) &= \int_{\Omega} \frac{1}{2} (|\nabla u_k|^2 - |\nabla \bar{u}|^2) dx - \int_{\Omega} f (u_k - \bar{u}) dx \\ &= \int_{\Omega} \nabla (u_k - \bar{u}) \cdot \nabla \bar{u} dx + \int_{\Omega} \frac{1}{2} |\nabla (u_k - \bar{u})|^2 dx - \int_{\Omega} f (u_k - \bar{u}) dx \geq \\ &\geq \int_{\Omega} \nabla (u_k - \bar{u}) \cdot \nabla \bar{u} dx - \int_{\Omega} f (u_k - \bar{u}) dx \end{aligned} \quad (11.3)$$

Weil $u_k \rightharpoonup \bar{u}$ in $W_0^{1,2}(\Omega)$ folgt $\int_{\Omega} \nabla(u_k - \bar{u}) \cdot \nabla \bar{u} \, dx \rightarrow 0$ und $\int_{\Omega} f(u_k - \bar{u}) \, dx \rightarrow 0$. Angewendet auf die oben genannte Minimalfolge finden wir $\lim_{n \rightarrow \infty} J(u_n) \geq J(\bar{u})$. Also gilt

$$J(\bar{u}) = \inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} J(u).$$

Damit haben wir erreicht was wir wollten: Existenz eines Minimums.

Es sei noch bemerkt, dass im Allgemeinen die Ungleichung $\int_{\Omega} \frac{1}{2} |\nabla(u_k - \bar{u})|^2 \, dx \geq 0$ in (11.3) nicht ersetzt werden kann durch $\int_{\Omega} \frac{1}{2} |\nabla(u_k - \bar{u})|^2 \, dx \rightarrow 0$. Das letztere würde eben aussagen, dass $\|u_k - \bar{u}\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} \rightarrow 0$ und die Minimalfolge würde stark konvergieren. Ohne weitere Argumente wird so etwas nicht zutreffen.

Wir haben folgendes bewiesen.

Proposition 11.1.4 *Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und sei $f \in L^2(\Omega)$. Dann hat $J : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$, definiert in (11.2), ein Minimum.*

Inhomogene Randwerte

Aufgabe 33 *Zeigen Sie: Es gibt ein Minimum auch für den Fall $u_g \neq 0$.*

Ähnliche Funktionale

Aufgabe 34 *Sei $f \in L^2(\Omega)$ und $c \in \mathbb{R}$. Für welche der folgenden Probleme hat man die Existenz eines Minimums? Braucht man dazu zusätzliche Bedingungen für f oder c ?*

1. $\inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} \int_{\Omega} (|\nabla u|^2 + u^2 - fu) \, dx ;$
2. $\inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} \int_{\Omega} (|\nabla u|^2 - fu) \, dx ;$
3. $\inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} \int_{\Omega} (|\nabla u|^2 - cu^2 - fu) \, dx .$

11.1.3 Ein semilineares Dirichlet-Problem

Die einfachste Erweiterung vom Laplace-Problem zu einem nicht-linearen Problem wäre:

$$\begin{cases} -\Delta u = \pm u |u|^{p-1} + f & \text{in } \Omega, \\ u = 0 & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases} \quad (11.4)$$

Wie vorher ist Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ und die Funktion f ist vorgeschrieben. Wir werden versuchen herauszufinden, für welche p und welches Vorzeichen $\pm$ man eine dazu passende variationelle Formulierung finden kann.

Als Funktional käme

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 \mp \frac{1}{p+1} |u|^{p+1} - f u \right) dx \quad (11.5)$$

in Betracht.

Was braucht man damit dieses Funktional wohldefiniert ist? Nehmen wir an, dass $f \in L^2(\Omega)$. So brauchen wir für die drei hintereinander stehenden Terme $u \in W_0^{1,2}(\Omega) \cap$

$L^{p+1}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$ und wegen der Randwerte $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$. Wegen der Sobolev'schen Einbettungssatz gilt $L^{p+1}(\Omega) \subset W^{1,2}(\Omega)$, wenn $1 - \frac{n}{2} \geq 0 - \frac{n}{p+1}$. Das lässt sich umformen zu

$$p \leq \frac{n+2}{n-2}. \quad (11.6)$$

Wenn (11.6) erfüllt ist, ist das Funktional $J : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$ in (11.5) also wohldefiniert. Die Zahl $p = \frac{n+2}{n-2}$ ist die sogenannte kritische Wachstumsrate für (11.4). Für die Probleme, die auftreten bei $p > \frac{n+2}{n-2}$, verweisen wir auf eine berühmte Arbeit von Pohozaev [14].

Lass uns das Problem in (11.4) mit + mal genauer anschauen. Eigentlich erwarten wir nur ein Problem mit der Existenz eines Minimums, wenn in (11.5) das Minuszeichen auftritt. Betrachten wir also

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 + \frac{1}{p+1} |u|^{p+1} - f u \right) dx. \quad (11.7)$$

Proposition 11.1.5 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und sei $p < \frac{n+2}{n-2}$. Sei J definiert in (11.7) mit $f \in L^2(\Omega)$. Dann gibt es $\bar{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)$ derart, dass

$$J(\bar{u}) = \inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} J(u).$$

Beweis. Wegen der Ungleichungen von Poincaré-Friedrichs und von Cauchy-Schwarz gibt es eine nur von Ω abhängende Konstante $c_1 > 0$ derart, dass

$$\begin{aligned} J(u) &\geq \frac{1}{2} \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2 - \|u\|_{L^2(\Omega)} \|f\|_{L^2(\Omega)} \geq \\ &\geq c_1 \|u\|_{W^{1,2}(\Omega)}^2 - \|u\|_{W^{1,2}(\Omega)} \|f\|_{L^2(\Omega)} \end{aligned}$$

und es folgt, dass J koerzitiv ist auf $W_0^{1,2}(\Omega)$.

$W_0^{1,2}(\Omega)$ ist ein Hilbert-Raum und Hilbert-Räume sind reflexiv. Eine minimierende Folge $\{u_m\}$, die beschränkt ist wegen der Koerzitivität, hat dann eine schwach konvergente Teilfolge $\{u_{m_k}\}_{k \in \mathbb{N}}$:

$$u_{m_k} \rightharpoonup \bar{u} \text{ in } W_0^{1,2}(\Omega).$$

Weil $\{u_{m_k}\}_{k \in \mathbb{N}}$ beschränkt ist in $W_0^{1,2}(\Omega)$ und weil die Einbettung $W_0^{1,2}(\Omega) \hookrightarrow L^{p+1}(\Omega)$ kompakt ist für $p < \frac{n+2}{n-2}$, hat diese Teilfolge wiederum eine in $L^{p+1}(\Omega)$ konvergente Teilfolge $\{u_{m_{k_\ell}}\}_{\ell \in \mathbb{N}}$:

$$u_{m_{k_\ell}} \rightarrow \hat{u} \text{ in } L^{p+1}(\Omega).$$

Insbesondere gilt dies für $p = 1$, das heißt $u_{m_{k_\ell}} \rightarrow \hat{u}$ in $L^2(\Omega)$. Weil $u_{m_{k_\ell}}$ in $L^2(\Omega)$ sowohl schwach gegen $\bar{u}$ als auch (sogar stark) gegen $\hat{u}$ konvergiert, folgt $\hat{u} = \bar{u}$. Schreiben wir wieder $\{u_m\}_{m \in \mathbb{N}}$ für diese Teilfolge.

Wir haben schon gesehen, dass für eine minimierende Folge $\{u_m\}_{m \in \mathbb{N}}$ aus $u_m \rightharpoonup \bar{u}$ in $W_0^{1,2}(\Omega)$ folgt, dass

$$\int_{\Omega} |\nabla u_m|^2 dx \geq \int_{\Omega} |\nabla \bar{u}|^2 dx.$$

Aus der starken Konvergenz in $L^{p+1}(\Omega)$ und in $L^2(\Omega)$ folgt

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} \int_{\Omega} \frac{1}{p+1} |u_m|^{p+1} dx &= \int_{\Omega} \frac{1}{p+1} |\bar{u}|^{p+1} dx, \\ \lim_{m \rightarrow \infty} \int_{\Omega} u_m f dx &= \int_{\Omega} \bar{u} f dx. \end{aligned}$$

Dies liefert uns

$$\inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} J(u) = \lim_{m \rightarrow \infty} J(u_m) \geq J(\bar{u}) \geq \inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} J(u).$$

Also ist $\bar{u}$ ein Minimum für J . ■

11.2 A-priori Abschätzungen

Wenn man ein Minimum des Funktional $J : X \rightarrow \mathbb{R}$ in dem Banachraum X sucht und dieses Funktional ist Gateaux-differentierbar, dann gilt für ein solches Minimum $\bar{u}$, dass die schwache Euler-Lagrange Gleichung erfüllt ist:

$$\partial J(\bar{u}, \varphi) = 0 \text{ für alle } \varphi \in X.$$

Für dieses φ könnte man $\bar{u}$ einsetzen und so lassen sich manchmal Abschätzungen finden für den Teil mit den höchsten Ableitungen. Gehen wir zurück zu (11.7). Nehme an, es gibt ein Minimum $\bar{u}$ für (11.7) in $W_0^{1,2}(\Omega) \cap L^{p+1}(\Omega)$. Dann ist die schwache Euler-Lagrange Gleichung wie folgt:

$$\int_{\Omega} (\nabla \bar{u} \cdot \nabla \varphi + \bar{u} |\bar{u}|^{p-1} \varphi - f \varphi) dx = 0 \text{ für } \varphi \in W_0^{1,2}(\Omega) \cap L^{p+1}(\Omega) \quad (11.8)$$

Testen wir jetzt mit $\varphi = \bar{u}$, dann folgt

$$\int_{\Omega} (|\nabla \bar{u}|^2 + |\bar{u}|^{p+1} - f \bar{u}) dx = 0$$

und so findet man

$$\begin{aligned} \|\nabla \bar{u}\|_{L^2(\Omega)}^2 &= \int_{\Omega} |\nabla \bar{u}|^2 dx \leq \int_{\Omega} (|\nabla \bar{u}|^2 + |\bar{u}|^{p+1}) dx = \int_{\Omega} f \bar{u} dx \leq \\ &\leq \|f\|_{L^2(\Omega)} \|\bar{u}\|_{L^2(\Omega)} \leq C_{PF} \|f\|_{L^2(\Omega)} \|\nabla \bar{u}\|_{L^2(\Omega)}. \end{aligned}$$

Hier ist die Poincaré-Friedrichs-Ungleichung $\|\bar{u}\|_{L^2(\Omega)} \leq C_{PF} \|\nabla \bar{u}\|_{L^2(\Omega)}$ benutzt worden. Zusammenfassend:

Lemma 11.2.1 *Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ und sei $f \in L^2(\Omega)$. Wenn $\bar{u} \in W_0^{1,2}(\Omega) \cap L^{p+1}(\Omega)$ eine Lösung von (11.8) ist, dann gilt*

$$\|\nabla \bar{u}\|_{L^2(\Omega)} \leq C_{PF} \|f\|_{L^2(\Omega)}. \quad (11.9)$$

Das heißt, dass wir ohne die Existenz einer Lösung betrachtet zu haben und ohne Einschränkung bezüglich p , schon wissen, dass ein etwaiges Minimum die Abschätzung in (11.9) erfüllt.

Ein ähnliches Argument zeigt uns die Eindeutigkeit auch ohne irgendwelche Abhängigkeit von p .

Lemma 11.2.2 *Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ und sei $f \in L^2(\Omega)$. Dann hat (11.8) höchstens eine Lösung in $W_0^{1,2}(\Omega) \cap L^{p+1}(\Omega)$.*

Beweis. Nehmen wir an $\hat{u}$ und $\bar{u}$ in $W_0^{1,2}(\Omega) \cap L^{p+1}(\Omega)$ sind beide Lösungen von (11.8). Dann gilt

$$\int_{\Omega} (\nabla (\hat{u} - \bar{u}) \cdot \nabla \varphi + (\hat{u} |\hat{u}|^{p-1} - \bar{u} |\bar{u}|^{p-1}) \varphi) dx = 0 \text{ für } \varphi \in W_0^{1,2}(\Omega). \quad (11.10)$$

Für $\varphi = \hat{u} - \bar{u}$ findet man

$$\begin{aligned} 0 &= \int_{\Omega} (|\nabla (\hat{u} - \bar{u})|^2 + (\hat{u} |\hat{u}|^{p-1} - \bar{u} |\bar{u}|^{p-1}) (\hat{u} - \bar{u})) dx \geq \\ &\geq \int_{\Omega} |\nabla (\hat{u} - \bar{u})|^2 dx \geq 0 \end{aligned}$$

und es folgt, dass $\hat{u} = \bar{u}$. Die Ungleichung gilt, weil $(s |s|^{p-1} - t |t|^{p-1})$ und $s - t$ die gleiche Vorzeichen haben. ■

Variationsrechnung

Kapitel 12



Das Maximumprinzip

12.1 Besonderes für Funktionale erster Ordnung

Für Funktionale erster Ordnung verwendet man meistens einen Sobolev-Raum mit Index 1. Für solche Funktionale liefert die Euler-Lagrange Gleichung eine Differentialgleichung zweiter Ordnung. Elliptische Differentialgleichungen zweiter Ordnung haben eine Positivität erhaltende Eigenschaft. Zum Beispiel gilt für

$$\begin{cases} -\Delta u = f & \text{in } \Omega, \\ u = 0 & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases} \quad (12.1)$$

mit $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und $f \in L^2(\Omega)$ die folgende Behauptung. Wenn f positiv ist, dann ist auch die Lösung u positiv. Genauer gesagt¹:

$$f \gtrless 0 \text{ in } \Omega \implies u > 0 \text{ in } \Omega.$$

Für einen Beweis dieses starken Maximumprinzips verweisen wir auf eine Vorlesung partielle Differentialgleichungen. Eine schwache Form werden wir hier schon näher anschauen.

Nehmen wir an, dass $f \gtrless 0$ und dass $u < 0$ auf $A \subset \Omega$. Wir wählen A sogar derart, dass A eine Zusammenhangskomponente von $\{x \in \Omega; u(x) < 0\}$ ist. Wenn u stetig wäre, dann gilt $u = 0$ auf ∂A . Es ist nicht sehr klar, ob man so etwas machen kann (ist A ein Gebiet?), aber leben wir mal gefährlich. So hoffen wir, dass u auch

$$\begin{cases} -\Delta u = f & \text{in } A, \\ u = 0 & \text{auf } \partial A, \end{cases} \quad (12.2)$$

erfüllt. Mit partieller Integration (ist der Normalenvektor auf ∂A wohldefiniert?) folgt jedoch

$$0 \leq \int_A \nabla u \cdot \nabla u \, dx = - \int_A u \, \Delta u \, dx = \int_A u \, f \, dx \leq 0.$$

Das heißt $|\nabla u| = 0$ f.ü. in A und es folgt, dass u konstant ist in A . Weil $u = 0$ auf ∂A , folgt $u = 0$ in A , ein Widerspruch. Also würden wir finden, dass $A = \emptyset$ und es würde folgen, dass $u \geq 0$ auf Ω . Weil $u \neq 0$ für $f \neq 0$ gilt, hätte man

$$f \gtrless 0 \text{ in } \Omega \implies u \gtrless 0 \text{ in } \Omega.$$

¹Mit $f \gtrless 0$ in Ω ist gemeint, dass die Funktion nicht-negativ und nicht identisch 0 ist. Für Lebesguemessbare Funktionen heißt das $\lambda \{x \in \Omega; f(x) < 0\} = 0$ und $\lambda \{x \in \Omega; f(x) > 0\} > 0$.

Diese Folgerungen sind ein wenig unsorgfältig. Wir werden es noch hieb- und stichfest machen. Dazu brauchen wir das folgende Ergebnis.

Lemma 12.1.1 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein Gebiet. Dann gilt

$$u \in W^{1,2}(\Omega) \Rightarrow |u| \in W^{1,2}(\Omega)$$

mit $\nabla |u| = \operatorname{sgn}(u) \nabla u$ als schwache Ableitung.

Auch gilt

$$u \in W_0^{1,2}(\Omega) \Rightarrow |u| \in W_0^{1,2}(\Omega). \quad (12.3)$$

Bemerkung 12.1.2 Wenn $\nabla |u| = \operatorname{sgn}(u) \nabla u \in W^{1,2}(\Omega)$ gilt, dann folgt

$$\| |u| \|_{W^{1,2}(\Omega)} = \| u \|_{W^{1,2}(\Omega)}. \quad (12.4)$$

Beweis. Man sieht sofort, dass $\| |u| \|_{L^2(\Omega)} = \| u \|_{L^2(\Omega)}$. Es ist etwas schwieriger zu zeigen, dass $\| \nabla |u| \|_{L^2(\Omega)} = \| \nabla u \|_{L^2(\Omega)}$. Sei $\varepsilon > 0$. Wenn Ω unbeschränkt ist, dann gibt es $R_\varepsilon \in \mathbb{R}^+$ derart, dass für $\Omega_R = \Omega \cap B_R(0)$ gilt, dass

$$\| u \|_{W^{1,2}(\Omega)} - \varepsilon \leq \| u \|_{W^{1,2}(\Omega_R)} \leq \| u \|_{W^{1,2}(\Omega)}.$$

Außerdem gibt es $\chi : [0, \infty) \rightarrow [0, 1]$, definiert durch

$$\chi(r) = \begin{cases} 1 & \text{für } r \leq R \\ 0 & \text{für } r \geq R+2 \end{cases}$$

mit $|\chi'(r)| \leq 1$. Es gilt

$$\| (1 - \chi(|\cdot|)) u(\cdot) \|_{W^{1,2}(\Omega)} \leq \| u \|_{W^{1,2}(\Omega \setminus \Omega_R)} + \| u \|_{L^2(\Omega_{R+2} \setminus \Omega_R)} \leq 2\varepsilon.$$

Wir dürfen also χu statt u betrachten. Oder wir dürfen annehmen, dass Ω beschränkt ist und weil dies letztere die Notation vereinfacht, tun wir dies.

Wir definieren $\ell_\varepsilon : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$ durch

$$\ell_\varepsilon = \varphi_\varepsilon * |\cdot|.$$

Man zeigt direkt, dass

$$\begin{cases} \ell_\varepsilon(s) = |s| & \text{für } |s| \geq \varepsilon, \\ \ell'_\varepsilon(s) = \operatorname{sgn}(s) & \text{für } |s| \in \{0\} \cup [\varepsilon, \infty), \\ |\ell_\varepsilon(s) - |s|| \leq \frac{1}{2}\varepsilon & \text{für alle } s, \\ |\ell'_\varepsilon(s) - \operatorname{sgn}(s)| \leq 1 & \text{für alle } s. \end{cases}$$

Für $u \in W^{1,2}(\Omega)$ setzen wir

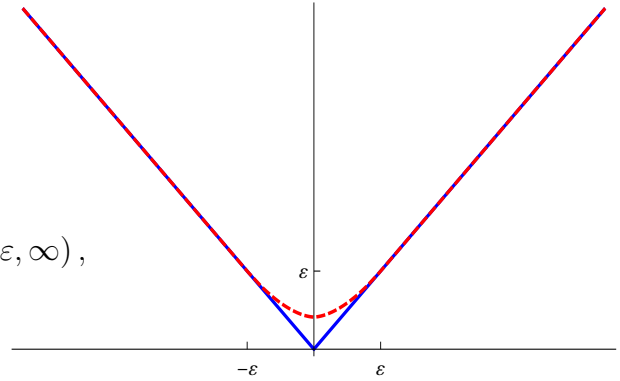
$$u_n(x) = \ell_{1/n}(u(x))$$

und behaupten, dass $u_n \rightarrow |u|$ in $W^{1,2}(\Omega)$. Es folgt sofort, dass

$$\| u_n - |u| \|_{L^2(\Omega)}^2 = \int_\Omega (\ell_{1/n}(u(x)) - |u(x)|)^2 dx \leq \frac{1}{4n^2} |\Omega| \quad (12.5)$$

und mit Hilfe der majorisierten Konvergenz, dass

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \| \nabla u_n - \operatorname{sgn}(u) \nabla u \|_{L^2(\Omega)}^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_\Omega (\ell'_{1/n}(u(x)) - \operatorname{sgn}(u(x)))^2 |\nabla u(x)|^2 dx \\ &= \int_\Omega \lim_{n \rightarrow \infty} (\ell'_{1/n}(u(x)) - \operatorname{sgn}(u(x)))^2 |\nabla u(x)|^2 dx = 0. \end{aligned} \quad (12.6)$$



Also konvergiert $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ und $\{\nabla u_n\}_{n=1}^\infty$ in $L^2(\Omega)$. Dann ist $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ eine Cauchy-Folge in $W^{1,2}(\Omega)$ und deshalb auch konvergent in $W^{1,2}(\Omega)$ und $u_n \rightarrow |u|$ in $W^{1,2}(\Omega)$. Im Sinne von schwachen Ableitungen gilt also, dass $\nabla |u| = \operatorname{sgn}(u) \nabla u$.

Für die Behauptung in (12.3) nehmen wir $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$, $\varepsilon > 0$ und betrachten

$$u_n(x) = \tilde{\ell}_{1/n}(u(x))$$

mit

$$\ell_{1/n}(s) = \ell_{1/n}(s) - \ell_{1/n}(0).$$

Wir finden wie in (12.5) und (12.6), dass

$$\begin{aligned} \left\| \tilde{\ell}_{1/n}(u) - |u| \right\|_{L^2(\Omega)} &\leq \left\| \ell_{1/n}(u) - |u| \right\|_{L^2(\Omega)} + \left\| \ell_{1/n}(0) \right\|_{L^2(\Omega)} \leq \\ &\leq \left(\frac{1}{2n} + \ell_{1/n}(0) \right) \sqrt{|\Omega|} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

und

$$\left\| \nabla \tilde{\ell}_{1/n}(u) - \operatorname{sgn}(u) \nabla u \right\|_{L^2(\Omega)} = \left\| \nabla \ell_{1/n}(u) - \operatorname{sgn}(u) \nabla u \right\|_{L^2(\Omega)} \rightarrow 0.$$

Man nehme n_1 so groß, dass

$$\left\| \tilde{\ell}_{1/n_1}(u) - |u| \right\|_{W^{1,2}(\Omega)} < \frac{1}{2}\varepsilon. \quad (12.7)$$

Es gibt $\{\tilde{u}_m\}_{m \in \mathbb{N}} \subset C_c^\infty(\Omega)$ derart, dass $\tilde{u}_m \rightarrow u$ in $W^{1,2}(\Omega)$. Weil $|\tilde{\ell}'_{1/n_1}| \leq 1$ folgt es, dass

$$\left\| \tilde{\ell}_{1/n_1}(\tilde{u}_m) - \tilde{\ell}_{1/n_1}(u) \right\|_{L^2(\Omega)} \leq \|\tilde{u}_m - u\|_{L^2(\Omega)}$$

und

$$\begin{aligned} \left\| \nabla \tilde{\ell}_{1/n_1}(\tilde{u}_m) - \nabla \tilde{\ell}_{1/n_1}(u) \right\|_{L^2(\Omega)} &\leq \left\| \tilde{\ell}'_{1/n_1}(\tilde{u}_m) \nabla \tilde{u}_m - \tilde{\ell}'_{1/n_1}(u) \nabla u \right\|_{L^2(\Omega)} \leq \\ &\leq \left\| \tilde{\ell}'_{1/n_1}(\tilde{u}_m) |\nabla \tilde{u}_m - \nabla u| \right\|_{L^2(\Omega)} + \left\| \left(\tilde{\ell}'_{1/n_1}(\tilde{u}_m) - \tilde{\ell}'_{1/n_1}(u) \right) \nabla u \right\|_{L^2(\Omega)} \leq \\ &\leq \|\nabla \tilde{u}_m - \nabla u\|_{L^2(\Omega)} + \left\| \left(\tilde{\ell}'_{1/n_1}(\tilde{u}_m) - \tilde{\ell}'_{1/n_1}(u) \right) \nabla u \right\|_{L^2(\Omega)} \end{aligned}$$

Weil $s \mapsto \tilde{\ell}'_{1/n_1}(s)$ stetig ist, und $\tilde{u}_m(x) \rightarrow u(x)$ f.ü., gilt auch, dass

$$\tilde{\ell}'_{1/n_1}(\tilde{u}_m(x)) \rightarrow \tilde{\ell}'_{1/n_1}(u(x)) \text{ f.ü. für } m \rightarrow \infty.$$

Mit Hilfe der majorisierten Konvergenz folgt dann, dass

$$\left\| \left(\tilde{\ell}'_{1/n_1}(\tilde{u}_m) - \tilde{\ell}'_{1/n_1}(u) \right) \nabla u \right\|_{L^2(\Omega)} \rightarrow 0 \text{ für } m \rightarrow \infty.$$

Dies bedeutet, dass es m_1 gibt derart, dass

$$\left\| \tilde{\ell}_{1/n_1}(\tilde{u}_{m_1}) - \tilde{\ell}_{1/n_1}(u) \right\|_{L^2(\Omega)} < \frac{1}{2}\varepsilon \quad (12.8)$$

Wenn wir (12.7) und (12.8) beide verwenden, folgt dass

$$\left\| \tilde{\ell}_{1/n_1}(\tilde{u}_{m_1}) - |u| \right\|_{L^2(\Omega)} < \varepsilon. \quad (12.9)$$

Man muss nur noch bemerken, dass der Träger von $\tilde{u}_{m_1}$ und $\tilde{\ell}_{1/n_1}(\tilde{u}_{m_1})$ identisch sind ($\tilde{\ell}_{1/n_1}(0) = 0$) und dass $\tilde{\ell}_{1/n_1}(\tilde{u}_{m_1})$ als Kombination unendlich differentierbarer Funktionen in $C^\infty(\Omega)$ liegt. Weil man dies für jedes $\varepsilon > 0$ machen kann, gilt $|u| \in W_0^{1,2}(\Omega)$.

■

Korollar 12.1.3 Man definiert $u^+ := \max(0, u)$ und $u^- := \max(0, -u)$. Dann gilt $u = u^+ - u^-$,

$$u \in W^{1,2}(\Omega) \Rightarrow u^+, u^- \in W^{1,2}(\Omega), \quad (12.10)$$

$$u \in W_0^{1,2}(\Omega) \Rightarrow u^+, u^- \in W_0^{1,2}(\Omega) \quad (12.11)$$

und für $u \in W^{1,2}(\Omega)$ gilt

$$\|u\|_{W^{1,2}(\Omega)}^2 = \|u^+\|_{W^{1,2}(\Omega)}^2 + \|u^-\|_{W^{1,2}(\Omega)}^2. \quad (12.12)$$

Bemerkung 12.1.4 Die folgende Norm ist hier gemeint:

$$\|u\|_{W^{1,2}(\Omega)} = \left(\int_{\Omega} u(x)^2 dx + \int_{\Omega} |\nabla u(x)|^2 dx \right)^{1/2}.$$

Beweis. Man benutze $u^+ = \frac{1}{2}(|u| + u)$ und $u^- = \frac{1}{2}(|u| - u)$ und Lemma 12.1.1. ■

Für Differentialgleichungen höherer Ordnung braucht man mindestens einen Sobolev-Raum $W^{2,p}(\Omega)$ und ähnliches wie in (12.10) für $W^{1,2}(\Omega)$ gilt nicht für $W^{2,2}(\Omega)$:

$$u \in W^{2,2}(\Omega) \not\Rightarrow u^+ \in W^{2,2}(\Omega).$$

Betrachte zum Beispiel $u(x) = \sin(x)$ auf $\Omega = (-\pi, \pi)$. Dann gilt

$$|u|'(x) = \begin{cases} \cos(x) & \text{für } x > 0, \\ -\cos(x) & \text{für } x < 0. \end{cases}$$

Die Funktion $|u|$ hat keine schwache zweite Ableitung in $L^2(-\pi, \pi)$. Wenn v eine solche Ableitung wäre, dann gilt $v(x) = -|\sin(x)|$ f.ü. weil starke Ableitungen auf $(-\pi, 0) \cup (0, \pi)$ mit schwachen Ableitungen f.ü. übereinstimmen. Jedoch folgt dann für $\varphi \in C_0^\infty(-\pi, \pi)$ mit $\varphi(0) \neq 0$, dass

$$\int_{-\pi}^{\pi} (v(x) \varphi(x) - |u(x)| \varphi''(x)) dx = -2\varphi(0) \neq 0.$$

Man kann manchmal auch Funktionen in Sobolev-Räumen mit höheren Index zerlegen in einen positiven und ein negativen Teil, und so, dass auch (12.12) erfüllt ist, aber nicht durch $u = \max(0, u) + \min(0, u)$. Näheres dazu findet man in [8, Section 3.1.2].

12.2 A-priori Abschätzungen und Maximumprinzip

Für elliptische Differentialgleichungen zweiter Ordnung ist das Maximum-Prinzip ein sehr wichtiges Instrument. Wenn die Euler-Lagrange Gleichung zweiter Ordnung ist, bedeutet das, dass das Funktional höchstens Terme erster Ordnung hat. Zum Beispiel $I : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$I(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 - f u \right) dx, \quad (12.13)$$

führt uns durch die Euler-Lagrange Gleichung zum Randwertproblem

$$\begin{cases} -\Delta u = f & \text{in } \Omega, \\ u = 0 & \text{auf } \partial\Omega. \end{cases} \quad (12.14)$$

Genauer gesagt, wenn (12.13) ein Minimum in $\tilde{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)$ hat und $\tilde{u}$ sogar in $C^2(\bar{\Omega})$ liegt, dann erfüllt $\tilde{u}$ das Randwertproblem in (12.14). Für (12.14) kann man zeigen, dass $f \geq 0$ impliziert, dass auch $u \geq 0$. Das starke Maximumprinzip zeigt sogar, dass für $0 \neq f \geq 0$ sogar folgendes gilt: $u > 0$ innerhalb von Ω .

Mit Hilfe der schwachen Euler-Lagrange Gleichung kann man auch ein Maximumprinzip beweisen für das Minimum von (12.13).

Lemma 12.2.1 (Eine sehr schwache Form des Maximumprinzips)

Nehme an, $f \in L^2(\Omega)$ und $f \geq 0$. Wenn $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ derart ist, dass

$$\partial I(u, \varphi) := \int_{\Omega} (\nabla u \cdot \nabla \varphi - f \varphi) dx = 0 \text{ für alle } \varphi \in W_0^{1,2}(\Omega) \quad (12.15)$$

dann gilt $u \geq 0$. Wenn außerdem $f \gtrless 0$ gilt, dann gilt auch $u \gtrless 0$.

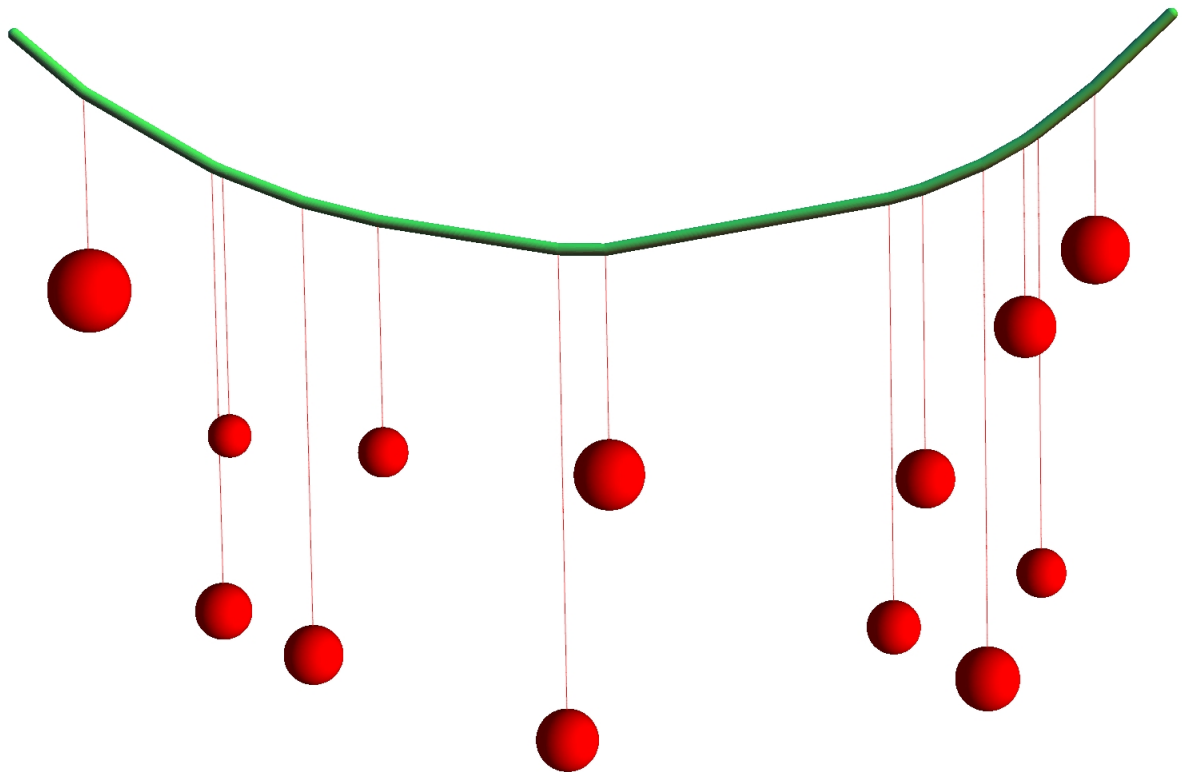


Abbildung 12.1: Die Funktion u als grünes Seil, die das Minimum liefert für (12.13) bei einer bestimmten Weihnachtskugelverteilung f . Das Maximumprinzip sagt, dass das Modell sich so benimmt, wie wir hoffen: $f \lesseqgtr 0$ impliziert $u \lesseqgtr 0$. Denn hängt man Gewichte am Seil, dann geht es nach unten.

Bemerkung 12.2.2 Wie gesagt, der Grund, wieso ein solches Maximumprinzip nur für Funktionale J mit höchstens Ableitungen erster Ordnung gilt, ist folgender:

$$u \in W^{1,2}(\Omega) \Rightarrow u^+ \in W^{1,2}(\Omega) \quad (12.16)$$

Ähnliches wie in (12.16) für $W^{1,2}(\Omega)$ hat man nicht für $W^{2,2}(\Omega)$.

Beweis. Man hat für $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$, dass auch $u^+, u^- \in W_0^{1,2}(\Omega)$. Setzt man $\varphi = u^-$ ein in (12.15) so findet man

$$0 \leq \int_{\Omega} |\nabla u^-|^2 dx = - \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla u^- dx = - \int_{\Omega} f u^- dx \leq 0.$$

Es folgt $|\nabla u^-| \equiv 0$ und weil $u^- \in W_0^{1,2}(\Omega)$, dass $u^- \equiv 0$ und so $u \geq 0$. ■

Wie wir schon gesehen haben, hat das Funktional (12.13) ein eindeutiges Minimum $\tilde{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)$. Wir können mit Hilfe dieses Maximumprinzips die Funktion $\tilde{u}$ vergleichen mit den Minimallösungen von

$$I_1(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 - f^+ u \right) dx \text{ und } I_2(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 - f^- u \right) dx, \quad (12.17)$$

wobei $f^+ = \max(0, f)$ und $f = f^+ - f^-$.

Korollar 12.2.3 Seien $\tilde{u}, u_1, u_2$ die Minima von I, I_1 beziehungsweise I_2 aus (12.13) und (12.17). Dann gilt

$$\tilde{u} = u_1 - u_2 \text{ und } u_1, u_2 \geq 0.$$

Also gilt auch $-u_2 \leq \tilde{u} \leq u_1$.

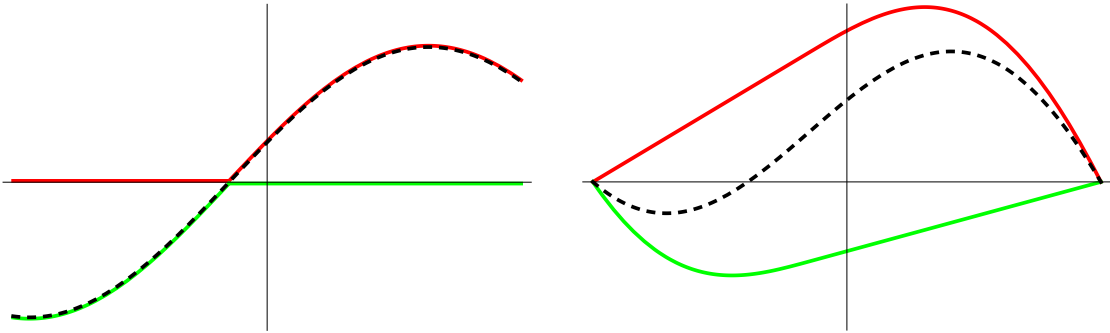


Abbildung 12.2: Links $-f^- \leq f \leq f^+$ und rechts $-u_2 \leq u \leq u_1$.

Beweis. Das Funktional I ist strikt konvex auf $W_0^{1,2}(\Omega)$ und hat also höchstens ein Minimum $\tilde{u}$ und für dieses Minimum und nur für dieses Minimum gilt $\partial I(\tilde{u}, \varphi) = 0$. Ähnliches gilt auch für I_1 und I_2 und weil

$$\partial I(u_1 - u_2, \varphi) = \partial I_1(u_1, \varphi) - \partial I_2(u_2, \varphi) = 0,$$

folgt $\tilde{u} = u_1 - u_2$. Wegen Lemma 12.2.1 hat man $u_1, u_2 \geq 0$. ■

Korollar 12.2.4 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ derart, dass $\Omega \subset B_R(0)$ und nehme an, $f \in L^\infty(\Omega)$ mit $\|f\|_{L^\infty(\Omega)} \leq M$. Wenn $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ derart ist, dass (12.15) erfüllt ist, dann gilt

$$\|u\|_{L^\infty(\Omega)} \leq \frac{M}{2n} R^2.$$

Beweis. Setze $v(x) := \frac{1}{2n} M (R^2 - |x|^2)$ und bemerke, dass $0 \leq v \leq \frac{M}{2n} R^2$ und $-\Delta v = M \geq |f|$ in Ω gilt. Damit folgt $0 \leq (u - v)^+ \leq u^+$ und man hat $(u - v)^+ \in W_0^{1,2}(\Omega)$.

Dann findet man

$$\begin{aligned}
0 &\leq \int_{\Omega} |\nabla (u - v)^+|^2 dx = \int_{\Omega} \nabla (u - v) \cdot \nabla (u - v)^+ dx = \\
&= \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla (u - v)^+ dx - \int_{\Omega} \nabla v \cdot \nabla (u - v)^+ dx = \\
&= \int_{\Omega} f (u - v)^+ dx + \int_{\Omega} \Delta v (u - v)^+ dx = \\
&= \int_{\Omega} (f - M) (u - v)^+ dx \leq 0.
\end{aligned}$$

Wir haben partiell integriert und dabei benutzt, dass $(u - v)^+ = 0$ auf $\partial\Omega$. Wiederum folgt $(u - v)^+ \equiv 0$ und es gilt $u \leq v$. Ebenso zeigt man $(u + v)^- \equiv 0$ und es folgt, dass $u \geq -v$. Dann gilt auch, dass

$$\|u\|_{L^\infty(\Omega)} \leq \|v\|_{L^\infty(\Omega)} = \frac{M}{2n} R^2.$$

■

12.3 Anwendung auf ein semilineares Problem

Wir betrachten nochmals das Funktional in (11.7), nämlich

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 + \frac{1}{p+1} |u|^{p+1} - f u \right) dx. \quad (12.18)$$

Die schwache Euler-Lagrange-Gleichung ist wie folgt:

$$\int_{\Omega} (\nabla \bar{u} \cdot \nabla \varphi + \bar{u} |\bar{u}|^{p-1} \varphi - f \varphi) dx = 0 \text{ für } \varphi \in W_0^{1,2}(\Omega) \cap L^{p+1}(\Omega) \quad (12.19)$$

Das oben genannte Maximumprinzip benutzen wir für die folgende a-priori Abschätzung.

Theorem 12.3.1 *Sei $f \in L^2(\Omega)$ und seien u_1, u_2 die Minimallösungen von I_1 beziehungsweise I_2 wie in (12.17). Für jede Funktion $\bar{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)$, die die schwache Euler-Lagrange Identität (12.19) erfüllt, gilt dass*

$$u_2 \leq \bar{u} \leq u_1.$$

Beweis. Aus Lemma 12.2.1 folgt $u_2 \leq 0 \leq u_1$. Fast wie oben finden wir

$$\begin{aligned}
0 &\leq \int_{\Omega} |\nabla (\bar{u} - u_1)^+|^2 dx = \int_{\Omega} \nabla (\bar{u} - u_1) \cdot \nabla (\bar{u} - u_1)^+ dx = \\
&= \int_{\Omega} \nabla \bar{u} \cdot \nabla (\bar{u} - u_1)^+ dx - \int_{\Omega} \nabla u_1 \cdot \nabla (\bar{u} - u_1)^+ dx = \\
&= \int_{\Omega} (-\bar{u} |\bar{u}|^{p-1} + f) (\bar{u} - u_1)^+ dx - \int_{\Omega} f^+ (\bar{u} - u_1)^+ dx = \\
&= - \int_{\Omega} \bar{u} |\bar{u}|^{p-1} (\bar{u} - u_1)^+ dx - \int_{\Omega} f^- (\bar{u} - u_1)^+ dx \leq 0.
\end{aligned}$$

In der letzten Abschätzung haben wir benutzt, dass $u_1 \geq 0$, denn wenn $\bar{u} \geq u_1$ gilt, dann folgt $\bar{u} \geq 0$ und wenn $\bar{u} \leq u_1$ gilt, dann folgt $(\bar{u} - u_1)^+ = 0$. Wir finden so, dass $\nabla (\bar{u} - u_1)^+ \equiv 0$, also $(\bar{u} - u_1)^+ = c$ und weil $(\bar{u} - u_1)^+ \in W_0^{1,2}(\Omega)$ gilt, findet man sogar dass $(\bar{u} - u_1)^+ \equiv 0$. Das bedeutet $\bar{u} \leq u_1$. Auf ähnliche Art folgt $\bar{u} \geq u_2$. ■

Bemerkung 12.3.2 Der Beweis hier fordert in keinem Schritt, dass der nichtlineare Term wie eine Potenz aussieht sondern nur, dass die Ableitung g das richtige Vorzeichen hat. Das ähnliche Ergebnis folgt also auch für

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 + G(\cdot, u) - f u \right) dx, \quad (12.20)$$

wenn $G(x, u) = \int_0^u g(x, s) ds$ und $g \in C(\bar{\Omega} \times \mathbb{R})$ derart ist, dass $ug(x, u) \geq 0$ für $(x, u) \in \Omega \times \mathbb{R}$ gilt.

Dieses Ergebnis können wir wie folgt benutzen für (11.7):

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 + \frac{1}{p+1} |u|^{p+1} - f u \right) dx, \quad (12.21)$$

wenn p superkritisch ist, also für $p > \frac{n+2}{n-2}$. Wir nehmen zusätzlich $f \in L^\infty(\Omega)$. Statt (12.21) betrachten wir (12.20) mit $G(\cdot, u) = G_M(u)$ für $M \in \mathbb{R}^+$ mit

$$G_M(u) := \begin{cases} \frac{1}{p+1} |u|^{p+1} & \text{if } |u| \leq M, \\ \frac{1}{2} M^{p-1} u^2 - \frac{p-1}{2(p+1)} M^{p+1} & \text{if } |u| > M. \end{cases}$$

Jetzt ist

$$J_M(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 + G_M(u) - f u \right) dx \quad (12.22)$$

wohldefiniert auf $W_0^{1,2}(\Omega)$ und sogar für jede $M > 0$ hat man $J_M \in C^1(W_0^{1,2}(\Omega), \mathbb{R})$. Wegen der Bemerkung 12.3.2 und der vorhergehenden Theoreme finden wir, dass das Minimum u_M für (12.22) die folgende a-priori Abschätzung erfüllt:

$$\|u_M\|_{L^\infty(\Omega)} \leq \frac{1}{2n} R^2 \|f\|_{L^\infty(\Omega)} \quad (12.23)$$

Hier haben wir R derart gewählt, dass $\Omega \subset B_R(0)$. Die Abschätzung in (12.23) ist unabhängig von M .

Nehmen wir jetzt $M_1 \geq \frac{1}{2n} R^2 \|f\|_{L^\infty(\Omega)}$, dann folgt, dass $G_{M_1}(u_{M_1}) = \frac{1}{p+1} |u_{M_1}|^{p+1}$ und damit erfüllt u_{M_1} nicht nur die Euler-Lagrange Gleichung für (12.21) sondern sogar die für (12.20). Es gilt sogar, dass

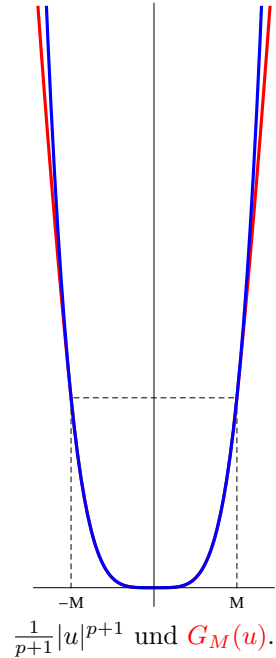
$$J(u_{M_1}) = J_{M_1}(u_{M_1}) = \inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} J_{M_1}(u) \leq \inf_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} J(u) \leq J(u_{M_1}).$$

Übrigens hätte man auch statt G_M die folgende Funktion verwenden können:

$$\tilde{G}_M(u) = \min(G(u), G(M)).$$

Obwohl $\tilde{G}_M$ nicht differenzierbar ist, ist J_M Gateaux-differentierbar.

Aufgabe 35 Wir haben für (12.21) angenommen, dass $f \in L^\infty(\Omega)$. Zeigen Sie, dass man auch für $f \in L^2(\Omega)$ ein Minimum in $W_0^{1,2}(\Omega)$ findet für $p > \frac{n+2}{n-2}$.



Variationsrechnung

Kapitel 13



Extrema und Sattelpunkte

13.1 Stationäre Stellen

Die erste Frage, die einem bezüglich Variationsrechnung bei einem Funktional $J : X \rightarrow \mathbb{R}$ einfällt, ist, ob dieses Funktional ein Minimum hat. Wenn J differenzierbar ist und es ein Minimum hat in $\tilde{u} \in X$, dann folgt die Euler-Lagrange-Gleichung

$$\partial J(\tilde{u}, \varphi) = 0 \text{ für alle } \varphi \text{ mit } \tilde{u} + \varphi \in X.$$

Für $J : W_{(0)}^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$J_f(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 + G(u, x) - f(x) u(x) \right) dx, \quad (13.1)$$

mit $f \in L^2(\Omega)$ und G differenzierbar, wird dies zu

$$\int_{\Omega} (\nabla u(x) \cdot \nabla \varphi(x) + G_u(u(x), x) \varphi(x) - f(x) \varphi(x)) dx \text{ für alle } \varphi \in W_{(0)}^{1,2}(\Omega) \quad (13.2)$$

Wenn $u \mapsto G(u, x)$ konvex ist und $G(u, x) = \mathcal{O}(u^2)$ für $|u| \rightarrow \infty$, dann hat J_f ein Minimum. Wenn $u \mapsto G(u, x)$ differenzierbar ist, dann bedeutet konvex in u , dass $u \mapsto G_u(u, x)$ eine wachsende Funktion ist.

Lemma 13.1.1 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein Gebiet. Sei $G \in C^1(\mathbb{R} \times \overline{\Omega})$ konvex in u und sogar derart, dass es $c_i \in \mathbb{R}^+$ gibt mit

$$G(u, x) \geq c_1 u^2 - c_2.$$

Wir schreiben $u_f \in W_0^{1,2}(\Omega)$ für die Funktion, die (13.1) mit $f \in L^2(\Omega)$ minimiert in $W_0^{1,2}(\Omega)$. Dann gilt folgendes:

$$f_1 \geq f_2 \implies u_{f_1} \geq u_{f_2}.$$

Ist $G \in C^1(\mathbb{R} \times \overline{\Omega})$ sogar strikt konvex in u , dann gilt für die Funktion $u_f \in W^{1,2}(\Omega)$, die das Minimum von (13.1) über $W^{1,2}(\Omega)$ ergibt für $f \in L^2(\Omega)$, folgendes:

$$f_1 \geq f_2 \implies u_{f_1} \geq u_{f_2}.$$

Beweis. Man hat

$$0 = \int_{\Omega} (\nabla(u_{f_1} - u_{f_2}) \cdot \nabla\varphi + (G_u(u_{f_1}, x) - G_u(u_{f_2}, x))\varphi - (f_1 - f_2)\varphi) dx \quad (13.3)$$

und weil man zeigen möchte, dass $u_{f_2} - u_{f_1} \leq 0$, testen wir mit $\varphi = (u_{f_2} - u_{f_1})^+$. Wir betrachten die drei Terme einzeln. Es folgt erstens, dass

$$\int_{\Omega} \nabla(u_{f_1} - u_{f_2}) \cdot \nabla(u_{f_2} - u_{f_1})^+ dx = - \int_{\Omega} |\nabla(u_{f_2} - u_{f_1})^+|^2 dx \leq 0.$$

Konvexität mit Differenzierbarkeit liefert, dass die Funktion $s \mapsto G_u(s, x)$ wachsend ist. Dies bedeutet für den zweiten Term, dass

$$(G_u(s_1, x) - G_u(s_2, x))(s_1 - s_2) \geq 0 \text{ für alle } s_1, s_2 \in \mathbb{R}$$

und auch, dass

$$\int_{\Omega} (G_u(u_{f_1}, x) - G_u(u_{f_2}, x))(u_{f_2} - u_{f_1})^+ dx \leq 0. \quad (13.4)$$

Weil auch noch

$$- \int_{\Omega} (f_1 - f_2)(u_{f_2} - u_{f_1})^+ dx \leq 0$$

gilt, müssen diese drei Terme einzeln 0 sein und es folgt $(u_{f_2} - u_{f_1})^+ = c$. Im Fall, dass $u_{f_2}, u_{f_1} \in W_0^{1,2}(\Omega)$ gilt, folgt $c = 0$ und $(u_{f_2} - u_{f_1})^+ = 0$. Das heißt $u_{f_1} \geq u_{f_2}$. Im Fall, dass wir nur $u_{f_2}, u_{f_1} \in W^{1,2}(\Omega)$ annehmen, finden wir noch immer $(u_{f_2} - u_{f_1})^+ = c$. Um zu zeigen, dass $c = 0$ gilt, verwenden wir jetzt die strikte Konvexität von G . Wenn $c > 0$ gilt, finden wir eine strikte Ungleichung in (13.4) und dies gibt den Widerspruch. ■

Pi mal Daumen kann man sagen, dass man bei einem Minimum von (13.1) lokal ein Maximumprinzip hat. Ein Minimum bedeutet, dass J in Nähe des Minimums konvex ist und nur dann liefern die erste beiden Terme in (13.3) das richtige Vorzeichen.

Auch bei einem Sattelpunkt für ein Funktional der Form in (13.1) ist die Euler-Lagrange-Gleichung (13.2) erfüllt. Hier kann man jedoch kein Maximumprinzip erwarten, denn für einen Sattelpunkt gibt es eine nicht-konvexe Richtung und für ein $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$ in dieser Richtung geben die ersten beiden Termen in (13.3) das falsche Vorzeichen.

Definition 13.1.2 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein Gebiet, $(W(\Omega), \|\cdot\|)$ ein normierter Raum, $X \subset W(\Omega)$ und sei $F \in C^1(\overline{\Omega} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$. Betrachte das Funktional $J : X \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$J(u) = \int_{\Omega} F(x, u(x), \nabla u(x)) dx.$$

Sei $\tilde{u} \in X$ derart, dass

$$\partial J(\tilde{u}; \varphi) = 0 \text{ für alle } \varphi \in W(\Omega) \text{ mit } \tilde{u} + \varphi \in X. \quad (13.5)$$

- J hat ein lokales Minimum in $\tilde{u}$, wenn es $\varepsilon > 0$ gibt derart, dass

$$J(u) \geq J(\tilde{u}) \text{ für alle } u \in X \text{ mit } \|u - \tilde{u}\| < \varepsilon. \quad (13.6)$$

- J hat ein lokales Maximum in $\tilde{u}$, wenn es $\varepsilon > 0$ gibt derart, dass

$$J(u) \leq J(\tilde{u}) \text{ für alle } u \in X \text{ mit } \|u - \tilde{u}\| < \varepsilon. \quad (13.7)$$

- J hat einen Sattelpunkt in $\tilde{u}$, wenn J in $\tilde{u}$ kein lokales Minimum und kein lokales Maximum hat.

Bemerkung 13.1.3 Ein Sattelpunkt in $\tilde{u}$ bedeutet also, dass $\tilde{u}$ die schwache Euler-Lagrange-Gleichung (13.5) erfüllt und es für jedes $\varepsilon > 0$ Funktionen $\bar{u}_\varepsilon$ und $\underline{u}_\varepsilon$ in X gibt mit $\|\bar{u}_\varepsilon - \tilde{u}\| < \varepsilon$ und $\|\underline{u}_\varepsilon - \tilde{u}\| < \varepsilon$ derart, dass

$$J(\underline{u}_\varepsilon) < J(u) < J(\bar{u}_\varepsilon).$$

Bemerkung 13.1.4 Für Funktionen von $\mathbb{R}$ oder $\mathbb{R}^2$ nach $\mathbb{R}$ kann man sich sofort vorstellen, was man unter einem lokalen Minimum, lokalen Maximum oder Sattelpunkt versteht. Funktionen auf höher dimensionalen Gebieten lassen sich mit Bildern schon schlechter darstellen. $J : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$ fängt sogar in dem unendlich dimensionalen Raum $W_0^{1,2}(\Omega)$ an.

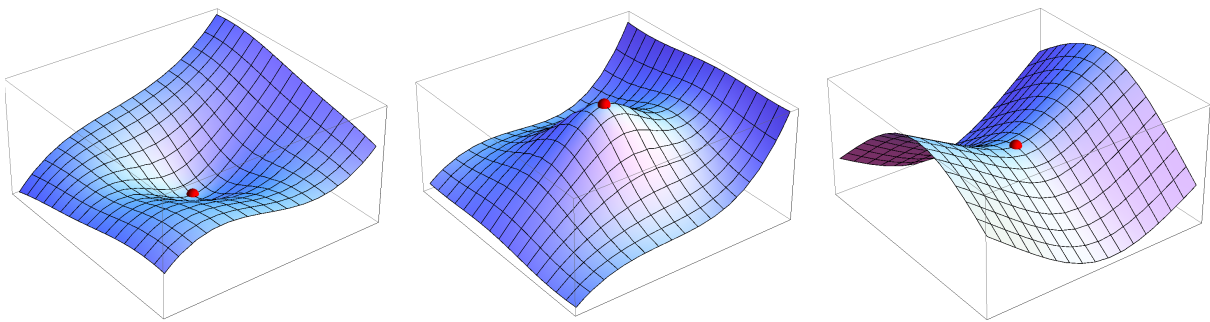


Abbildung 13.1: Lokales Minimum, lokales Maximum und Sattelpunkt für $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Wenn das Extremum lokal ist, findet man meistens auch noch einen Sattelpunkt in der Nähe.

13.2 Lokales Minimum

Das Minimierungsproblem

$$\min_{u \in W_0^{1,2}(\Omega)} \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 + \frac{1}{p+1} |u|^{p+1} - f u \right) dx$$

haben wir ausgiebig betrachtet. Was passiert, wenn man das Pluszeichen durch ein Minuszeichen ersetzt?

Schauen wir uns das Problem mal an:

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 - \frac{1}{p+1} |u|^{p+1} - f u \right) dx. \quad (13.8)$$

Wenn $p > 1$ kann man, jedenfalls für kleine f , ein lokales Minimum nahe bei $u = 0$ erwarten. Um genauer zu sein; wenn der Term $\frac{1}{p+1} |u|^{p+1}$ superlinear und subkritisch ist, dass heißt $p \in (1, \frac{n+2}{n-2})$, dann finden wir mit:

- der Poincaré-Friedrichs-Ungleichung $\|u\|_{L^2(\Omega)} \leq c_P \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}$ für alle $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$;
- der darausfolgenden Äquivalenz der Normen $\|\cdot\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} := \|\nabla \cdot\|_{L^2(\Omega)}$ und $\|\cdot\|_{W^{1,2}(\Omega)}$ auf $W_0^{1,2}(\Omega)$;

- der Gagliardo-Nirenberg-Sobolev-Ungleichung

$$\|u\|_{L^{p+1}(\Omega)} \leq c_S^* \|u\|_{W^{1,2}(\Omega)} \quad \text{für alle } u \in W^{1,2}(\Omega);$$

dass

$$J(u) \geq \frac{1}{2} \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}^2 - \frac{c_S}{p+1} \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}^{p+1} - c_P \|f\|_{L^2(\Omega)} \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} \quad (13.9)$$

$$J(u) \leq \frac{1}{2} \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}^2 + c_P \|f\|_{L^2(\Omega)} \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} \quad (13.10)$$

und damit hat man folgendes Bild für $u \mapsto J(u)$, wenn $\|f\|_{L^2(\Omega)}$ genügend klein ist. Grafisch ist es dargestellt in Abbildung 13.2. Im hellen Bereich könnte man ein Minimum vermuten.

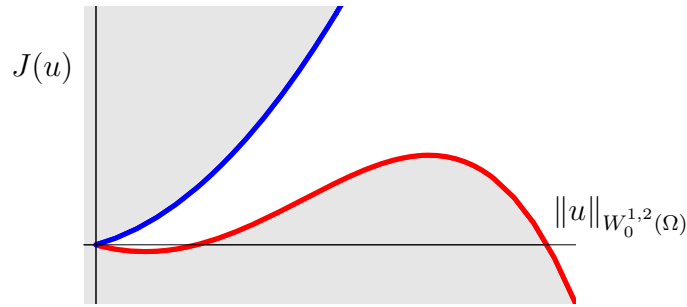


Abbildung 13.2: Obere und untere Schranke für $J(u)$.

Lemma 13.2.1 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet mit $n > 2$ und sei $1 < p < \frac{n+2}{n-2}$. Dann gibt es $\varepsilon > 0$ derart, dass das Funktional J , definiert in (13.8), für alle $f \in L^2(\Omega)$ mit $\|f\|_{L^2(\Omega)} < \varepsilon$ ein lokales Minimum hat.

Beweis. Wir betrachten die Funktion $g_t : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch

$$g_t(s) = \frac{1}{2} s^2 - \frac{c_S}{p+1} s^{p+1} - c_P t s.$$

Aus (13.9) folgt, dass $J(u) \geq g_t(\|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)})$ mit $t = \|f\|_{L^2(\Omega)}$. Man zeigt mit elementaren Methoden, dass g_0 ein lokales Maximum hat für $s = s_0 := \sqrt[p-1]{1/c_S}$. Nehmen wir $t \geq 0$ derart, dass

$$c_P t s_0 < g_0(s_0).$$

Also dann gilt $g_t(s_0) > 0$ und $s \mapsto g_t(s)$ hat ein positives Maximum in irgendeinem $s_t > 0$.

Weil $J(0) = 0$ gilt, bedeutet dies, dass für $\|f\|_{L^2(\Omega)} < \frac{g_0(s_0)}{c_P s_0}$ das Funktional J ein nicht-positives Infimum hat auf

$$\mathcal{B}_{s_0}(0) := \left\{ u \in W_0^{1,2}(\Omega) ; \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} < s_0 \right\}.$$

Dann gibt es eine minimierende Folge $\{u_m\}_{m \in \mathbb{N}}$ in $\mathcal{B}_{s_0}(0)$ und wegen des Theorems von Kakutani hat diese Folge eine schwach konvergente Teilfolge:

$$u_{m_k} \rightharpoonup \tilde{u} \text{ in } W_0^{1,2}(\Omega).$$

Die schwache Unterhalbfolgenstetigkeit von $u \mapsto \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2$ liefert, dass

$$s_0^2 \geq \lim_{m \rightarrow \infty} \|\nabla u_{m_k}\|_{L^2(\Omega)}^2 \geq \|\nabla \tilde{u}\|_{L^2(\Omega)}^2.$$

Weil die Einbettungen $W_0^{1,2}(\Omega) \subset W^{1,2}(\Omega) \hookrightarrow L^{p+1}(\Omega)$ kompakt sind für $p \in [1, \frac{n+2}{n-2})$, gibt es eine in $L^{p+1}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$ konvergente Teilfolge $\{u_{m_{k_\ell}}\}_{\ell \in \mathbb{N}}$. Und wenn man nochmals die schwache Unterhalbfolgenstetigkeit von $u \mapsto \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}^2$ verwendet, folgt

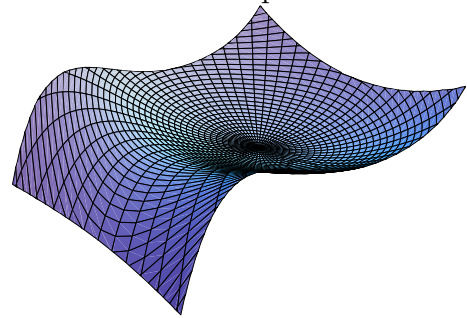
$$\lim_{\ell \rightarrow \infty} J(u_{m_{k_\ell}}) \geq J(\tilde{u}).$$

Weil das Infimum nicht positiv ist, folgt auch $J(\tilde{u}) \leq 0$. ■

13.3 Sattelpunktlösungen

Für (13.8) mit f genügend klein haben wir soeben ein lokales Minimum gefunden. Wie wir im Abbildung 13.1 schon angedeutet haben, findet man in der Nähe oft ein zweiter stationärer Punkt und der ist meistens kein Extremum sondern ein Sattelpunkt.

Beispiel 13.3.1 Das Funktional $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch $f(x, y) = x^2 + y^2 - \frac{2}{5}x^5$ hat zwei stationäre Stellen: $(0, 0)$ und $(1, 0)$. Die erste ist ein lokales Minimum und die zweite ein Sattelpunkt.



Um ein Ergebnis in dieser Richtung für unendlich dimensionale Banachräume mathematisch korrekt zu formulieren, werden wir erst die sogenannte Palais-Smale Bedingung formulieren.

Definition 13.3.2 Sei X ein Banachraum und $J \in C^1(X; \mathbb{R})$. Eine Folge $\{u_k\} \subset X$ heißt eine Palais-Smale-Folge für J , wenn

1. es $M \in \mathbb{R}$ gibt so, dass $|J(u_k)| \leq M$ für alle $k \in \mathbb{N}$, und
2. $\|\partial J(u_k; \cdot)\|_{X'} \rightarrow 0$ für $k \rightarrow \infty$.

Bedingung 13.3.3 Man sagt $J \in C^1(X; \mathbb{R})$ erfüllt die Palais-Smale-Bedingung, wenn jede Palais-Smale-Folge für J eine stark konvergente Teilfolge hat.

Die Palais-Smale Bedingung sorgt dafür, dass man bei Folgen, bei denen das Funktional gleichmäßig beschränkt ist und bei denen die Ableitung nach 0 geht, einen Limes finden kann. Das ist eigentlich genau das, dass die drei in Kapitel 11.1 genannten Hauptbestandteile liefern. Damit sieht man auch, dass es nicht der einfachste Schritt im Beweis sein wird, zu zeigen, dass diese Bedingung erfüllt ist.

Theorem 13.3.4 (Mountain-Pass Theorem von Ambrosetti-Rabinowitz [2])

Sei X ein Banachraum und nehme an $J \in C^1(X; \mathbb{R})$ erfüllt die Palais-Smale-Bedingung. Weiter sollen gelten:

1. $J(0) = 0$;
2. es gibt $\rho > 0$ und $\alpha > 0$ so, dass $J(u) \geq \alpha$ für $\|u\|_X = \rho$;
3. es gibt $u_1 \in X$ mit $\|u_1\|_X \geq \rho$ und $J(u_1) < \alpha$.

Definieren wir

$$\Gamma = \{\Phi \in C([0, 1]; X) ; \Phi(0) = 0 \text{ und } \Phi(1) = u_1\}. \quad (13.11)$$

Dann gibt es $\hat{u} \in X$ derartig, dass $\partial J(\hat{u}; \cdot) = 0$ und

$$J(\hat{u}) = \inf_{\Phi \in \Gamma} \sup_{t \in [0, 1]} J(\Phi(t)) \geq \alpha.$$

Bemerkung 13.3.5 Die erste und zweite Bedingung zeigen, dass $u \mapsto J(u)$ bei $u = 0$ eine Delle hat. Selbstverständlich findet man ein ähnliches Ergebnis, wenn die Delle um u_0 sitzt, mit $J(u_0) = h$ und $J(u) \geq \alpha + h$ für $\|u - u_0\|_X = \rho$.

Den Beweis werden wir hier nicht geben. Man findet ihn zum Beispiel im Buch von Struwe [15].

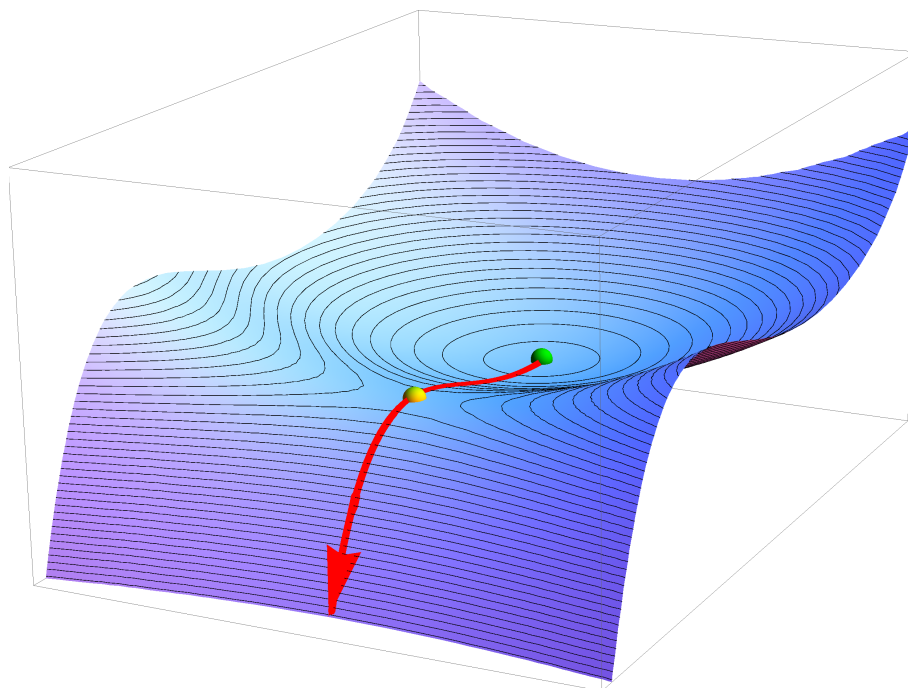


Abbildung 13.3: Vorstellung bei einem lokalen Minimum mit einem “Mountain-Pass”.

Die Palais-Smale-Bedingung bedeutet, dass bei einer Folge von Funktionen, bei denen das Funktional J lokal immer „flacher“ wird, die Funktionen nicht nach ∞ abhauen können. Die Darstellung eines Funktional, bei dem diese Bedingung nicht erfüllt ist, findet man in Abbildung 13.4.

13.4 Numerische Approximierungen

13.4.1 Konstruktive Approximationen beim Minimum

Wenn $f \in C^1(\mathbb{R}^n; \mathbb{R})$ als einzigen stationären Punkt ein Minimum hat, können wir wie folgt vorgehen, um dieses Minimum zu finden:

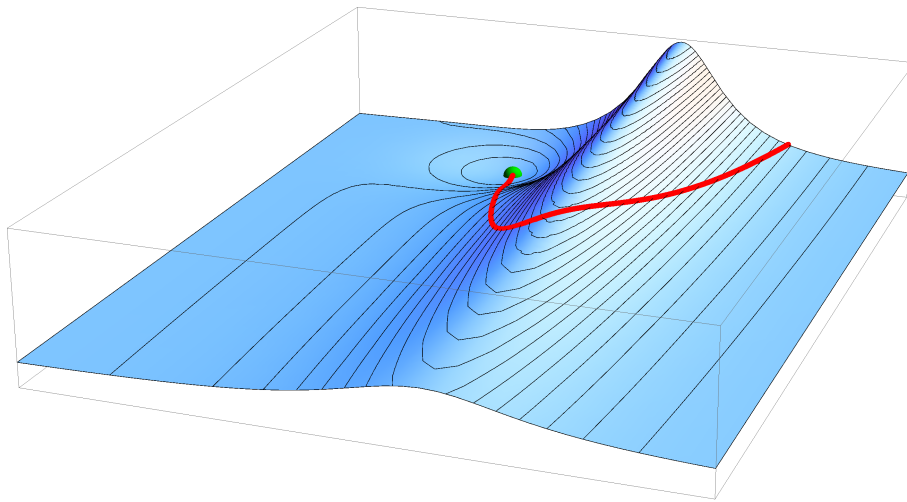


Abbildung 13.4: In $\mathbb{R}^2$ führt nicht über jeden Bergrücken ein Pass.

1. Nehme eine Stelle x_0 , am liebsten in der Nähe des Minimums.
2. Wenn $\nabla f(x_0) = 0$ gilt, ist x_0 das Minimum. Wenn $\nabla f(x_0) \neq 0$, dann wird $f(x)$ kleiner, wenn man in die Richtung $-\nabla f(x_0)$ geht. Das heißt, wenn man das Anfangswertproblem für das System gewöhnlicher Differentialgleichungen betrachtet

$$\begin{cases} x'(t) = -\nabla f(x(t)) & t \in \mathbb{R}^+, \\ x(0) = x_0, \end{cases} \quad (13.12)$$

dann wird $x(t)$ für $t \rightarrow \infty$ zu einer Stelle $x_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t)$ führen mit $\nabla f(x_\infty) = 0$ und diese Stelle wird das Minimum sein.

Numerisch kann man die Schritte bezüglich t wie folgt diskretisieren:

$$\frac{x(t + \varepsilon) - x(t)}{\varepsilon} = -\nabla f(x(t)).$$

Für $0 < \varepsilon$ genügend klein und $x_n := x(n\varepsilon)$ führt dies zum folgenden Rezept:

Algorithmus 1 für ein Minimum von f . Wähle $\varepsilon > 0$ genügend klein.

1. Nehme eine Stelle x_0 , am liebsten in der Nähe des Minimums.
2. Berechne iterativ $x_{n+1} = x_n - \varepsilon \nabla f(x_n)$ für $n \in \mathbb{N}$.

Das Minimum wird approximiert durch x_n für n genügend gross.

Abbildung 13.5 stellt einen solchen Vorgang dar.

Man kann das gleiche Rezept anwenden, um ein lokales Minimum zu finden, wenn man genügend nahe am Minimum anfängt.

Für $J \in C^1(W_{(0)}^{1,2}(\Omega); \mathbb{R})$ kann man ähnlich vorgehen. Sei $G \in C^1(\mathbb{R}; \mathbb{R})$ und definiere $J : W_{(0)}^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 + G(u) \right) dx.$$

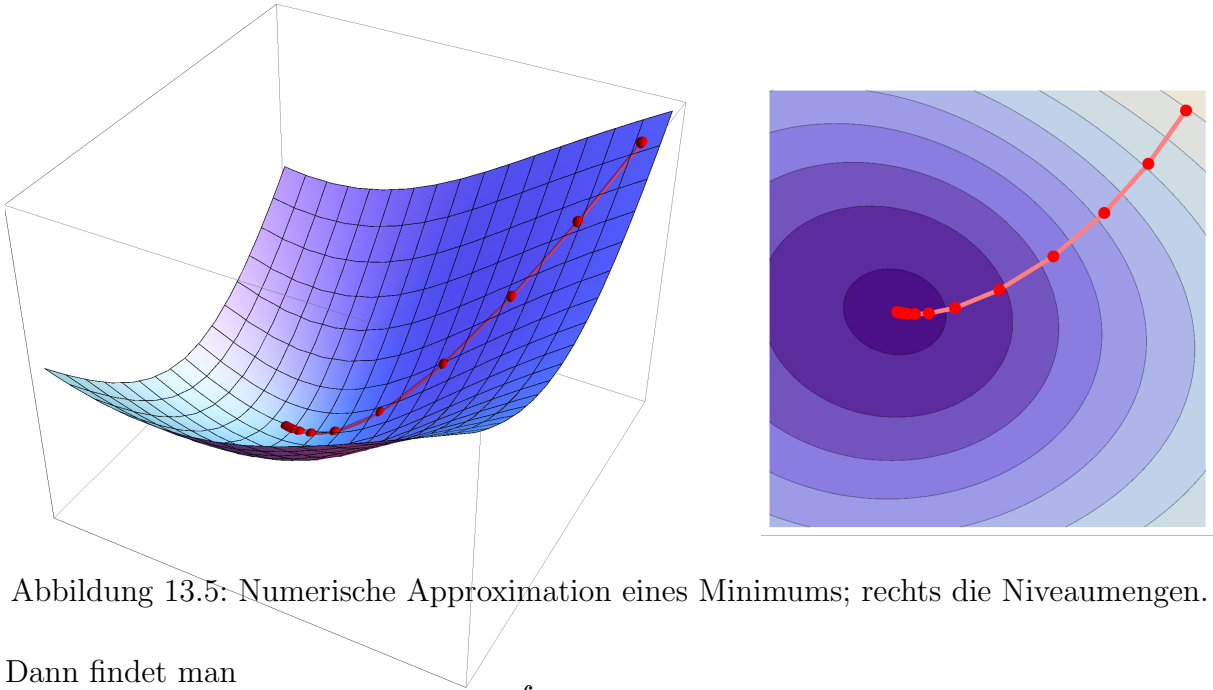


Abbildung 13.5: Numerische Approximation eines Minimums; rechts die Niveaumengen.

Dann findet man

$$\partial J(u; \varphi) = \int_{\Omega} (\nabla u \cdot \nabla \varphi + G_u(u) \varphi) dx.$$

Weil $W^{1,2}(\Omega)$ und $W_0^{1,2}(\Omega)$ Hilberträume sind, kann man $\partial J(u; \cdot) \in \left(W_{(0)}^{1,2}(\Omega)\right)'$ auch auffassen als Element von $W_{(0)}^{1,2}(\Omega)$. Das heißt, es gibt $w_u \in W_{(0)}^{1,2}(\Omega)$ derart, dass

$$\partial J(u; \varphi) = \langle w_u, \varphi \rangle.$$

Für $W_{(0)}^{1,2}(\Omega)$ hat man

$$\langle w, \varphi \rangle := \int_{\Omega} (\nabla w \cdot \nabla \varphi + w \varphi) dx.$$

Für $W_0^{1,2}(\Omega)$ kann man übrigens auch $\langle w, \varphi \rangle := \int_{\Omega} \nabla w \cdot \nabla \varphi dx$ benutzen.

Man approximiert nun wie folgt:

1. Man nehme eine geschickte Anfangsfunktion $u_0 \in W_{(0)}^{1,2}(\Omega)$.
2. Man berechnet iterativ $u_{n+1} := u_n - \varepsilon w_{u_n}$ für $n \in \mathbb{N}$.

Für Schritt 2 müssen wir also die folgende lineare Euler-Lagrange Gleichung in w lösen:

$$\int_{\Omega} (\nabla w \cdot \nabla \varphi + w \varphi) dx = \int_{\Omega} (\nabla u \cdot \nabla \varphi + G_u(u) \varphi) dx. \quad (13.13)$$

Wir finden durch partielle Integration formell, dass

- für $W^{1,2}(\Omega)$:

$$\begin{cases} -\Delta w + w = -\Delta u + G_u(u) & \text{in } \Omega, \\ \frac{\partial w}{\partial n} = 0 & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases} \quad (13.14)$$

- und für $W_0^{1,2}(\Omega)$:

$$\begin{cases} -\Delta w + w = -\Delta u + G_u(u) & \text{in } \Omega, \\ w = 0 & \text{auf } \partial\Omega, \end{cases} \quad (13.15)$$

Übrigens werden die Lösungen dieser linearen Randwertprobleme numerisch approximiert durch zum Beispiel die Finite-Elemente-Methode. Diese Methode basiert auf eine Diskretisierung von (13.13) und benutzt nicht die starke Formulierung in (13.14) oder (13.15).

13.4.2 Konstruktive Approximationen beim Sattelpunkt

Man verwendet die Idee, die auch hinter dem Theorem von Ambrosetti-Rabinowitz steckt. Das heißt, man berechnet erstens das lokale Minimum $x_{\min}$ und sucht eine Sphäre $B_\rho(x_{\min})$ derart, dass $f(x) > f(x_{\min}) + \alpha$ für alle $x \in \partial B_\rho(x_{\min})$. Als nächstes sucht man eine Funktion $x_{\text{test}} \notin B_\rho(x_{\min})$ mit $f(x_{\text{test}}) < f(x_{\min}) + \alpha$. Statt Punkte benutzt man diesmal Kurven. Man fängt an mit dem Polygonzug $[x_{\min}, x_{\text{test}}]$ oder genauer gesagt:

$$k_0(s) = (1-s)x_{\min} + sx_{\text{test}} \text{ für } s \in [0, 1],$$

und lässt jeder Punkt auf dieser Kurve sich ändern durch die Differentialgleichung in (13.12), das heißt

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} k(t, s) = -\nabla f(k(t, s)) & t \in \mathbb{R}^+, \\ k(t, s) = k_0(s). \end{cases} \quad (13.16)$$

Berechnet man für jedes $t \in \mathbb{R}^+$ anschließend die Stelle auf $s \mapsto k(t, s)$, wo $f|_{x \in \{k(t, s); s \in [0, 1]\}}$ ihr Maximum annimmt, sagen wir in $s(t)$, dann sollte man den Sattelpunkt wie folgt finden können:

$$x_{\text{sattel}} = \lim_{t \rightarrow \infty} k(t, s(t)).$$

Eine ganze Kurve numerisch zu modifizieren, wie (13.16) vorschreibt, ist sehr aufwendig. Es reicht, wenn man so etwas nur macht an der Stelle auf der Kurve, wo f maximal ist. Statt mit Kurven kann man sogar mit Polygonzügen arbeiten.

Algorithmus 2 für einen Sattelpunkt von f . Sei $x_{\min}$ ein lokales Minimum.

1. Finde x_{test} mit $f(x_{\text{test}}) < f(x_{\min})$ und fixiere den Polygonzug

$$P_0 = [x_{\min}, x_{\text{test}}].$$

2. Sei $P_n = [x_{\min} = x_0^n, x_1^n, \dots, x_k^n, x_{k+1}^n = x_{\text{test}}]$ ein Polygonzug.
Berechne $y^n \in P_n$ derart, dass

$$f(y^n) = \max \{f(x); x \in P_n\},$$

setze $p^n = y^n - \varepsilon \nabla f(y^n)$ und definiere P_{n+1} durch

$$P_{n+1} = \begin{cases} [x_0^n, \dots, x_m^n, p^n, x_{m+1}^n, \dots, x_{k+1}^n] & \text{wenn } y^n \in (x_m^n, x_{m+1}^n), \\ [x_0^n, \dots, x_{m-1}^n, p^n, x_{m+1}^n, \dots, x_{k+1}^n] & \text{wenn } y^n = x_m^n. \end{cases}$$

Für n genügend gross, sollte y^n einen Sattelpunkt approximieren.

Eine Skizze einer solchen Approximation eines Sattelpunktes findet man in Abbildung 13.4.2. Der Punkt y^n ist jeweils in rot dargestellt und der Punkt p^n in grün. Ein blauer Pfeil markiert die Richtung der Verschiebung y^n nach p^n .

Bemerkung 13.4.1 Wenn $y^n \in (x_m^n, x_{m+1}^n)$ gilt, dann folgt, weil f , eingeschränkt auf $[x_m^n, x_{m+1}^n]$, in y^n ein Maximum hat und weil f differenzierbar ist, dass

$$\nabla f(y^n) \cdot (x_{m+1}^n - x_m^n) = 0.$$

Anders gesagt, für die neue Stelle $p^n = y^n - \varepsilon \nabla f(y^n)$ gilt

$$(p^n - y^n) \perp (x_{m+1}^n - x_m^n).$$

Eine Darstellung zu diesem Vorgehen findet man in Abbildung 13.4.2. Die Folge $\{y^n\}_{n \in \mathbb{N}}$ soll den Sattelpunkt approximieren und das scheint in dieser Abbildung der Fall zu sein.

13.5 Ein subkritisches superlineares Problem

Die Anwendung von Theorem 13.3.4 auf

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u(x)|^2 - G(x, u(x)) \right) dx. \quad (13.17)$$

sieht dann wie folgt aus.

Theorem 13.5.1 Sei Ω ein beschränktes Gebiet in $\mathbb{R}^n$ und $G(x, u) = \int_0^u g(x, s) ds$ mit $g \in C(\bar{\Omega} \times \mathbb{R})$. Nehme an, die folgenden Bedingungen sind erfüllt:

1. $\limsup_{u \rightarrow 0} u^{-1} g(x, u) \leq 0$ gleichmäßig in $x \in \Omega$;
2. es gibt $C \in \mathbb{R}$ und $p < \frac{n+2}{n-2}$ so, dass $|g(x, u)| \leq C(1 + |u|^p)$ für alle $(x, u) \in \bar{\Omega} \times \mathbb{R}$;
3. es gibt $q > 2$ und $R \in \mathbb{R}$ so, dass $0 \leq qG(x, u) \leq ug(x, u)$ für alle $(x, u) \in \bar{\Omega} \times \mathbb{R}$ mit $|u| \geq R$.

Dann hat (13.17) einen “Mountain-Pass” $\hat{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)$, dass heißt

$$\int_{\Omega} (\nabla \hat{u}(x) \cdot \nabla \varphi(x) - g(x, \hat{u}(x)) \varphi(x)) dx = 0 \text{ für alle } \varphi \in W_0^{1,2}(\Omega)$$

und

$$J(\hat{u}) = \inf_{\Phi \in \Gamma} \sup_{t \in [0,1]} J(\Phi(t)) > 0$$

für eine geschickt gewählte Kurvenmenge Γ (eigentlich wählt man u_1) wie in (13.11).

Bemerkung 13.5.2 Die drei Bedingungen lassen sich wie folgt beschreiben.

1. Die erste Bedingung sorgt dafür, dass der quadratische Term in der Nähe von 0 bestimmend ist und für eine Delle sorgt.
2. Die zweite Bedingung sorgt dafür, dass die Wachstumsrate von der Nichtlinearität subkritisch ist.
3. Die dritte Bedingung sorgt dafür, dass die Nichtlinearität stärker als quadratisch wächst für große u und bedeutet, dass die Nichtlinearität im dazu gehörenden Randwertproblem superlinear ist.

Aufgabe 36 Zeigen Sie, dass unter den Bedingungen in Theorem 13.5.1 die 0-Funktion ein lokales Minimum für (13.17) liefert.

Aufgabe 37 Beweisen Sie dieses Theorem.

Aufgabe 38 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet und betrachte

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 - \frac{1}{p+1} |u|^{p+1} - f u \right) dx, \quad (13.18)$$

wenn $\|f\|_{L^\infty(\Omega)}$ genügend klein ist. Zeigen Sie, dass die Euler-Lagrange Gleichung für $J : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$ aus (13.18) zwei Lösungen hat für solche $\|f\|_{L^\infty(\Omega)}$.

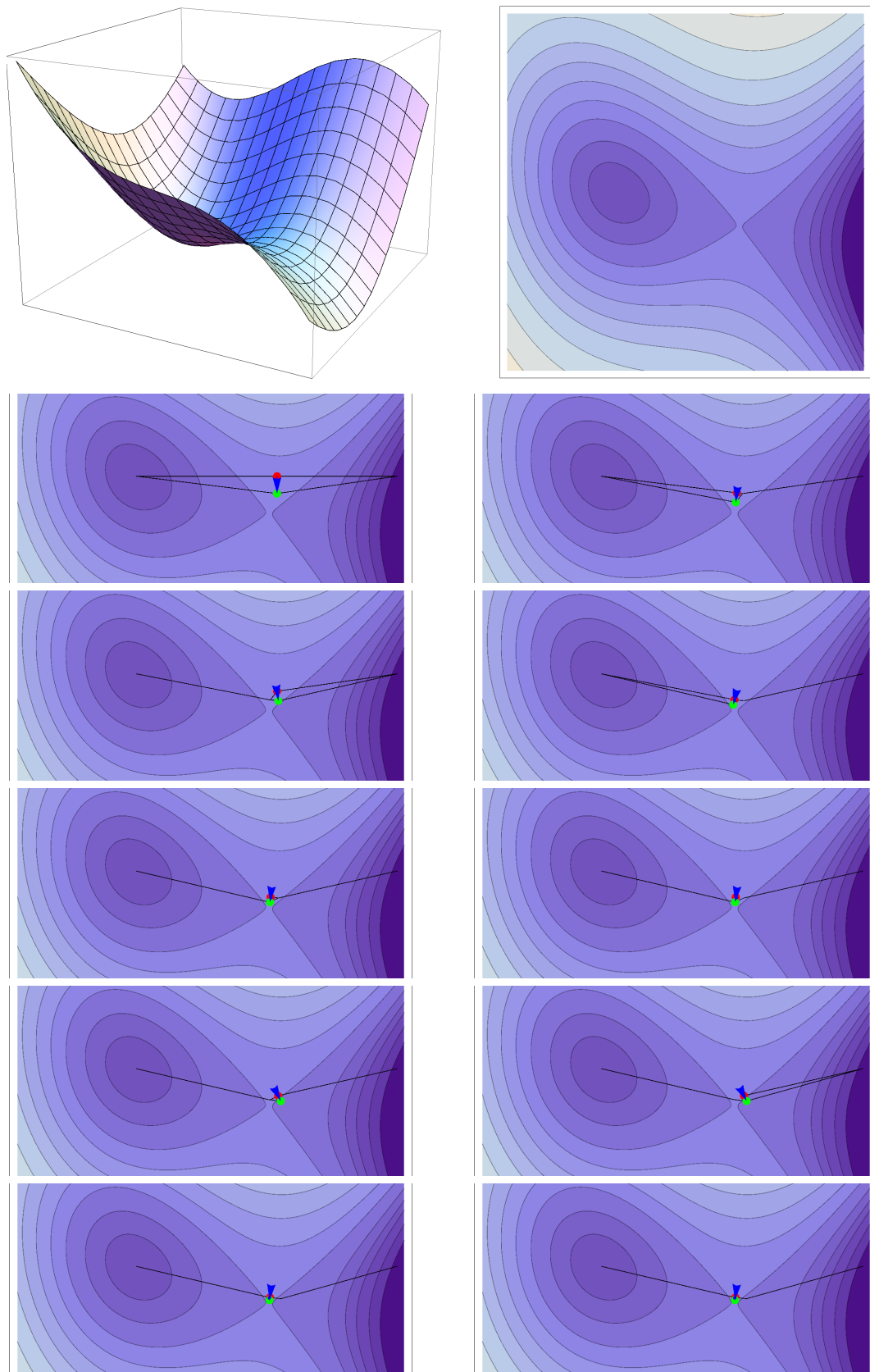


Abbildung 13.6: Darstellung einer Funktion mit Minimum und Sattelpunkt; oben rechts die Niveaumengen; unten eine Approximation des Sattelpunktes durch Algorithmus 2.

Variationsrechnung

Kapitel 14



Regularität

14.1 Einleitung

Beweise von Regularitätssätzen sind meistens sehr aufwendig. Wir möchten uns gerne beschränken auf das Funktional $J : W_0^{1,2}(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} |\nabla u|^2 - f u \right) dx. \quad (14.1)$$

Die volle Regularität läßt sich aber nur beweisen, wenn wir die Sache etwas allgemeiner angehen. Wir werden uns aber beschränken auf Funktionale, bei denen das Randwertproblem aus der Euler-Lagrange Gleichung linear und gleichmäßig elliptisch von zweiter Ordnung ist. Wir geben schon mal, noch ohne Beweis, das Ergebnis für (14.1).

Theorem 14.1.1 *Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet mit $\partial\Omega \in C^{k+2}$ und $k \in \mathbb{N}$. Sei $\tilde{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)$ das Minimum für J in (14.1) bei $f \in L^2(\Omega)$. Dann gilt folgendes:*

- Wenn $f \in W^{k,2}(\Omega)$, dann gilt $\tilde{u} \in W^{k+2,2}(\Omega)$.
- Es gibt $c(\Omega, k) \in \mathbb{R}^+$ derart, dass

$$\|\tilde{u}\|_{W^{k+2,2}(\Omega)} \leq c(\Omega, k) \|f\|_{W^{k,2}(\Omega)} \quad \text{für alle } f \in W^{k,2}(\Omega).$$

An der Formulierung sieht man schon, dass der Rand eine wichtige Rolle spielt. Der Beweis dieses Theorems enthält mehrere Teilbeweise. Das Verhalten im Innern des Gebietes und das Verhalten am Rande wird getrennt betrachtet. Im Innern wird verfahren wie auf $\mathbb{R}^n$. Der Rand wird mit einer Zerlegung der Eins in mehrere Stücke verteilt, jedes Stück wird flachgebügelt wie in Kapitel 8, und anschließend wird Regularität auf dem Halbraum bewiesen. Dieses Bügeln hat aber zur Folge, dass der zugrundeliegende elliptische Differentialoperator sich ändert.

Der transformierte Differentialoperator bleibt zwar elliptisch, aber das zugehörige Funktional wird durch die Transformation $x \mapsto y(x)$ und $u(x) = w(y(x))$:

$$\tilde{J}(w) = \int_{\tilde{\Omega}} \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \left(\sum_{k=1}^n \frac{\partial y_i}{\partial x_k} \frac{\partial y_j}{\partial x_k} \right) \frac{\partial w}{\partial y_i} \frac{\partial w}{\partial y_j} - \tilde{f} w \right) \left| \det \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right) \right|^{-1} dy. \quad (14.2)$$

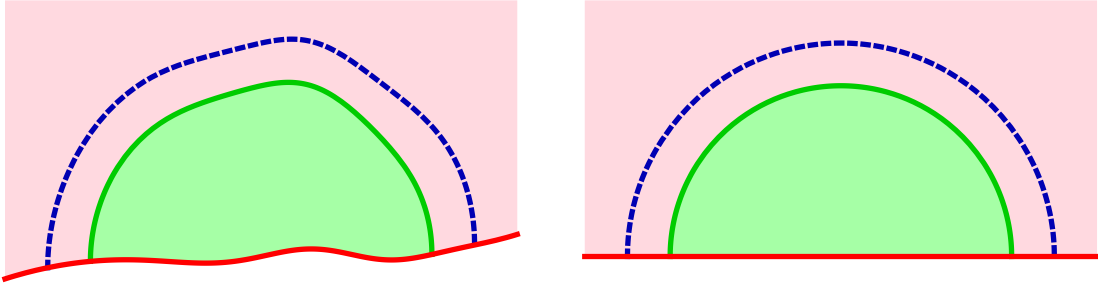


Abbildung 14.1: Transformation zur Halbkugel

Bei einer $C^1(\bar{\Omega})$ -Transformation gilt $w \in W_0^{1,2}(\Omega)$ genau dann, wenn $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ erfüllt ist.

Weil man sich also notwendigerweise mit allgemeineren elliptischen Operatoren beschäftigen muss, werden wir kurz dazu Stellung nehmen.

Statt die schwache Form der Euler-Lagrange-Gleichung für (14.1) werden wir die folgende Gleichung betrachten:

$$\int_{\Omega} (a^{ij} \partial_i u \partial_j \varphi + b^j u \partial_j \varphi - c^i \partial_i u \varphi - d u \varphi) dx = \int_{\Omega} f \varphi dx \text{ für alle } \varphi \in W_0^{1,2}(\Omega). \quad (14.3)$$

Wir verwenden die Summenkonvention aus der Physik:

$$a^{ij} \partial_i u \partial_j \varphi := \sum_{i,j=1}^n a^{ij} \partial_i u \partial_j \varphi \text{ usw.}$$

Wenn die Funktion u in (14.3) sogar in $W^{2,2}(\Omega) \cap W_0^{1,2}(\Omega)$ liegt, dann folgt

$$\partial_j (a^{ij} \partial_i u) - \partial_j (b^j u) - c^i \partial_i u - d u = f \text{ in } \Omega.$$

Schaut man diese Gleichung an, dann sieht man, dass wir einige Annahmen bezüglich der Koeffizienten brauchen. Diese Konditionen fassen wir zusammen in der folgende Bedingung, wobei wir k später bestimmen werden.

Bedingung 14.1.2 Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes offenes Gebiet. Für gegebenes $k \in \mathbb{N}$ sei folgendes erfüllt:

1. Der Rand ist genügend glatt: $\partial\Omega \in C^k$.
2. Die Koeffizienten sind genügend regulär: $a^{ij}, b^j \in C^{k+1}(\bar{\Omega})$ und $c^{ij}, d \in C^k(\bar{\Omega})$.
3. Der Differentialoperator ist gleichmäßig elliptisch: es gibt $\lambda > 0$ derart, dass

$$\sum_{i,j=1}^n a^{ij} \xi_i \xi_j \geq \lambda |\xi|^2 \text{ für alle } \xi \in \mathbb{R}^n \text{ und } x \in \bar{\Omega}. \quad (14.4)$$

Mit diesen Bedingungen folgt noch nicht die Existenz oder die Eindeutigkeit einer Lösung.

Lemma 14.1.3 Nehme an, Bedingung 14.1.2 ist erfüllt für $k = 0$ und $f \in L^2(\Omega)$. Dann existiert $\mu \in \mathbb{R}$ derart, dass es für jedes d , für das

$$d(x) \leq -\mu \text{ gilt für alle } x \in \bar{\Omega}, \quad (14.5)$$

genau eine Funktion $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ gibt, die (14.3) erfüllt. Außerdem gibt es ein $C = C(\lambda, a_{ij}, b^j, c_i, d, \Omega)$ so, dass

$$\|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} \leq C \|f\|_{L^2(\Omega)}.$$

Bemerkung 14.1.4 Im Fall, dass

$$\int_{\Omega} (b^j \partial_j \varphi - d) dx \geq 0 \text{ für alle } 0 \leq \varphi \in W_0^{1,2}(\Omega)$$

erfüllt ist, kann man zeigen, dass $\mu = 0$ passend ist.

Beweis. Eine Ungleichung von Poincaré (Theorem 7.4.5) sagt, dass wir $\|\cdot\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}$ als Norm nehmen können. Zur Erinnerung:

$$\|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} := \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}.$$

Weiter benutzen wir das Theorem von Lax-Milgram (Theorem 7.6.2) und setzen dazu als Bilinearform:

$$B(u, v) = \int_{\Omega} (a^{ij} \partial_i u \partial_j v + b^j u \partial_j v - c^i \partial_i u v - d u v) dx.$$

Aus Bedingung 14.1.2.2 folgt die Beschränktheit:

$$|B(u, v)| \leq M \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} \|v\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} \leq MC_P^2 \|u\|_{W_0^{1,2}(\Omega)} \|v\|_{W_0^{1,2}(\Omega)}.$$

Aus Bedingung 14.1.2.1 folgt

$$\int_{\Omega} a^{ij} \partial_i u \partial_j u dx \geq \lambda \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2.$$

Weiter hat man

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (b^j u \partial_j u - c^i \partial_i u u) dx &\geq -\|b\| + \|c\|_{L^\infty(\Omega)} \|u\|_{L^2(\Omega)} \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)} \\ &\geq -\frac{1}{2} \|\|b\| + \|c\|\|_{L^\infty(\Omega)} \left(\varepsilon^{-1} \|u\|_{L^2(\Omega)}^2 + \varepsilon \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2 \right) \end{aligned}$$

und

$$\int_{\Omega} -d u u dx \geq \mu \|u\|_{L^2(\Omega)}^2.$$

Wir nehmen

$$\varepsilon = \|\|b\| + \|c\|\|_{L^\infty(\Omega)}^{-1} \lambda$$

und können anschließend μ so wählen, dass die Koerzitivitätsbedingung an B erfüllt ist:

$$B(u, u) \geq \frac{1}{2} \lambda \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2 + \left(\mu - \frac{1}{2} \|\|b\| + \|c\|\|_{L^\infty(\Omega)}^2 \lambda^{-1} \right) \|u\|_{L^2(\Omega)}^2 \geq \beta \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2. \quad (14.6)$$

Für $f \in L^2(\Omega)$ gilt $v \mapsto \int_{\Omega} f v dx \in (W_0^{1,2}(\Omega))'$ und es folgt aus Lax-Milgram, dass es genau eine Funktion $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ gibt, die die Gleichung

$$B(u, v) = \int_{\Omega} f v dx \text{ für alle } v \in W_0^{1,2}(\Omega) \quad (14.7)$$

erfüllt. Weil (14.7) nichts anderes als (14.3) ist, ist hiermit Existenz und Eindeutigkeit bewiesen.

Aus (14.6) und

$$\left| \int_{\Omega} f u dx \right| \leq \|f\|_{L^2(\Omega)} \|u\|_{L^2(\Omega)} \leq C_P \|f\|_{L^2(\Omega)} \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}$$

folgt die Abschätzung $\|\nabla u\|_{L^2(\Omega)} \leq \frac{C_P}{\beta} \|f\|_{L^2(\Omega)}$. ■

14.2 Regularität im Innern

Die Ergebnisse werden wir nur für $p = 2$ beweisen. Ähnliche Ergebnisse sind jedoch auch gültig für $p \in (1, \infty)$.

Theorem 14.2.1 (Regularität im Innern) *Sei $f \in L^2(\Omega)$ und nehme an, Bedingung 14.1.2 2 und 3 sind erfüllt für $k = 0$. Sei $u \in W^{1,2}(\Omega)$ eine Funktion, die (14.3) erfüllt, und sei Ω_s ein Teilgebiet von Ω mit $\bar{\Omega}_s \subset \Omega$. Dann gilt:*

1. $u \in W^{2,2}(\Omega_s)$;
2. es gibt $C = C(\Omega, \Omega_s)$ derart, dass

$$\|u\|_{W^{2,2}(\Omega_s)} \leq C \left(\|f\|_{L^2(\Omega)} + \|u\|_{L^2(\Omega)} \right). \quad (14.8)$$

Bemerkung 14.2.2 *Die Annahmen $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ braucht man nicht für die innere Regularität. Wenn aber $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ gilt und Lemma 14.1.3 zutrifft, dann findet man statt (14.8) sogar*

$$\|u\|_{W^{2,2}(\Omega_s)} \leq \tilde{C} \|f\|_{L^2(\Omega)}. \quad (14.9)$$

Bevor wir dieses Theorem beweisen können, brauchen wir eine passende Approximation der Ableitung. Dafür benutzen wir

$$D_\ell^h(u)(x) = \frac{u(x + he_\ell) - u(x)}{h} \quad (14.10)$$

und

$$D^h(u)(x) = (D_1^h(u)(x), \dots, D_n^h(u)(x)).$$

Wenn $u \in W^{k,p}(\mathbb{R}^n)$, dann gilt auch $D_\ell^h(u) \in W^{k,p}(\mathbb{R}^n)$. Dieser Differenzoperator hat ähnliche Eigenschaften wie der Differentialoperator:

- Er ist linear:

$$D_\ell^h(c_1 u + c_2 v)(x) = c_1 D_\ell^h(u)(x) + c_2 D_\ell^h(v)(x).$$

- Es gibt eine Produktregel:

$$\begin{aligned} D_\ell^h(uv)(x) &= D_\ell^h(u)(x) v(x + he_\ell) + u(x) D_\ell^h(v)(x) = \\ &= D_\ell^h(u)(x) v(x) + u(x + he_\ell) D_\ell^h(v)(x). \end{aligned}$$

Wenn $u \in W^{k,p}(\Omega)$, $\Omega_s \subset \Omega$ gilt und d_0 wie folgt ist:

$$d_0 := \inf \{|x - y|; x \in \Omega_s, y \notin \Omega\} > 0, \quad (14.11)$$

dann gilt für $0 < |h| < d_0$, dass $D_\ell^h(u) \in W^{k,p}(\Omega_s)$.

Proposition 14.2.3 *Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein beschränktes Gebiet, sei $\bar{\Omega}_s \subset \Omega$ und $u \in L^2(\Omega)$.*

1. Wenn außerdem $u \in W^{1,2}(\Omega)$, dann gilt für $h \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ mit $|h| < d_0$,

$$\|D^h(u)\|_{L^2(\Omega_s)} \leq \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}. \quad (14.12)$$

2. Wenn es $C \in \mathbb{R}$ und $\varepsilon > 0$ gibt derart, dass $\|D^h(u)\|_{L^2(\Omega_s)} \leq C$ für alle $h \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ mit $|h| < \varepsilon$, dann gilt $u \in W^{1,2}(\Omega_s)$ und

$$\|\nabla u\|_{L^2(\Omega_s)} \leq C.$$

Beweis. 1. Sei $u \in C^1(\overline{\Omega})$. Man findet

$$D_\ell^h(u)(x) = \frac{u(x + he_\ell) - u(x)}{h} = \frac{\int_0^1 \frac{\partial}{\partial t} u(x + hte_\ell) dt}{h} = \int_0^1 \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(x + hte_\ell) dt$$

und es folgt mit Cauchy-Schwarz, dass

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(x + hte_\ell) dt &\leq \left(\int_0^1 1 dt \right)^{1/2} \left(\int_0^1 \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(x + hte_\ell) \right|^2 dt \right)^{1/2} = \\ &= \left(\int_0^1 \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(x + hte_\ell) \right|^2 dt \right)^{1/2}. \end{aligned}$$

Also gilt

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_s} |D_\ell^h(u)(x)|^2 dx &\leq \int_{\Omega_s} \int_0^1 \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(x + hte_\ell) \right|^2 dt dx = \\ &= \int_0^1 \int_{\Omega_s - hte_\ell} \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) \right|^2 dy dt \leq \\ &\leq \int_0^1 \int_{\Omega} \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) \right|^2 dy dt = \int_{\Omega} \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) \right|^2 dy. \end{aligned}$$

2. Wegen $\|D^h(u)\|_{L^2(\Omega_s)} \leq C$ folgt, dass es ein Folge $h_k \downarrow 0$ gibt derart, dass $D_\ell^{h_k}(u)$ schwach konvergent ist. Sagen wir $D_\ell^{h_k}(u) \rightharpoonup v_\ell \in L^2(\Omega_s)$. Wir werden zeigen, dass die v_ℓ auf Ω_s die schwache Ableitungen von u sind.

Funktionen $\varphi \in C_c^\infty(\Omega_s)$ können wir außerhalb von Ω_s durch 0 fortsetzen. Wir dürfen also annehmen, dass $\varphi \in C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$. Dann folgt für $|h| < d_0$, dass

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} D_\ell^h(u)(x) \varphi(x) dx &= \frac{1}{h} \left(\int_{\Omega_s} u(x + he_\ell) \varphi(x) dx - \int_{\Omega_s} u(x) \varphi(x) dx \right) = \\ &= \frac{1}{h} \left(\int_{\Omega_s + he_\ell} u(x) \varphi(x - he_\ell) dx - \int_{\Omega_s} u(x) \varphi(x) dx \right) = \\ &= - \int_{\Omega} u(x) D_\ell^{-h}(\varphi)(x) dx, \end{aligned} \tag{14.13}$$

und dass

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} v_\ell(x) \varphi(x) dx &= \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega} D_\ell^{h_k}(u)(x) \varphi(x) dx = \\ &= - \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega} u(x) D_\ell^{-h_k}(\varphi)(x) dx = - \int_{\Omega} u(x) \frac{\partial \varphi}{\partial x_\ell}(x) dx. \end{aligned}$$

Das heißt, dass $v_\ell \in L^2(\Omega_s)$ die schwache Ableitung von u in der x_ℓ -Richtung ist, und dass $u \in W^{1,2}(\Omega_s)$. Weiter folgt

$$\begin{aligned} & \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega_s} \left| D_\ell^{h_k}(u)(x) \right|^2 dy = \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega_s} \left(\left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) - D_\ell^{h_k}(u)(x) \right|^2 + 2 \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) D_\ell^{h_k}(u)(x) - \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) \right|^2 \right) dy \geq \\ &\geq \lim_{k \rightarrow \infty} 2 \int_{\Omega_s} \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) D_\ell^{h_k}(u)(x) dy - \int_{\Omega_s} \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) \right|^2 dy = \int_{\Omega_s} \left| \frac{\partial u}{\partial x_\ell}(y) \right|^2 dy \end{aligned}$$

und die letzte Aussage. ■

Beweis von Theorem 14.2.1. 1. Statt (14.7) betrachten wir

$$\int_{\Omega} a^{ij} \partial_i u \partial_j v \, dx = \int_{\Omega} \tilde{f} v \, dx \quad (14.14)$$

mit

$$\tilde{f} = f + \partial_j (b^j u) + c^i \partial_i u + d u. \quad (14.15)$$

Dazu haben wir partiell integriert: $\int_{\Omega} -b^j u \partial_j v \, dx = \int_{\Omega} \partial_j (b^j u) v \, dx$ für $u \in W^{1,2}(\Omega)$ und $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$. Unter anderem aus $u \in W^{1,2}(\Omega)$ und $b^j \in C^1(\bar{\Omega})$ folgt $\tilde{f} \in L^2(\Omega)$.

2. Wir haben angenommen $\bar{\Omega}_s \subset \Omega$. Weil Ω beschränkt ist folgt $d_0 > 0$. Definiere $\zeta \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$ so, dass

$$\begin{aligned} 0 &\leq \zeta(x) \leq 1 && \text{für } x \in \mathbb{R}^n, \\ \zeta(x) &= 1 && \text{für } x \in \Omega_s, \\ \zeta(x) &= 0 && \text{wenn } d(x, \Omega_s) \geq \frac{1}{2}d_0. \end{aligned}$$

Für später definieren wir noch $\Omega_{s^*} = \{x \in \Omega; d(x, \Omega_s) < \frac{1}{2}d_0\}$.

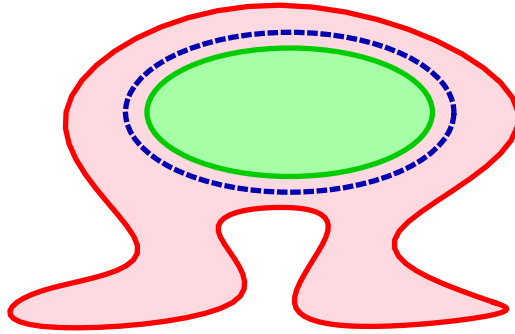


Abbildung 14.2: $\Omega_s \subset \Omega_{s^*} \subset \Omega$

3. Sei $D_\ell^h(u)$ wie in (14.10). Der große Trick ist es in (14.14) die folgende Funktion einzusetzen:

$$v = D_\ell^{-h} (\zeta^2 D_\ell^h(u)).$$

Wenn $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ gilt, dann folgt nicht, dass $D_\ell^h u \in W_0^{1,2}(\Omega)$. Wenn man ζ^2 hereinschiebt, dann folgt aber schon für $|h| \leq \frac{1}{2}d_0$, dass $\zeta^2 D_\ell^h u \in W^{1,2}(\Omega)$ und auch $D_\ell^{-h} (\zeta^2 D_\ell^h u) \in W^{1,2}(\Omega)$. Der Träger dieser beiden Funktionen liegt in Ω_{s^*} . Also gilt auch $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$. Wir werden die Gleichung

$$\int_{\Omega} a^{ij} \partial_i u \partial_j (D_\ell^{-h} (\zeta^2 D_\ell^h(u))) \, dx = \int_{\Omega} \tilde{f} (D_\ell^{-h} (\zeta^2 D_\ell^h(u))) \, dx \quad (14.16)$$

ausschreiben und die einzelnen Terme abschätzen für $0 < |h| < \frac{1}{2}d_0$.

4. Die linke Seite von (14.16) wird wie folgt abgeschätzt. Wenn wir wie in (14.13) vorgehen, finden wir

$$\int_{\Omega} a^{ij}(x) \partial_i u(x) \partial_j (D_{\ell}^{-h} (\zeta^2 D_{\ell}^h) u)(x) dx = \int_{\Omega} D_{\ell}^h (a^{ij} \partial_i u)(x) \partial_j (\zeta^2 D_{\ell}^h u)(x) dx. \quad (14.17)$$

Als nächstes schreiben wir

$$(14.17) = \int_{\Omega_{s^*}} a^{ij}(x + he_{\ell}) \partial_i (D_{\ell}^h u)(x) \zeta^2(x) \partial_j (D_{\ell}^h u)(x) dx + \quad (14.18)$$

$$+ \int_{\Omega_{s^*}} a^{ij}(x + he_{\ell}) (D_{\ell}^h \partial_i u)(x) 2(\partial_j \zeta)(x) \zeta(x) (D_{\ell}^h u)(x) dx + \quad (14.19)$$

$$+ \int_{\Omega_{s^*}} D_{\ell}^h (a^{ij})(x) \partial_i u(x) \zeta^2(x) (D_{\ell}^h \partial_j u)(x) dx + \quad (14.20)$$

$$+ \int_{\Omega_{s^*}} D_{\ell}^h (a^{ij})(x) \partial_i u(x) 2(\partial_j \zeta)(x) \zeta(x) (D_{\ell}^h u)(x) dx. \quad (14.21)$$

Für den ersten dieser vier Terme verwenden wir die gleichmäßige Elliptizität (14.4):

$$\int_{\Omega_{s^*}} a^{ij}(x + he_{\ell}) \partial_i (D_{\ell}^h u)(x) \zeta^2(x) \partial_j (D_{\ell}^h u)(x) dx \geq \lambda \int_{\Omega_{s^*}} \zeta^2(x) |\nabla (D_{\ell}^h u)(x)|^2 dx. \quad (14.22)$$

Für die restlichen Terme folgt mit Hilfe von Cauchy-Schwarz, $2st \leq \varepsilon s^2 + \varepsilon^{-1}t^2$ und Proposition 14.2.3, dass

$$\begin{aligned} (14.19) &\leq C_{\zeta,a} \left(\int_{\Omega_{s^*}} \zeta^2(x) |\nabla (D_{\ell}^h u)(x)|^2 dx \right)^{1/2} \left(\int_{\Omega_{s^*}} |(D_{\ell}^h u)(x)|^2 dx \right)^{1/2} \leq \\ &\leq \varepsilon \|\zeta D_{\ell}^h \nabla u\|_{L^2(\Omega_{s^*})}^2 + \varepsilon^{-1} C_{\zeta,a}^2 \|D_{\ell}^h u\|_{L^2(\Omega_{s^*})}^2 \leq \\ &\leq \varepsilon \|\zeta D_{\ell}^h \nabla u\|_{L^2(\Omega_{s^*})}^2 + \varepsilon^{-1} C_{\zeta,a}^2 \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2, \end{aligned} \quad (14.23)$$

ähnlich

$$(14.20) \leq \varepsilon \|\zeta D_{\ell}^h \nabla u\|_{L^2(\Omega_{s^*})}^2 + \varepsilon^{-1} \tilde{C}_{\zeta,a}^2 \|\nabla u\|_{L^2(\Omega_{s^*})}^2, \quad (14.24)$$

und auch

$$(14.21) \leq \hat{C}_{\zeta,a} \|D_{\ell}^h u\|_{L^2(\Omega_{s^*})} \|\nabla u\|_{L^2(\Omega_{s^*})}. \quad (14.25)$$

5. Für die rechte Seite in (14.16) finden wir, für jedes $\varepsilon > 0$

$$\int_{\Omega} \tilde{f} (D_{\ell}^{-h} (\zeta^2 D_{\ell}^h) u) dx \leq \frac{1}{\varepsilon} \int_{\Omega} |\tilde{f}|^2 dx + \varepsilon \int_{\Omega} (D_{\ell}^{-h} (\zeta^2 D_{\ell}^h) u)^2 dx. \quad (14.26)$$

Dabei gilt

$$\int_{\Omega} |\tilde{f}|^2 dx \leq C \left(\int_{\Omega} |f|^2 dx + \int_{\Omega} |u|^2 dx + \int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx \right) \quad (14.27)$$

und mit Proposition 14.2.3, dass

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (D_{\ell}^{-h} (\zeta^2 D_{\ell}^h) u)^2 dx &= \int_{\Omega_{s^*}} (D_{\ell}^{-h} (\zeta^2 D_{\ell}^h) u)^2 dx \leq \int_{\Omega_{s^*}} |\nabla (\zeta^2 D_{\ell}^h) u|^2 dx \leq \\ &\leq 2 \int_{\Omega_{s^*}} \zeta^2 |\nabla \zeta|^2 |D_{\ell}^h u|^2 dx + 2 \int_{\Omega_{s^*}} \zeta^2 |\nabla D_{\ell}^h u|^2 dx. \end{aligned} \quad (14.28)$$

Kombiniert man (14.26), (14.27) und (14.28), folgt

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \tilde{f} (D_{\ell}^{-h} (\zeta^2 D_{\ell}^h) u) dx \leq \\ & \leq 3\varepsilon \int_{\Omega_{s^*}} \zeta^2 |\nabla D_{\ell}^h u|^2 dx + C_{\varepsilon} \left(\int_{\Omega} |f|^2 dx + \int_{\Omega} |u|^2 dx + \int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx \right). \end{aligned} \quad (14.29)$$

6. Wählen wir jetzt ε genügend klein, dann folgt aus (14.22,14.23,14.24,14.25) und (14.29), dass

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}\lambda \int_{\Omega_s} |D_{\ell}^h \nabla u|^2 dx \leq \frac{1}{2}\lambda \int_{\Omega_{s^*}} \zeta^2 |D_{\ell}^h \nabla u|^2 dx \leq \\ & \leq \tilde{C}_{\varepsilon} \left(\int_{\Omega} |f|^2 dx + \int_{\Omega} |u|^2 dx + \int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx \right). \end{aligned} \quad (14.30)$$

Mit Proposition 14.2.3 folgt, dass $\nabla u \in W^{1,2}(\Omega_s)$ und

$$\|\nabla u\|_{W^{1,2}(\Omega_s)}^2 \leq \frac{2}{\lambda} \tilde{C}_{\varepsilon} \left(\int_{\Omega} |f|^2 dx + \int_{\Omega} |u|^2 dx + \int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx \right).$$

Weil $u, |\nabla u| \in W^{1,2}(\Omega_s)$ gilt, folgt $u \in W^{2,2}(\Omega_s)$. Die Abschätzung wird

$$\|u\|_{W^{2,2}(\Omega_s)} \leq C \left(\|f\|_{L^2(\Omega)} + \|u\|_{W^{1,2}(\Omega)} \right). \quad (14.31)$$

7. Wie in Lemma 11.2.1 kann man noch einen Schritt weitergehen, wenn man in (14.14) $v = u$ einsetzt

$$\begin{aligned} & \lambda \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2 \leq \int_{\Omega} a^{ij} \partial_i u \partial_j u dx = \int_{\Omega} \tilde{f} u dx \leq \\ & \leq \int_{\Omega} f (+\partial_j (b^j u) + c^i \partial_i u + d u) u dx \leq \varepsilon \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)}^2 + C_{\varepsilon} \|f\|_{L^2(\Omega)} + C \|u\|_{L^2(\Omega)}. \end{aligned}$$

Für $\varepsilon > 0$ und genügend klein folgt

$$\|u\|_{W^{1,2}(\Omega)} \leq \|\nabla u\|_{L^2(\Omega)} + \|u\|_{L^2(\Omega)} \leq C \left(\|f\|_{L^2(\Omega)} + \|u\|_{L^2(\Omega)} \right). \quad (14.32)$$

Kombiniert man schlußendlich (14.31) und (14.32) folgt das Ergebnis im Theorem. ■

Theorem 14.2.4 (Höhere Regularität im Innern) Sei $k \in \mathbb{N}^+$, $f \in W^{k,2}(\Omega)$ und nehme an, dass Bedingung 14.1.2 erfüllt ist. Sei $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ eine Lösung von (14.3). Sei Ω_s ein Teilgebiet von Ω mit $\bar{\Omega}_s \subset \Omega$. Dann gilt:

1. $u \in W^{k+2,2}(\Omega_s)$;
2. es gibt $C = C(\Omega, \Omega_s, k)$ derart, dass

$$\|u\|_{W^{k+2,2}(\Omega_s)} \leq C \left(\|f\|_{W^{k,2}(\Omega)} + \|u\|_{L^2(\Omega)} \right).$$

Beweis. Im vorletzten Theorem ist das Resultat für $k = 0$ bewiesen. Sei Ω_{s^*} ein Gebiet zwischen Ω und Ω_s :

$$\bar{\Omega}_s \subset \Omega_{s^*} \text{ und } \bar{\Omega}_{s^*} \subset \Omega.$$

Wir werden $u \in W^{k+1,2}(\Omega_{s^*})$ annehmen und zeigen, dass $u \in W^{k+2,2}(\Omega_s)$.

Dazu nehmen wir $v \in C_0^\infty(\Omega)$ und setzen $\varphi = (-1)^{|\alpha|} \partial_x^\alpha v$ für irgendeinen Multiindex α mit $|\alpha| = k$. Eine partielle Integration liefert für $\tilde{u} = \partial_x^\alpha u \in W_0^{1,2}(\Omega)$

$$\int_{\Omega} a^{ij} \partial_i \tilde{u} \partial_j v \, dx = \quad (14.33)$$

$$\begin{aligned} &= \int_{\Omega} a^{ij} \partial_i (\partial_x^\alpha u) \partial_j v \, dx = (-1)^{|\alpha|} \int_{\Omega} \partial_i u \partial_x^\alpha (a^{ij} \partial_j v) \, dx = \\ &= \int_{\Omega} \left(a^{ij} \partial_i u \partial_j \varphi + (-1)^{|\alpha|} \partial_i u \sum_{\beta \preceq \alpha} \binom{\alpha}{\beta} (\partial_x^{\alpha-\beta} a^{ij}) (\partial_x^\beta v) \right) dx = \\ &= \int_{\Omega} \left(a^{ij} \tilde{f} \varphi + (-1)^{|\alpha|} \partial_i u \sum_{\beta \preceq \alpha} \binom{\alpha}{\beta} (\partial_x^{\alpha-\beta} a^{ij}) (\partial_x^\beta v) \right) dx = \\ &= \int_{\Omega} \left(\partial_x^\alpha (a^{ij} \tilde{f}) + (-1)^{|\alpha-\beta|} \partial_x^\beta \left(\partial_i u \sum_{\beta \preceq \alpha} \binom{\alpha}{\beta} (\partial_x^{\alpha-\beta} a^{ij}) \right) \right) v \, dx. \end{aligned} \quad (14.34)$$

Hier bedeutet $\beta \preceq \alpha$, dass $\beta \leq \alpha$ und $\beta \neq \alpha$. Weil $C_0^\infty(\Omega)$ dicht in $W_0^{1,2}(\Omega)$ liegt, können wir in (14.33-14.34) $v \in C_0^\infty(\Omega)$ ersetzen durch $v \in W_0^{1,2}(\Omega)$. Weil

$$\begin{aligned} &\left\| \partial_x^\alpha (a^{ij} \tilde{f}) + (-1)^{|\alpha-\beta|} \partial_x^\beta \left(\partial_i u \sum_{\beta \preceq \alpha} \binom{\alpha}{\beta} (\partial_x^{\alpha-\beta} a^{ij}) \right) \right\|_{L^2(\Omega)} \leq \\ &\leq C \left(\|u\|_{W^{k+1,2}(\Omega)} + \|f\|_{W^{k,2}(\Omega)} \right) \end{aligned}$$

folgt aus Theorem 14.2.1, dass $\tilde{u} \in W^{2,2}(\Omega_s)$. Und weil man jeden Multiindex α mit $|\alpha| = k$ zulässt, folgt $u \in W^{k+2,2}(\Omega_s)$ und sogar

$$\begin{aligned} \|u\|_{W^{k+2,2}(\Omega_s)} &\leq C \left(\|u\|_{W^{k+1,2}(\Omega_{s^*})} + \|f\|_{W^{k,2}(\Omega)} \right) \leq \\ &\leq C' \left(\|u\|_{L^2(\Omega)} + \|f\|_{W^{k,2}(\Omega)} \right). \end{aligned}$$

Am Ende haben wir nochmals den Induktionsansatz benutzt. ■

14.3 Regularität am Rande

Wir werden die Regularität auf einer Halbkugel beweisen. Wie in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben, kann man den Rand lokal durch eine Transformation flachbügeln. Es reicht also für die Regularität am Rand, wenn wir dies für eine Halbkugel machen mit $u = 0$ auf dem flachen Stück des Randes dieser Halbkugel:

$$B_R^+(0) = \{x \in \mathbb{R}^n; |x| < R \text{ und } x_1 > 0\}.$$

Theorem 14.3.1 *Sei $f \in L^2(B_1^+(0))$, $\varepsilon > 0$ und nehme an, Bedingung 14.1.2 2 und 3 ist erfüllt. Wenn $u \in W_0^{1,2}(B_1^+(0))$ eine schwache Lösung von (14.3) ist, dann gilt:*

1. $u \in W^{2,2}(B_{1-\varepsilon}^+(0))$;
2. es gibt $C = C(n, \varepsilon)$ derart, dass

$$\|u\|_{W^{2,2}(B_{1-\varepsilon}^+(0))} \leq C \left(\|f\|_{L^2(B_1^+(0))} + \|u\|_{L^2(B_1^+(0))} \right).$$

Beweis. Jetzt nehmen wir $\zeta \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$ so, daß

$$\begin{aligned} 0 &\leq \zeta(x) \leq 1 && \text{für } x \in \mathbb{R}^n, \\ \zeta(x) &= 1 && \text{für } x \in B_{1-\varepsilon}^+(0), \\ \zeta(x) &= 0 && \text{für } x \notin B_{1-\varepsilon/2}^+(0). \end{aligned}$$

Für $\ell \in \{2, \dots, n\}$ kann man dem Beweis von Theorem 14.2.1 folgen und findet $\partial_\ell \partial_i u \in L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))$. Nur wenn $\ell = 1$ muß man sich etwas anderes überlegen. Man geht zurück zu der Gleichung (14.3) und findet nach partieller Integration unter Benutzung von $\partial_i \partial_j u \in L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))$ für alle i, j außer $i = j = 1$, dass

$$\int_{B_1^+(0)} a^{11} \partial_1 u \partial_1 \psi \, dx = \int \check{f} \psi \, dx$$

mit $\check{f} = \sum_{(i,j) \neq (1,1)} \partial_j (a^{ij} \partial_i u) + \sum_j (\partial_j (b^j u) + c^j \partial_j u) + d u + f \in L^2(\Omega)$. Weil die innere Regularität besagt, dass $u \in W_{loc}^{2,2}(B_1^+(0))$, folgt (fast überall)

$$a^{11} \partial_1^2 u = \partial_1 (a^{11} \partial_1 u) - \partial_1 a^{11} \partial_1 u = -\check{f} - \partial_1 a^{11} \partial_1 u \in L^2(\Omega) \quad (14.35)$$

Die gleichmäßige Elliptizität gibt $a^{11} \geq \lambda > 0$ und so $\partial_1^2 u \in L^2(\Omega)$. Schlußendlich sei bemerkt, dass man für $(i, j) \neq (1, 1)$, wie im Beweis von Theorem 14.2.1, diese Abschätzung findet:

$$\|\partial_i \partial_j u\|_{L^2(\Omega)} \leq C \left(\|f\|_{L^2(B_1^+(0))} + \|u\|_{L^2(B_1^+(0))} \right).$$

Für $(i, j) = (1, 1)$ benutzt man (14.35) und bekommt

$$\|\partial_1^2 u\|_{L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))} \leq C \sum_{(i,j) \neq (1,1)} \|\partial_i \partial_j u\|_{L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))} + C \left(\|f\|_{L^2(B_1^+(0))} + \|u\|_{L^2(B_1^+(0))} \right).$$

Um die Terme mit Ableitungen erster Ordnung von u loszuwerden, steckt in dieser letzten Abschätzung auch wieder Lemma 14.1.3. ■

Theorem 14.3.2 Sei $k \in \mathbb{N}$, $f \in W^{k,2}(B_1^+(0))$, $\varepsilon > 0$ und nehme an, Bedingung 14.1.2 2 und 3 ist erfüllt. Wenn $u \in W_0^{1,2}(B_1^+(0))$ eine schwache Lösung von (14.3) ist, dann gilt:

1. $u \in W^{k+2,2}(B_{1-\varepsilon}^+(0))$;
2. es gibt $C = C(n, \varepsilon, k)$ derart, dass

$$\|u\|_{W^{k+2,2}(B_{1-\varepsilon}^+(0))} \leq C \left(\|f\|_{W^{k,2}(B_1^+(0))} + \|u\|_{L^2(B_1^+(0))} \right). \quad (14.36)$$

Beweis. Wir verfahren durch vollständige Induktion. Für $k = 0$ ist das Theorem bewiesen in 14.3.1. Wir nehmen an, Theorem 14.3.2 sei gültig für irgendein $k \in \mathbb{N}$ und werden das Resultat für $k + 1$ beweisen. Ähnlich wie im Beweis von 14.3.1 müssen wir zwei Fälle unterscheiden für $\beta \in \mathbb{N}^n$ mit $|\beta| = k + 3$, nämlich $\beta_1 < k + 3$ und $\beta_1 = k + 3$. Wenn $\beta_1 < k + 3$, kann man vorgehen wie beim Beweis im Innern und bekommt $\partial^\beta u \in L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))$ und

$$\|\partial^\beta u\|_{L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))} \leq C \left(\|f\|_{W^{k+1,2}(B_1^+(0))} + \|u\|_{L^2(B_1^+(0))} \right). \quad (14.37)$$

Für $\beta = (k+3, 0, \dots, 0)$ benutzen wir, dass $u \in W_{loc}^{k+3,2}(B^+(0))$ und eine ähnliche Identität wie in (14.35). Wir finden $\partial_1^{k+3}u \in L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))$ und

$$\|\partial_1^{k+3}u\|_{L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))} \leq C \sum_{\substack{|\beta|=k+3 \\ \beta_1 < k+3}} \|\partial^\beta u\|_{L^2(B_{1-\varepsilon}^+(0))} + C \left(\|f\|_{L^2(B_1^+(0))} + \|u\|_{L^2(B_1^+(0))} \right).$$

Wiederum haben wir Lemma 14.1.3 verwendet. ■

Das Resultat für die Halbkugel läßt sich mit Hilfe einer Transformation verwenden auf Gebiete, die sich durch einen C^{k+2} -Diffeomorphismus abbilden lassen auf so eine Halbkugel. Wir verweisen auf Kapitel 8. Eine geschickte Zerlegung der Eins auf dem Rande gibt die gewünschten Ergebnisse auf dem ganzen Rand.

Aufgabe 39 Zeige, dass die soeben gemachte Aussage tatsächlich stimmt. Um genau zu sein: wenn man (14.3) betrachtet in einer Umgebung des Randes, wobei lokal die Bedingung 14.1.2 erfüllt ist, dann gibt es einen lokalen C^{k+2} -Diffeomorphismus T , der:

1. lokal den Rand flachbügelt: $T(\partial\Omega \cap U) \subset \{0\} \times \mathbb{R}^{n-1}$;
2. die schwache Identität (14.3) auf $\Omega \cap U$ überführt in eine ähnliche Identität auf $T(\Omega \cap U)$, wobei wiederum Bedingung 14.1.2 erfüllt ist.

Mit U ist eine lokale Umgebung gemeint.

14.4 Regularitätssätze in Hölder- und Sobolev-Räumen

Mit einer geschickten Zerlegung der Eins kann man die beiden Ergebnisse zu Regularität im Innern und am Rande jetzt zusammenfügen zu:

Theorem 14.4.1 Sei $k \in \mathbb{N}$, $f \in W^{k,2}(\Omega)$ und nehme an, Bedingung 14.1.2 ist erfüllt. Sei $u \in W_0^{1,2}(\Omega)$ eine schwache Lösung von (14.3). Dann gilt:

1. $u \in W^{k+2,2}(\Omega)$;
2. es gibt $C = C(\Omega, k)$ derart, dass

$$\|u\|_{W^{k+2,2}(\Omega)} \leq C \left(\|f\|_{W^{k,2}(\Omega)} + \|u\|_{L^2(\Omega)} \right).$$

Ohne Beweis geben wir noch folgende Regularitätssätze an. Beweise für diese Aussagen findet man im Buch von Gilbarg und Trudinger [13].

Theorem 14.4.2 Sei $p \in (1, \infty)$, $k \in \mathbb{N}$, $f \in W^{k,p}(\Omega)$ und nehme an, Bedingung 14.1.2 ist erfüllt. Sei $u \in W_0^{1,p}(\Omega)$ eine schwache Lösung von (14.3). Dann gilt:

1. $u \in W^{k+2,p}(\Omega)$;
2. es gibt $C = C(\Omega, k, p)$ derart, dass

$$\|u\|_{W^{k+2,p}(\Omega)} \leq C \left(\|f\|_{W^{k,p}(\Omega)} + \|u\|_{L^p(\Omega)} \right).$$

Theorem 14.4.3 Sei $\gamma \in (0, 1)$, $k \in \{2, 3, \dots\}$, $f \in C^{k-2,\gamma}(\bar{\Omega})$ und nehme an, Bedingung 14.1.2 ist erfüllt. Sei $u \in C^2(\bar{\Omega}) \cap C_0(\bar{\Omega})$ eine Lösung von (14.3). Dann gilt:

1. $u \in C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})$;
2. es gibt $C = C(\Omega, k, \gamma)$ derart, dass

$$\|u\|_{C^{k,\gamma}(\bar{\Omega})} \leq C \left(\|f\|_{C^{k-2,\gamma}(\bar{\Omega})} + \|u\|_{L^\infty(\bar{\Omega})} \right).$$

Bemerkung 14.4.4 Die Bedingungen $1 < p < \infty$ und $0 < \gamma < 1$ sind scharf. Es gibt keine derartigen Ergebnisse für $p \in \{1, \infty\}$ oder $\gamma \in \{0, 1\}$.

Anhang A

Integration und Konvergenz

Theorem A.1 (Egoroff) Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ mit $\lambda(\Omega) < \infty$ und sei $\{f_k\}_{k=1}^\infty$ eine Folge von Lebesgue-messbaren Funktionen auf Ω . Nehme an, dass $\lim_{k \rightarrow \infty} f_k(x) = f(x)$ f.ü.

Dann gibt es für jedes $\varepsilon > 0$ eine messbare Teilmenge $A \subset \Omega$ derart, dass

1. $\lambda(\Omega \setminus A) \leq \varepsilon$ und
2. $f_k \rightarrow f$ gleichmäßig in A .

Theorem A.2 (Das Lemma von Fatou) Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ und sei $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset L^1(\Omega)$ eine derartige Folge, dass

- $f_k \geq 0$ f.ü. und
- $\sup \int_\Omega f_k \, dx < \infty$.

Dann ist $f \in L^1(\Omega)$ wohldefiniert durch $f(x) := \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k(x)$ f.ü. und

$$\int_\Omega f \, dx \leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \int_\Omega f_k \, dx.$$

Theorem A.3 (Majorisierter Konvergenzsatz von Lebesgue) Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ und sei $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset L^1(\Omega)$ eine derartige Folge, dass

- $f_k \rightarrow f$ f.ü. und
- es $g \in L^1(\Omega)$ gibt so, dass $|f_k| \leq g$ f.ü. für alle $k \in \mathbb{N}$,

Dann gilt, dass $f \in L^1(\Omega)$ und

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_\Omega f_k \, dx = \int_\Omega f \, dx.$$

Theorem A.4 (Monotoner Konvergenzsatz von Beppo-Levi) Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ und sei $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset L^1(\Omega)$ eine Folge,

- die monoton wächst: $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_k \leq f_{k+1} \leq \dots$ und
- $\sup_{k \geq 1} \int_\Omega f_k \, dx < \infty$ erfüllt.

Dann ist $f \in L^1(\Omega)$ wohldefiniert durch $f := \lim_{k \rightarrow \infty} f_k$ f.ü., und

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_\Omega f_k \, dx = \int_\Omega f \, dx.$$

Anhang B

Ungleichungen

Theorem B.1 (Cauchy-Schwarz) Für alle $u, v \in L^2(\Omega)$ gilt

$$\int_{\Omega} uv dx \leq \|u\|_{L^2(\Omega)} \|v\|_{L^2(\Omega)}.$$

Theorem B.2 (Hölder) Seien $p, q \in (1, \infty)$ mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Für alle $u \in L^p(\Omega)$ und $v \in L^q(\Omega)$ gilt:

$$\int_{\Omega} uv dx \leq \|u\|_{L^p(\Omega)} \|v\|_{L^q(\Omega)}.$$

Diese Ungleichung gilt auch für $p = 1$ und $q = \infty$.

Theorem B.3 (Calderon) Sei $\lambda(\Omega) < \infty$ und sei $1 \leq p < q \leq \infty$. Dann gilt

$$\|u\|_{L^p(\Omega)} \leq \lambda(\Omega)^{\frac{1}{p} - \frac{1}{q}} \|u\|_{L^q(\Omega)}.$$

Theorem B.4 (Young) Seien $p, q \in (1, \infty)$ mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Für alle $u \in L^p(\Omega)$ und $v \in L^q(\Omega)$ gilt:

$$\int_{\Omega} uv dx \leq \frac{1}{p} \|u\|_{L^p}^p + \frac{1}{q} \|v\|_{L^q}^q.$$

Theorem B.5 (Minkowski) Sei $p \in [1, \infty]$ und seien $u, v \in L^p(\Omega)$. Dann gilt

$$\|u + v\|_{L^p(\Omega)} \leq \|u\|_{L^p(\Omega)} + \|v\|_{L^p(\Omega)}.$$

Theorem B.6 (Jensen) Sei $\lambda(\Omega) < \infty$ und sei $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ konvex. Dann gilt

$$f\left(\frac{1}{\lambda(\Omega)} \int_{\Omega} u(x) dx\right) \leq \frac{1}{\lambda(\Omega)} \int_{\Omega} f(u(x)) dx.$$

Anhang C

Kompaktheit, Abgeschlossenheit

Als Erinnerung einige bekannte Sätze, die mit Kompaktheit und Abgeschlossenheit zu tun haben.

Theorem C.1 (Bolzano-Weierstraß)

Jede beschränkte Folge in $\mathbb{R}^n$ hat einen Häufungswert.

Korollar C.2 *Sei Ω eine Teilmenge von $\mathbb{R}^n$. Dann gilt:*

$$\Omega \text{ ist beschränkt und abgeschlossen} \Leftrightarrow \Omega \text{ ist kompakt.}$$

Dieses Korollar kann so nur in endlichen Dimensionen gelten, denn F. Riesz hat folgendes Ergebnis bewiesen.

Theorem C.3 (F. Riesz) *Sei $(X, \|\cdot\|)$ ein normierter Raum. Dann sind äquivalent:*

- X ist endlich dimensional.
- $\overline{B_1(0)} = \{x \in X; \|x\| \leq 1\}$ ist kompakt.

Theorem C.4 (Weierstraß) *Sei $(X, \|\cdot\|)$ ein normierter Raum und sei $K \subset X$ kompakt. Eine stetige Funktion $f: K \rightarrow \mathbb{R}$ nimmt sein Minimum an in K .*

Dieses Theorem von Weierstraß gilt auch für topologische Räume $(X, \mathcal{T})$.

Theorem C.5 (Arzela-Ascoli) *Sei $\{f_k\}_{k=1}^\infty \subset C(\bar{\Omega})$ mit $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ eine Folge von Funktionen, die*

1. *gleichmäßig beschränkt sind: es gibt $M > 0$ derart, dass*

$$|f_k(x)| \leq M \text{ für alle } x \in \Omega \text{ und } k \in \mathbb{N},$$

2. *gleichmäßig gleichgradig stetig sind: für alle $\varepsilon > 0$ gibt es $\delta > 0$ derart, dass*

$$\text{für alle } k \in \mathbb{N} \text{ und für alle } x, y \in \bar{\Omega} \text{ mit } |x - y| < \delta \text{ gilt } |f_k(x) - f_k(y)| < \varepsilon.$$

Dann gibt es eine Teilfolge $\{f_{k_m}\}_{m=1}^\infty$ und eine stetige Funktion f derart, dass gilt: $f_{k_m} \rightarrow f$ gleichmäßig auf kompakte Teilmengen von $\bar{\Omega}$.

Theorem C.6 (Hahn-Banach) Sei $(X, \|\cdot\|)$ ein Banachraum und seien $A, B \subset X$ zwei nicht-leere konvexe Mengen mit $A \cap B = \emptyset$. Nehme an, dass A abgeschlossen ist und B ist kompakt. Dann gibt es eine lineare Funktion $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ und reelle Zahlen $\alpha < \beta$ derart, dass

$$A \subset \{x \in X; f(x) \leq \alpha\} \text{ und } B \subset \{x \in X; f(x) \geq \beta\}.$$

Theorem C.7 (Mazur) Sei $(X, \|\cdot\|)$ ein Banachraum und sei $K \subset X$ konvex. Äquivalent sind:

- K ist abgeschlossen.
- K ist schwach abgeschlossen.

Theorem C.8 (Kakutani) Sei $(X, \|\cdot\|)$ ein Banachraum. Äquivalent sind:

- Dieser Banachraum ist reflexiv.
- Der abgeschlossene Einheitskugel $\bar{B}_X = \{x \in X; \|x\| \leq 1\}$ ist kompakt bezüglich der schwachen Topologie.

Bemerkung C.9 Das letzte bedeutet, dass es für jede Folge $\{x_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset \bar{B}_X$ ein $x_\infty \in \bar{B}_X$ und eine Teilfolge $\{x_{k_m}\}_{m \in \mathbb{N}}$ gibt mit

$$x_{k_m} \rightharpoonup x_\infty \text{ in } X \text{ für } m \rightarrow \infty.$$

Literaturverzeichnis

- [1] R.A. Adams, J.J.F. Fournier, Sobolev spaces 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, 2003.
- [2] Ambrosetti, Antonio; Rabinowitz, Paul H. Dual variational methods in critical point theory and applications. J. Functional Analysis 14 (1973), 349–381.
- [3] H. Brezis, Analyse fonctionnelle, Théorie et applications, Masson, Paris, 1983.
- [4] H. Brezis, Functional Analysis, Sobolev Spaces and Partial Differential Equations, Springer 2010.
- [5] B. Dacorogna, Direct Methods in the Calculus of Variations, Springer, Berlin, 1989.
- [6] B. Dacorogna, Introduction to the Calculus of Variations, Imperial College Press, London, 2004.
- [7] L.C. Evans, Partial Differential Equations, AMS, Providence, 1998.
- [8] F. Gazzola, H.-Ch. Grunau, G. Sweers, Polyharmonic boundary value problems, Springer-Verlag, Heidelberg, 2010.
- [9] I.M. Gelfand, S.V. Fomin, Calculus of Variations, reprinted 1991 edition by Dover, New York, 2000.
- [10] M. Giaquinta, S. Hildebrandt, Calculus of Variations I, Springer, Berlin, 1996.
- [11] M. Giaquinta, S. Hildebrandt, Calculus of Variations II, Springer, Berlin, 1996.
- [12] M. Mesterton-Gibbons, A Primer on Calculus of Variations and Optimal Control Theory, Student Math. Library, AMS, 2009.
- [13] Gilbarg, David; Trudinger, Neil S. Elliptic partial differential equations of second order. Reprint of the 1998 edition. Classics in Mathematics. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [14] Pohožaev, S. I., Eigenfunctions of the equation $\Delta u + \lambda f(u) = 0$. Dokl. Akad. Nauk SSSR 165 1965, 36–39 (Soviet Math. Dokl. 1408-1411)
- [15] Struwe, Michael, Variational methods. Applications to nonlinear partial differential equations and Hamiltonian systems. Springer-Verlag, Berlin, 2000.