Humboldt-Universität zu Berlin
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Institut für Mathematik

Die Crouzeix-Raviart Finite-Elemente Methode für eine Minimierung im Raum der Funktionen von beschränkter Variation

Enrico Bergmann

Version: 17. Dezember 2020

Inhaltsverzeichnis

Todo list

1. Einleitung

[ABM] modelization of a large number of problems in physics, mechanics, or image processing requires the introducion of new functionals spaces permitting discontinuities of the solution. In phase transitions, image segmentation, plasticity theory, the study of crasks and fissures, the study of the wake in fluid dynamics , and so forth, the solution of the problem presents discontinuities along one-odimensionalmanifolds. - solution of these problems cannot be found in classical Sobolev spaces

[Braides] 1st page: image reconstruction might be our functional

Viele physikalischen Anwendungen können mit kontinuierlichen Funktionen nicht beschrieben werden [Bartels, Error Control and Adaptivity for a variational model problem defined on functions of bounded variation, und darin zitierte Quellen].

TODO schreibe Einleitung, zitiere Quellen, die Anwendungen beschreiben

Konvergenz im Fließtext nicht mit overset sondern das n to infty dahinter im Fließtext

2. Theoretische Grundlagen

TODO quote [ABM14, chapter 10, maybe also 4] for BV things, e.g. BV is Banach space is proven there and also some wlsc statements, so quote it for many things instead of Bar15

2.1. Notation

In dieser Arbeit sei $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ stets ein polygonal-berandetes Lipschitz-Gebiet.

TODO usw alle Notationen einführen, die in der ganzen Arbeit gelten

FRAGE Dann zB CR Notation erst im entsprechenden Kapitel einführen oder auch das schon hier? Oder hier nur ABSOLUTE Grundlagen, extrem basic, und alles andere dann on the fly?

TODO nur die Sachen rausschreiben/zusammentragen/zitieren (um später Theoreme und Gleichungen zitieren zu können statt Bücher) die auch wirklich gebraucht werden später in Beweisen. Insbesondere am Ende nochmal durchgucken, was wirklich gebraucht wurde und ungebrauchtes und/oder uninteressanter und/oder unwichtiges rauswerfen

2.2. Maßtheoretische Grundlagen

TODO doch noch wenigstens eine einfach Def für Radon Maße (vor allem mit Zitat zu einer Quelle

TODO Maßtheorie für Vektormaße ist absolut nicht notwenig, da meine Anwendung ausschließlich von R2 nach R geht Möglicherweise kann ich also doch eine durchgehende Geschichte erzählen und insbesondere alles verstehen, im Quelltext sind noch auskommentierte Theorem zur Maßtheorie

2.3. Direkte Methode der Variationsrechnung

braucht es eigentlich nicht, im Beweis selbst werden ja alle Argumente gebracht, also diese section ist überflüssig

2.4. Subdifferential

In diesem Abschnitt trage ich die in dieser Arbeit benötigten Eigenschaften des Subdifferentials eines Funktionals $F : X \to [-\infty, \infty]$ auf einem Banachraum $(X, \|\bullet\|_X)$

und die dafür benötigten Begriffe zusammen.

Zunächst eine grundlegende Definition.

Definition 2.1 ([Zei85, S. 245, Definition 42.1])**.** Sei X ein Vektorraum, $M \subseteq X$ und $F : M \to \mathbb{R}$.

Dann heißt die Menge M konvex, wenn für alle $u, v \in M$ und alle $t \in [0,1]$ gilt $(1-t)u + tv \in M$.

Ist M konvex, so heißt F konvex, falls für alle $u, v \in M$ und alle $t \in [0,1]$ gilt $F\big((1-t)u + tv\big) \leqslant (1-t)F(u) + tF(v)$.

In [Zei85] werden einige der folgenden Aussagen auf reellen lokal konvexen Räumen X formuliert. Da nach [Zei86, S. 781, (43)] alle Banachräume (in [Zei86] und [Zei85] genannt „B-spaces", [Zei86, S. 786]) lokal konvex sind und in dieser Arbeit die Aussagen nur auf Banachräumen benötigt werden, beschränke ich die folgenden Aussagen, falls nicht anders spezifiziert, wie folgt. Sei $(X, \|\bullet\|_X)$ ein reeller Banachraum und $F : X \to [-\infty, \infty]$ ein Funktional auf X.

Definition 2.2 (Subdifferential, [Zei85, S. 385, Definition 47.8])**.** Für $u \in X$ mit $F(u) \neq \pm\infty$ heißt

$$\partial F(u) \coloneqq \{u^* \in X^* \mid \forall v \in X \quad F(v) \geqslant F(u) + \langle u^*, v - u \rangle\} \tag{2.1}$$

Subdifferential von F an der Stelle u. Für $F(u) = \pm\infty$ definiere $\partial F(u) \coloneqq \varnothing$.

Ein Element $u^* \in \partial F(u)$ heißt Subgradient von F an der Stelle u.

Theorem 2.3 ([Zei85, S. 387, Proposition 47.12])**.** *Falls $F : X \to (-\infty, \infty]$ mit $F \not\equiv \infty$, gilt $F(u) = \inf_{v \in X} F(v)$ genau dann, wenn $0 \in \partial F(u)$.*

Theorem 2.4 ([Zei85, S. 387, Proposition 47.13])**.** *Falls F konvex ist und Gâteaux-differenzierbar (in [Zei86] und [Zei85] genannt „G-differentiable", [Zei86, S. 135f.]) an der Stelle $u \in X$ mit Gâteaux-Differential $F'(u)$, gilt $\partial F(u) = \{F'(u)\}$.*

TODO checke Notation und Definition mit der Gateaux/Frechet-differenzierbarkeit, für die ich mich entschieden habe (d.h. meint Zeidler das gleiche
Bemerke, die Prop liefert noch wann das umgekehrte gilt, aber nur aufschreiben, wenn das mal benötigt wird in dieser Arbeit
nutze vielleicht Zeidler I als Quelle für die Differentiale und vielleicht auch Notation?

Das folgende Theorem folgt aus [Zei85, S. 389, Theorem 47.B] unter Beachtung der Tatsache, dass die Addition von Funktionalen $F_1, F_2, \ldots, F_n : X \to (-\infty, \infty]$ und die Addition von Menge in X^* kommutieren.

Theorem 2.5. *Seien für $n \geqslant 2$ die Funktionale $F_1, F_2, \ldots, F_n : X \to (-\infty, \infty]$ konvex und es existiere ein $u_0 \in X$ und ein $j \in \{1, 2, \ldots, n\}$ mit $F_k(u_0) < \infty$ für alle $k \in \{1, 2 \ldots, n\}$, sodass für alle $k \in \{1, 2, \ldots, n\} \backslash \{j\}$ das Funktional F_k stetig an der Stelle u_0 ist.*

Dann gilt

$$\partial(F_1 + F_2 + \ldots + F_n)(u) = \partial F_1(u) + \partial F_2(u) + \ldots + \partial F_n(u) \quad \text{für alle } u \in X.$$

Theorem 2.6 ([Zei85, S. 396f., Definition 47.15, Theorem 47.F])**.** *Sei $F : X \to (-\infty, \infty]$ konvex und unterhalbstetig mit $F \not\equiv \infty$.*

Dann ist $\partial F(\bullet)$ monoton, das heißt

$$\langle u^* - v^*, u - v \rangle \geqslant 0 \quad \text{für alle } u, v \in X, u^* \in \partial F(u), v^* \in \partial F(v).$$

2.5. Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen

2.6. Sattelpunktsprobleme

In diesem Abschnitt können wir angelehnt an [Aub79, S. 4ff., S. 165ff.] eine propere Funktion $f : U \to (-\infty, \infty]$ betrachten, wobei U ein Vektorraum ist.

2.7. Funktionen Beschränkter Variation

Dieser Abschnitt folgt Kapitel 10 von [Bar15]. Dabei sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ein offenes, polygonal berandetes Lipschitz-Gebiet.

Direkt von R2 ausgehen, weil mehr im Programm nicht geht?

TODO jede übernommene Definition/Theorem/etc. zitieren trotz Disclaimer oben? jede Notation erklären bzw. definieren? Falls ja; am Anfang oder Ende der Arbeit?

TODO vielleicht zu Grundlagen über Radonmaße verschieben

TODO zitiere?

Definition 2.7. Die Vervollständigung des Raums $C_C^\infty(\Omega; \mathbb{R}^m)$ bezüglich der Norm $\|\bullet\|_{L^\infty(\Omega)}$ ist ein separabler Banachraum und wird bezeichnet mit $C_0(\Omega; \mathbb{R}^m)$. Der Dualraum $\mathcal{M}(\Omega; \mathbb{R}^m)$ von $C_0(\Omega; \mathbb{R}^m)$ wird durch den Riesz'schen Darstellungssatz identifiziert mit dem Raum aller (vektoriellen) Radonmaße. Dabei wird die Anwendung von $\mu \in \mathcal{M}(\Omega; \mathbb{R}^m)$ auf $\phi \in C_0(\Omega; \mathbb{R}^m)$ identifiziert mit

$$\langle \mu, \phi \rangle := \int_\Omega \phi \,\mathrm{d}\mu = \int_\Omega \phi(x) \,\mathrm{d}\mu(x).$$

Definition 2.8 (Funktionen beschränkter Variation)**.** Eine Funktion $u \in L^1(\Omega)$ ist von beschränkter Variation, wenn ihre distributionelle Ableitung ein Radonmaß definiert, d.h. eine Konstante $c \geqslant 0$ existiert, sodass

$$\langle Du, \phi \rangle := -\int_\Omega u \operatorname{div}(\phi) \,\mathrm{d}x \leqslant c\|\phi\|_{L^\infty(\Omega)} \tag{2.2}$$

für alle $\phi \in C_C^1(\Omega; \mathbb{R}^n)$.

Die minimale Konstante $c \geqslant 0$, die (2.2) erfüllt, heißt totale Variation von Du und besitzt die Darstellung

$$|u|_{\mathrm{BV}(\Omega)} = \sup_{\substack{\phi \in C_C^1(\Omega;\mathbb{R}^n) \\ \|\phi\|_{L^\infty(\Omega)} \leqslant 1}} -\int_\Omega u \operatorname{div}(\phi) \,\mathrm{d}x.$$

Durch $|\bullet|_{\mathrm{BV}(\Omega)}$ ist eine Seminorm auf $\mathrm{BV}(\Omega)$ gegeben.

Der Raum aller Funktionen beschränkter Variation $\mathrm{BV}(\Omega)$ ist ausgestattet mit der Norm

$$\|u\|_{\mathrm{BV}(\Omega)} := \|u\|_{L^1(\Omega)} + |u|_{\mathrm{BV}(\Omega)}$$

für $u \in \mathrm{BV}(\Omega)$.

Bemerkung 2.9. Es gilt $W^{1,1}(\Omega) \subset \mathrm{BV}(\Omega)$ und $\|u\|_{\mathrm{BV}(\Omega)} = \|u\|_{W^{1,1}(\Omega)}$ für alle $u \in W^{1,1}(\Omega)$. es gilt für diese u tatsächlich (nach BV lecture04) ca. $|u|_{\mathrm{BV}(\Omega) = \|\nabla u\|_{L^1(\Omega)}}$

Definition 2.10. Sei $(u_n)_{n\in\mathbb{N}} \subset \mathrm{BV}(\Omega)$ und sei $u \in \mathrm{BV}(\Omega)$ mit $u_n \to u$ in $L^1(\Omega)$ für $n \to \infty$.

(i) Die Folge $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ konvergiert strikt gegen u, wenn $|u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)} \to |u|_{\mathrm{BV}(\Omega)}$ für $n \to \infty$. strikte Konvergenz gdw. ($\|u - u_n\|_{L^1(\Omega)} \to 0$ und $|u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)} \to |u|_{\mathrm{BV}(\Omega)}$) was impliziert $\|u_n\|_{\mathrm{BV}} \to \|u\|_{\mathrm{BV}}$ aber nicht unbedingt $\|u_n - u\|_{\mathrm{BV}} \to 0$, da nicht folgt, dass $|u_n - u|_{\mathrm{BV}} \to 0$

aus BV Konvergenz, also $\|u_n - u\|_{\mathrm{BV}} \to 0$, folgt hingegen aber ($\|u - u_n\|_{L^1(\Omega)} \to 0$ und $|u_n - u|_{\mathrm{BV}(\Omega)} \to 0$), also insbesondere ($\|u - u_n\|_{L^1(\Omega)} \to 0$ und $|u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)} \to |u|_{\mathrm{BV}(\Omega)}$), d.h. strikte Konvergenz

jede BV konvergente Folge ist also strikt konvergent aber nicht umgekehrt, es gibt also mehr strikt konvergente Folgen, deshalb klingt es sinnvoll, dass wir BV Funktionen durch C^∞ Funktionen (usw.) approximieren können bzgl strikter Konvergenz aber nicht bzgl BV Konvergenz (strong topology, vgl. Ende von BV lecture04

(ii) Die Folge $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ konvergiert schwach gegen u, wenn $Du_n \rightharpoonup^* Du$ in $\mathcal{M}(\Omega;\mathbb{R}^n)$ für $n \to \infty$, d.h. für alle $\phi \in C_0(\Omega;\mathbb{R}^n)$ gilt $\langle Du_n, \phi\rangle \to \langle Du, \phi\rangle$ für $n \to \infty$.

Theorem 2.11 (Schwache Unterhalbstetigkeit). *Seien $(u_n)_{n\in\mathbb{N}} \subset \mathrm{BV}(\Omega)$ und $u \in L^1(\Omega)$ mit $|u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)} \leqslant c$ für ein $c > 0$ und alle $n \in \mathbb{N}$ und $u_n \to u$ in $L^1(\Omega)$ für $n \to \infty$.*

Dann gilt $u \in \mathrm{BV}(\Omega)$ und $|u|_{\mathrm{BV}(\Omega)} \leqslant \liminf_{n\to\infty} |u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)}$. Außerdem gilt $u_n \rightharpoonup u$ in $\mathrm{BV}(\Omega)$ für $n \to \infty$.

Theorem 2.12 (Appoximation mit glatten Funktionen). *Die Räume $C^\infty(\overline{\Omega})$ und $C^\infty(\Omega) \cap \mathrm{BV}(\Omega)$ liegen dicht in $\mathrm{BV}(\Omega)$ bezüglich strikter Konvergenz.*

BV lecture05 Thm 2.4 liefert sogar (Folge in $C^\infty \cap W^{1,1}$) sowohl strikte als auch schwache Konvergenz gegen gegebenes $u \in \mathrm{BV}$, also wir haben nach diesem Thm die Dichte von $C^\infty \cap W^{1,1}$ bzgl. strikter und schwacher BV Konvergenz

da für Folgen in $W^{1,1}$ BV und $W^{1,1}$ Norm übereinstimmen und da $W^{1,1}$ der Abschluss von C^∞ bzgl. der $W^{1,1}$ Norm ist (C^∞ dicht in $W^{1,1}$ bzgl. W11 Norm), ist für $W^{1,1}$ Funktionen W11 auch Abschluss von Cinfty bzgl der BV Norm (Cinfty dicht in W11 bzhl BV Norm)

JETZT DER KNACKPUNKT und wie aus Thmeorem 2.6 gefolgert werden kann was in BV lecture steht: da BV Konvergenz strikte Konvergenz impliziert, ist also Cinfty auch dicht in W11 bzgl strikter Konvergenz und W11 ist Teilmenge von BV. Da A dicht in B und B Teilmenge C impliziert das B dicht in C (wiki, natürlich beides bzgl gleicher Metrik), folgt insgesamt W11 dicht in BV bzgl strikter Konvergenz

MORGEN CONTINUE IN WITH THIS IN EXISTENCE PROOF: NOW I might know WHY infimizing sequence in BV can simply be choosen in W11 or something (Think about it and what bartels did)

Theorem 2.13. *Sei $(u_n)_{n\in\mathbb{N}} \subset \mathrm{BV}(\Omega)$ eine beschränkte Folge. Dann existiert eine Teilfolge $(u_{n_k})_{k\in\mathbb{N}}$ und ein $u \in \mathrm{BV}(\Omega)$, sodass $u_{n_k} \rightharpoonup u$ in $\mathrm{BV}(\Omega)$ für $k \to \infty$. augenscheinlich nicht in BV lecture*

Theorem 2.14. *Die Einbettung $\mathrm{BV}(\Omega) \to L^p(\Omega)$ ist stetig für $1 \leqslant p \leqslant n/(n-1)$ und kompakt für $1 \leqslant p < n/(n-1)$*

TODO vielleicht wichtig, Quelle braucht es noch

Theorem 2.15 (Spuroperator). *Es existiert ein linearer Operator* $T : \mathrm{BV}(\Omega) \to L^1(\partial\Omega)$ *mit* $T(u) = u|_{\partial\Omega}$ *für alle* $u \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$.

Der Operator T *ist stetig bezüglich strikter Konvergenz in* $\mathrm{BV}(\Omega)$, *aber nicht stetig bezüglich schwacher Konvergenz in* $\mathrm{BV}(\Omega)$.

TODO finde Quelle, nur ein Remark in Bartels (wird aber für CCs Funktional offensichtlich gebraucht, es gibt noch weitere Aussagen in Bartels (zB integration by parts aber erstmal nur Existens und Stetigkeit hier (wie gesagt, nur was gebraucht wird zitieren, oder?)

3. Das kontinuierliche Problem

Wir betrachten für ein gegebenes $\alpha \in \mathbb{R}^+$ und eine Funktion $f \in L^2(\Omega)$ das folgende Minimierungsproblem.

TODO/Q nach [ABM14, Thm. 10.1.4 (first sentence in proof)] ist in 2D BV enthalten in L^2, d.h. $u \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$ muss nur als $u \in \mathrm{BV}(\Omega)$ formuliert werden

der eine Beweis der für 2D leichter wäre damit steht aber schon und alles andere sollte auch in nD gelten, also vielleciht für dieses Kapitel in nD bleiben (kommt auch drauf an, wie das vorherige Kapitel aussieht, ob es BV in nD formuliert oder ob ich zur Vereinfachung direkt 2D mache) Momentan ist das hier gemischt zwischen 2 und n: Überarbeiten!!

Problem 3.1. Finde $u \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$, sodass u das Funktional

$$E(v) := \frac{\alpha}{2}\|v\|^2_{L^2(\Omega)} + |v|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|v\|_{L^1(\partial\Omega)} - \int_\Omega f v \,\mathrm{d}x \tag{3.1}$$

unter allen $v \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$ minimiert.

Nach Theorem 2.15 ist der Term $\|v\|_{L^1(\partial\Omega)}$ wohldefiniert.

TODO Vielleicht auch erst beim Diskreten Problem, da es dort Nullranddaten gibt? Beachte insbesondere, dass $f = \alpha g$
falls tatsächlich das Problem nur in BV formuliert werden muss, da BV in 2D in L2 enthalten ist, dann sollte das hier auch erwähnt werden: 'Bartels formuliert das so und so in BV cap L2, aber da wir uns auf 2D beschränken, gilt ...'

Bemerkung 3.2.

In [Bar15, Kapitel 10.1.3] wird Problem 3.1 für ein gegebenes $g \in L^2(\Omega)$ formuliert mit dem Funktional

$$I(v) := |v|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \frac{\alpha}{2}\int_\Omega (v-g)^2 \,\mathrm{d}x$$

für $v \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$.

Nun wählen wir $f = \alpha g$. Dann gilt $I(v) = E(v) - \|v\|_{L^1(\partial\Omega)} + \frac{\alpha}{2}\|g\|^2_{L^2(\Omega)}$ für alle $v \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$. Da der Term $\frac{\alpha}{2}\|g\|^2_{L^2(\Omega)}$ konstant ist, haben die Funktionale E und I somit die gleichen Minimierer in $\big\{v \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega) \mid \|v\|_{L^1(\partial\Omega)} = 0\big\}$.

Zunächst zeigen wir, dass Problem 3.1 eine Lösung besitzt. Dafür benötigen wir die folgenden Ungleichungen.

Lemma 3.3 (Cauchy-Schwarzsche Ungleichung)**.** *Sei V ein reeller oder komplexer Vektorraum mit Skalarprodukt $(\cdot,\cdot)_V$. Dann gilt für alle $x, y \in V$*

$$|(x,y)_V|^2 \leqslant (x,x)_V (y,y)_V.$$

Gleichheit gilt genau dann, wenn x und y linear unabhängig sind.

Lemma 3.4 (Youngsche Ungleichung)**.** *Seien $a, b \in \mathbb{R}$ und $\varepsilon > 0$ beliebig. Dann gilt*

$$ab \leqslant \frac{1}{\varepsilon}a^2 + \frac{\varepsilon}{4}b^2.$$

Lemma 3.5 (Höldersche Ungleichung)**.** *Seien $p, q \in [1, \infty]$ mit $1/p + 1/q = 1$, $f \in L^p(\Omega)$ und $g \in L^q(\Omega)$. Dann gilt $fg \in L^1(\Omega)$ mit*

$$\|fg\|_{L^1(\Omega)} \leqslant \|f\|_{L^p(\Omega)}\|g\|_{L^q(\Omega)}.$$

Q alle drei zitieren mit irgendeiner Quelle mit der passenden Formulierung oder ist das zu basic

In Grundlagen einmal darüber reden, wie für fast alle hier zu verstehen ist? Es gibt verschiedene Konventionen und hier ist natürlich gemeint für alle x bis auf die aus Nullmengen

Außerdem wird im Beweis folgende Aussage benötigt, die direkt aus [EG92, S. 183, Theorem 1] folgt, da $0 \in \mathrm{BV}(\mathbb{R}^n \backslash \Omega)$, $|0|_{\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n \backslash \Omega)} = 0$ und $0|_{\partial\Omega} = 0$.

Q vielleicht den Trace Operator T immer mitnehmen?

Lemma 3.6. *Sei $v \in \mathrm{BV}(\Omega)$. Definiere, für alle $x \in \mathbb{R}^n$,*

$$\tilde{v}(x) := \begin{cases} v(x), & \textit{falls } x \in \Omega, \\ 0, & \textit{falls } x \in \mathbb{R}^n \backslash \Omega. \end{cases}$$

Dann gilt $\tilde{v} \in \mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)$ und $|\tilde{v}|_{\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)} = |v|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|v\|_{L^1(\partial\Omega)}$.

Theorem 3.7 (Existenz einer Lösung)**.** *Problem 3.1 besitzt eine Lösung $u \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$.*

Beweis. Für alle $v \in L^2(\Omega) \subset L^1(\Omega)$ gilt mit der Hölderschen Ungleichung

Q wo und wie einmal erwähnen, dass die Lp Räume geschachtelt sind da Omega bdd ist? In Grundlagenkapitel 'Da bdd gilt hier immer die Inklusion ..' vielleicht einmal allgemein, dann noch mit Zitierung.

(Lemma 3.5) für $p = q = 2$, dass

$$\|v\|_{L^1} = \|1 \cdot v\|_{L^1(\Omega)} \leqslant \|1\|_{L^2(\Omega)}\|v\|_{L^2(\Omega)} = \sqrt{|\Omega|}\|v\|_{L^2(\Omega)}. \tag{3.2}$$

Dann folgt für das Funktional E in (3.1) für alle $v \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$ durch die Cauchy-Schwarzsche Ungleichung (Lemma 3.3), die Youngsche Ungleichung (3.4) und Gleichung (3.2), dass

$$\begin{aligned} E(v) &= \frac{\alpha}{2}\|v\|^2_{L^2(\Omega)} + |v|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|v\|_{L^1(\partial\Omega)} - \int_\Omega fv \,\mathrm{d}x \\ &\geqslant \frac{\alpha}{2}\|v\|^2_{L^2(\Omega)} + |v|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|v\|_{L^1(\partial\Omega)} - \|f\|_{L^2(\Omega)}\|v\|_{L^2(\Omega)} \\ &\geqslant \frac{\alpha}{2}\|v\|^2_{L^2(\Omega)} + |v|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|v\|_{L^1(\partial\Omega)} - \frac{1}{\alpha}\|f\|^2_{L^2(\Omega)} - \frac{\alpha}{4}\|v\|^2_{L^2(\Omega)} \\ &\geqslant \frac{\alpha}{4}\|v\|^2_{L^2(\Omega)} + |v|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|v\|_{L^1(\partial\Omega)} - \frac{1}{\alpha}\|f\|^2_{L^2(\Omega)} \\ &\geqslant \frac{\alpha}{4|\Omega|}\|v\|^2_{L^1(\Omega)} + |v|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|v\|_{L^1(\partial\Omega)} - \frac{1}{\alpha}\|f\|^2_{L^2(\Omega)} \\ &\geqslant -\frac{1}{\alpha}\|f\|^2_{L^2(\Omega)}. \end{aligned} \tag{3.3}$$

Somit ist E nach unten beschränkt, was die Existenz einer infimierenden Folge $(u_n)_{n\in\mathbb{N}} \subset \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$ von E impliziert, d.h. $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ erfüllt $\lim_{n\to\infty} E(u_n) = \inf_{v\in\mathrm{BV}(\Omega)\cap L^2(\Omega)} E(v)$.

Ungleichung (3.3) impliziert außerdem, dass $E(u_n) \overset{n\to\infty}{\to} \infty$, falls $|u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)} \overset{n\to\infty}{\to} \infty$ oder $\|u_n\|_{L^1(\Omega)} \overset{n\to\infty}{\to} \infty$, also insgesamt, falls $\|u_n\|_{\mathrm{BV}(\Omega)} \overset{n\to\infty}{\to} \infty$.

Deshalb muss die Folge $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ beschränkt in $\mathrm{BV}(\Omega)$ sein.

Nun garantiert Theorem 2.13 die Existenz einer schwach konvergenten Teilfolge $(u_{n_k})_{k\in\mathbb{N}}$ von $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ mit schwachem Grenzwert $u \in \mathrm{BV}(\Omega)$. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit ist $(u_{n_k})_{k\in\mathbb{N}} = (u_n)_{n\in\mathbb{N}}$. Schwache Konvergenz von $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ in $\mathrm{BV}(\Omega)$ gegen u bedeutet nach Definition insbesondere, dass $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ stark und damit auch schwach in $L^1(\Omega)$ gegen u konvergiert.

Weiterhin folgt aus (3.3), dass $E(v) \to \infty$ für $\|v\|_{L^2(\Omega)} \to \infty$. Somit muss $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ auch beschränkt sein bezüglich der Norm $\|\bullet\|_{L^2(\Omega)}$ und besitzt deshalb, wegen der Reflexivität von $L^2(\Omega)$, eine Teilfolge (ohne Beschränkung der Allgemeinheit weiterhin bezeichnet mit $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$), die in $L^2(\Omega)$ schwach gegen einen Grenzwert $\tilde{u} \in L^2(\Omega)$ konvergiert. Somit gilt für alle $w \in L^2(\Omega) \cong L^2(\Omega)^*$ und, da $L^\infty(\Omega) \subset L^2(\Omega)$, insbesondere auch für alle $w \in L^\infty(\Omega) \cong L^1(\Omega)^*$, dass $\int_\Omega u_n w \,\mathrm{d}x \overset{n\to\infty}{\to} \int_\Omega \tilde{u} w \,\mathrm{d}x$. Damit konvergiert $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ also auch schwach in $L^1(\Omega)$ gegen $\tilde{u} \in L^2(\Omega) \subset L^1(\Omega)$.

Da schwache Grenzwerte eindeutig bestimmt sind, gilt insgesamt $u = \tilde{u} \in L^2(\Omega)$, das heißt $u \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$.

Nun definieren wir, für alle $n \in \mathbb{N}$ und für alle $x \in \mathbb{R}^n$,

$$\tilde{u}_n(x) := \begin{cases} u_n(x), & \text{falls } x \in \Omega, \\ 0, & \text{falls } x \in \mathbb{R}^n \backslash \Omega \end{cases}$$

und

$$\tilde{u}(x) := \begin{cases} u(x), & \text{falls } x \in \Omega, \\ 0, & \text{falls } x \in \mathbb{R}^n \backslash \Omega. \end{cases}$$

Dann gilt nach Lemma 3.6 sowohl $\tilde{u} \in \mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)$ und $|\tilde{u}|_{\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)} = |u|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|u\|_{L^1(\partial\Omega)}$ als auch $\tilde{u}_n \in \mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)$ und $|\tilde{u}_n|_{\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)} = |u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|u_n\|_{L^1(\partial\Omega)}$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Da $(u_n)_{n\in\mathbb{N}}$ infimierende Folge von E ist, muss aufgrund der Form von E die Folge $(|\tilde{u}_n|_{\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)})_{n\in\mathbb{N}} = (|u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|u_n\|_{L^1(\partial\Omega)})_{n\in\mathbb{N}}$ beschränkt sein. Außerdem gilt $\tilde{u}_n \overset{n\to\infty}{\to} \tilde{u}$ in $L^1(\mathbb{R}^n)$, da aus der Definition von $\tilde{u}$ und $\tilde{u}_n$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und der bereits bekannten Eigenschaft $u_n \overset{n\to\infty}{\to} u$ folgt

$$\begin{aligned} \|\tilde{u}_n - \tilde{u}\|_{L^1(\mathbb{R}^n)} &= \int_{\mathbb{R}^n} |\tilde{u}_n - \tilde{u}| \,\mathrm{d}x \\ &= \int_\Omega |u_n - u| \,\mathrm{d}x \\ &= \|u_n - u\|_{L^1(\Omega)} \overset{n\to\infty}{\to} 0. \end{aligned}$$

Insgesamt ist also $(\tilde{u}_n)_{n\in\mathbb{N}}$ eine Folge in $\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)$, die in $L^1(\mathbb{R}^n)$ gegen $\tilde{u} \in \mathrm{BV}(\mathbb{R}^n) \subset L^1(\mathbb{R}^n)$ konvergiert und erfüllt, dass $(|\tilde{u}_n|_{\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)})_{n\in\mathbb{N}}$ beschränkt ist. Somit folgt mit Theorem 2.11

$$\begin{aligned} |u|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|u\|_{L^1(\partial\Omega)} = |\tilde{u}|_{\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)} &\leqslant \liminf_{n\to\infty} |\tilde{u}_n|_{\mathrm{BV}(\mathbb{R}^n)} \\ &= \liminf_{n\to\infty} \big(|u_n|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|u_n\|_{L^1(\partial\Omega)}\big). \end{aligned} \tag{3.4}$$

Die Funktionen $\|\bullet\|^2_{L^2(\Omega)}$ und $-\int_\Omega f \bullet \,\mathrm{d}x$ sind auf $L^2(\Omega)$ stetig und konvex, was impliziert, dass sie schwach unterhalbstetig auf $L^2(\Omega)$ sind. Da wir bereits wissen, dass $u_n \overset{n\to\infty}{\rightharpoonup} u$ in $L^2(\Omega)$, folgt daraus

$$\frac{\alpha}{2}\|u\|_{L^2(\Omega)} - \int_\Omega f u \,\mathrm{d}x \leqslant \liminf_{n\to\infty} \left(\frac{\alpha}{2}\|u_n\|_{L^2(\Omega)} - \int_\Omega f u_n \,\mathrm{d}x \right).$$

Damit und mit Gleichung (3.4) gilt insgesamt

$$\inf_{v\in \mathrm{BV}(\Omega)\cap L^2(\Omega)} E(v) \leqslant E(u) \leqslant \liminf_{n\to\infty} E(u_n) = \lim_{n\to\infty} E(u_n) = \inf_{v\in \mathrm{BV}(\Omega)\cap L^2(\Omega)} E(v),$$

d.h. $\min_{v\in \mathrm{BV}(\Omega)\cap L^2(\Omega)} E(v) = E(u)$. □

Theorem 3.8 (Stabilität und Eindeutigkeit)**.** *Seien $u_1, u_2 \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$ die Minimierer des Problems 3.1 mit $f_1, f_2 \in L^2(\Omega)$ anstelle von f.*
Dann gilt

$$\|u_1 - u_2\|_{L^2(\Omega)} \leqslant \frac{1}{\alpha}\|f_1 - f_2\|_{L^2(\Omega)}.$$

Beweis. Definiere die konvexen Funktionale $F : \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega) \to \mathbb{R}$ und $G_\ell : \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega) \to \mathbb{R}$, $\ell = 1, 2$, durch

$$F(u) := |u|_{\mathrm{BV}(\Omega)} + \|u\|_{L^1(\partial\Omega)}, \qquad G_\ell(u) := \frac{\alpha}{2}\|u\|^2_{L^2(\Omega)} - \int_\Omega f_\ell u \,\mathrm{d}x.$$

Bezeichne $E_\ell := F + G_\ell$.
G_ℓ ist Fréchet-differenzierbar

TODO nachrechnen, Gateaux ist klar, aber auch Frechet? EDIT: nachgerechnet, es funktioniert nach WIKI Def.
Außerdem: Im Grundlagen Kapitel noch einführen, was hier in dieser Arbeit mit Gateaux, Frechet etc gemeint ist? (ist ja von Autor zu Autor anders (cf Wiki)) und insbesondere irgendwo einmal alle Notationen einführen, was ist welche Ableitung

und die Fréchet-Ableitung $\delta G_\ell(u) : L^2(\Omega) \to \mathbb{R}$ an der Stelle $u \in \mathrm{BV}(\Omega) \cap L^2(\Omega)$ ist für alle $v \in L^2(\Omega)$ gegeben durch

$$\delta G_\ell(u)[v] = \alpha(u, v)_{L^2(\Omega)} - \int_\Omega f_\ell v \,\mathrm{d}x = (\alpha u - f_\ell, v)_{L^2(\Omega)}.$$

Das Funktional F ist konvex und stetig, also insbesondere unterhalbstetig, deshalb ist nach Theorem 2.6 das Subdifferential ∂F von F monoton, das heißt für alle $\mu_\ell \in \partial F(u_\ell)$, $\ell = 1, 2$, gilt

$$(\mu_1 - \mu_2, u_1 - u_2)_{L^2(\Omega)} \geqslant 0. \tag{3.5}$$

TODO eigentlich auch mal über Dualraumtheorie reden, insbesondere für Lp Räume und wie die Sachen identifiziert werden können nach Riesz?

Für $\ell = 1, 2$ wird E_ℓ von u_ℓ minimiert und G_ℓ ist stetig. Nach Theorem 2.3 und Theorem 2.5 gilt deshalb $0 \in \partial E_\ell(u_\ell) = \partial F(u_\ell) + \partial G_\ell(u_\ell) = \partial F(u_\ell) + \{\delta G_\ell(u_\ell)\}$ und es folgt $-\delta G_\ell(u_\ell) \in \partial F(u_\ell)$. Daraus folgt zusammen mit (3.5)

$$\big(-(\alpha u_1 - f_1) + (\alpha u_2 - f_2), u_1 - u_2 \big)_{L^2(\Omega)} \geqslant 0.$$

Umformen und Anwenden der Cauchy-Schwarzschen Ungleichung impliziert

$$\begin{aligned} \alpha \|u_1 - u_2\|^2_{L^2(\Omega)} &\leqslant \big(f_1 - f_2, u_1 - u_2 \big)_{L^2(\Omega)} \\ &\leqslant \|f_1 - f_2\|_{L^2(\Omega)} \|u_1 - u_2\|_{L^2(\Omega)}. \end{aligned}$$

Falls $\|u_1 - u_2\|_{L^2(\Omega)} = 0$, gilt der Satz. Ansonsten führt Division durch $\alpha \|u_1 - u_2\|_{L^2(\Omega)} \neq 0$ den Beweis zum Abschluss. $\square$

4. Das diskrete Problem

Betrachte für gegebenes $\alpha > 0$ und rechte Seite $f \in L^2(\Omega)$ folgende Diskretisierung von Problem 3.1.

Quote all CR and discretisation stuff right here somewhere (mglw in einer subsection)

Sowas wie V_{NC} nutzen als (geringfügige) Abkürzung oder einfach immer die Räume ausschreiben?

zitier BV stuff der relevant ist hierfür, überlege, wieso die Diskretisierung genau so aussieht (Normen fallen zusammen, gewisse Terme werden weggelassen, etc., siehe auch Draft on BV project für einige wichtige, noch zu beweisende, Statements)

Problem 4.1.
Finde $u_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}}(\mathcal{T}) := \mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$, sodass u_{CR} das Funktional

$$E_{\mathrm{NC}}(v_{\mathrm{CR}}) := \frac{\alpha}{2}\|v_{\mathrm{CR}}\|^2_{L^2(\Omega)} + \|\nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}\|_{L^1(\Omega)} - \int_\Omega f v_{\mathrm{CR}}\,\mathrm{d}x \tag{4.1}$$

unter allen $v_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}}(\mathcal{T})$ minimiert.

stimmt das?

Definiere für $v_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}}(\mathcal{T})$, $\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n) \subset L^\infty(\Omega;\mathbb{R}^n)$,

$$K_1(0) := \{\Lambda \in L^\infty(\Omega;\mathbb{R}^n) \mid |\Lambda(\bullet)| \leqslant 1 \text{ fast überall in } \Omega\},$$
$$I_{K_1(0)}(\Lambda) := \begin{cases} \infty, & \text{falls } \Lambda \notin K_1(0),\\ 0, & \text{falls } \Lambda \in K_1(0) \end{cases}$$

und das Funktional $\mathcal{L}_h : \mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T}) \times \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n) \to [-\infty, \infty)$ durch

$$\mathcal{L}_h(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda) := \int_\Omega \Lambda \cdot \nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}\,\mathrm{d}x + \frac{\alpha}{2}\|v_{\mathrm{CR}}\|^2_{L^2(\Omega)} - \int_\Omega f v_{\mathrm{CR}}\,\mathrm{d}x - I_{K_1(0)}(\Lambda). \tag{4.2}$$

stimmt das so

Falls $\Lambda \notin K_1(0)$, gilt $\mathcal{L}(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda) = -\infty$. Da außerdem für beliebige $\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n) \cap K_1(0)$ (d.h. $|\Lambda| \leqslant 1$ fast überall in Ω und außerdem $I_{K_1(0)}(\Lambda) = 0$) mit der CSU gilt, dass

$$\begin{aligned}\int_\Omega \Lambda \cdot \nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}\,\mathrm{d}x &\leqslant \int_\Omega |\Lambda \cdot \nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}|\,\mathrm{d}x \leqslant \int_\Omega |\Lambda||\nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}|\,\mathrm{d}x\\ &\leqslant \int_\Omega 1|\nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}|\,\mathrm{d}x = \|\nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}\|_{L^1(\Omega)},\end{aligned}$$

folgt zunächst

$$\sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \mathcal{L}(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda) = \sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n) \cap K_1(0)} \mathcal{L}(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda) \leqslant E_{\mathrm{NC}}(v_{\mathrm{CR}}).$$

Weiterhin gilt für $\Lambda \in \mathrm{sign}(\nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}) \subset \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n) \cap K_1(0)$, dass $E_{\mathrm{NC}}(v_{\mathrm{CR}}) = \mathcal{L}(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda)$ und deshalb $E_{\mathrm{NC}}(v_{\mathrm{CR}}) \leqslant \sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \mathcal{L}(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda)$

Somit ist das folgende Sattelpunktsproblem äquivalent zu Problem 4.1.

Problem 4.2. Löse

$$\inf_{v_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}}(\mathcal{T})} \sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \mathcal{L}_h(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda).$$

Theorem 4.3 (Charakterisierung diskreter Lösungen)**.** *Es existiert eine eindeutiges Lösung $u_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}}(\mathcal{T})$ von Problem 4.1. Außerdem gelten folgende äquivalente Charakterisierungen von u_{CR}.*

(i) Es existiert ein $\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)$ mit $|\Lambda(\bullet)| \leqslant 1$ fast überall in Ω, sodass

$$\begin{aligned} \Lambda(\bullet) \cdot \nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}(\bullet) &= |\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}(\bullet)| \quad && \textit{fast überall in } \Omega \textit{ und} \\ (\Lambda, \nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}})_{L^2(\Omega)} &= (f - \alpha u_{\mathrm{CR}}, v_{\mathrm{CR}})_{L^2(\Omega)} \quad && \textit{für alle } v_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}}(\mathcal{T}). \end{aligned}$$

(ii) Für alle $v_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}}(\mathcal{T})$ gilt die Variationsungleichung

$$(f - \alpha u_{\mathrm{CR}}, v_{\mathrm{CR}} - u_{\mathrm{CR}})_{L^2(\Omega)} \leqslant \|\nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}}\|_{L^1(\Omega)} - \|\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}\|_{L^1(\Omega)}.$$

Beweis. Mit analogen Abschätzungen wie in Ungleichung (3.3) erhalten wir für das Funktional E_{NC} aus Problem 4.1 für alle $v_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T}) \subset L^2(\Omega)$ die Abschätzung

$$E_{\mathrm{NC}}(v_{\mathrm{CR}}) \geqslant -\frac{1}{\alpha}\|f\|_{L^2(\Omega)}^2.$$

Somit ist E_{NC} nach unten beschränkt und es existiert eine infimierende Folge $(v_k)_{k\in\mathbb{N}} \subset \mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$ von E_{NC}. Aufgrund der Form von E_{NC} ist diese Folge beschränkt bezüglich der Norm $\|\bullet\|_{L^2(\Omega)}$ und wegen der Reflexivität des abgeschlossenen Unterraums $\mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$ des reflexiven Raums $L^2(\Omega)$ besitzt diese Folge eine schwach konvergente Teilfolge in $\mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$ bezüglich der Norm $L^2(\Omega)$, welche auch stark konvergent ist, da $\mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$ endlichdimensional ist. Der Grenzwert dieser Folge liegt aufgrund der Abgeschlossenheit von $\mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$ in $\mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$ und minimiert E_{NC}, da E_{NC} stetig ist bezüglich der Konvergenz in $L^2(\Omega)$.

Absatz above: Sachen noch näher begründen? All die benutzten grundlegenden Aussagen noch zusammen suchen und zitieren irgendwo?

Die Lösung $u_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$ ist eindeutig, da das Funktional E_{NC} aus Problem 4.1 strikt konvex ist der erste Term ist quadratisch, also strikt konvex, der zweite ist konvex und der dritte linear, also ist deren Summe strikt konvex.

grundlegende Aussagen der Optimierung wie diese noch zitieren? Beweis ist einfach bei dieser, schneller Widerspruchsbeweis

Nachdem wir die Existenz eines eindeutigen Minimierers $u_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$ von Problem 4.1 bewiesen haben, zeigen wir nun die äquivalenten Charakterisierung von u_{CR}. Zunächst sei erwähnt, dass aus der Existenz des Minimierers von Problem 4.1 und der Äquivalenz von Problem 4.1 und Problem 4.2, wobei wir insbesondere beretis gezeigt haben, dass $E_{\mathrm{NC}}(v_{\mathrm{CR}}) = \sup_{\Lambda\in\mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \mathcal{L}_h(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda)$ für alle $v_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})$, folgt, dass $\bar{\Lambda} \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)$ existiert mit

$$\mathcal{L}_h\left(u_{\mathrm{CR}}, \bar{\Lambda}\right) = \inf_{v_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}_0^1(\mathcal{T})} \sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \mathcal{L}_h(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda).$$

Da nach [Roc70, S. 379, Lemma 36.1] gilt, dass

$$\inf_{v_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}^1_0(\mathcal{T})} \sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \mathcal{L}_h(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda) \geqslant \sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \inf_{v_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}^1_0(\mathcal{T})} \mathcal{L}_h(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda),$$

folgt insgesamt

$$\inf_{v_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}^1_0(\mathcal{T})} \sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \mathcal{L}_h(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda) = \mathcal{L}_h\left(u_{\mathrm{CR}}, \bar{\Lambda}\right) = \sup_{\Lambda \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)} \inf_{v_{\mathrm{CR}} \in \mathrm{CR}^1_0(\mathcal{T})} \mathcal{L}_h(v_{\mathrm{CR}}, \Lambda).$$

Somit ist $\left(u_{\mathrm{CR}}, \bar{\Lambda}\right) \in \mathrm{CR}^1_0(\mathcal{T}) \times \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)$ nach [Roc70, S. 380, Lemma 36.2] Sattelpunkt von $\mathcal{L}_h$ bezüglich der Maximierung über $\mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)$ und der Minimierung über $\mathrm{CR}^1_0(\mathcal{T})$. Das bedeutet insbesondere, dass u_{CR} Minimierer von $\mathcal{L}_h(\bullet, \bar{\Lambda})$ in $\mathrm{CR}^1_0(\mathcal{T})$ ist und $\bar{\Lambda}$ Maximierer von $\mathcal{L}_h(u_{\mathrm{CR}}, \bullet)$ über $\mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)$.

(i). In der ersten Komponente ist das Lagrange-Funktional Fréchet-differenzierbar mit

$$\delta_{u_{\mathrm{CR}}} \mathcal{L}_h(u_{\mathrm{CR}}, \Lambda)[v_{\mathrm{CR}}] = \int_\Omega \Lambda \cdot \nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}} \, \mathrm{d}x + \alpha(u_{\mathrm{CR}}, v_{\mathrm{CR}})_{L^2(\Omega)} - \int_\Omega f v_{\mathrm{CR}} \, \mathrm{d}x.$$

Die Karush-Kuhn-Tucker-Bedingungen für eine Lösung $(u_{\mathrm{CR}}, \Lambda) \in V_{\mathrm{NC}} \times (\mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n) \cap K_1(0))$ des Sattelpunktsproblems 4.2 lauten damit

$$\begin{aligned} 0 &= \delta_{u_{\mathrm{CR}}} \mathcal{L}_h(u_{\mathrm{CR}}, \Lambda)[v_{\mathrm{CR}}] \\ &= \int_\Omega \Lambda \cdot \nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}} \, \mathrm{d}x + \alpha(u_{\mathrm{CR}}, v_{\mathrm{CR}})_{L^2(\Omega)} - \int_\Omega f v_{\mathrm{CR}} \, \mathrm{d}x \quad \text{für alle } v_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}} \quad \text{und} \\ 0 &\in \partial_\Lambda \mathcal{L}_h(u_{\mathrm{CR}}, \Lambda) = \{(\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}, \bullet)_{L^2(\Omega)}\} - \partial I_{K_1(0)}(\Lambda). \end{aligned}$$

Die erste Bedingung ist für alle $v_{\mathrm{CR}} \in V_{\mathrm{NC}}(\mathcal{T})$ äquivalent zu

$$(\Lambda, \nabla_{\mathrm{NC}} v_{\mathrm{CR}})_{L^2(\Omega)} = (f - \alpha u_{\mathrm{CR}}, v_{\mathrm{CR}})_{L^2(\Omega)}.$$

Die zweite Bedingung bedeutet, dass $(\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}, \bullet)_{L^2(\Omega)} \in -\partial I_{K_1(0)}(\Lambda)$, d.h. für alle $q_0 \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n)$ gilt

$$(\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}, q_0 - \Lambda)_{L^2(\Omega)} \leqslant I_{K_1(0)}(q_0) - I_{K_1(0)}(\Lambda) = I_{K_1(0)}(q_0).$$

Für $q_0 \in \mathbb{P}_0(\mathcal{T};\mathbb{R}^n) \cap K_1(0)$ folgt insbesondere

$$\begin{aligned} (\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}, q_0 - \Lambda)_{L^2(\Omega)} &\leqslant 0, \quad \text{also} \\ (\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}, q_0)_{L^2(\Omega)} &\leqslant (\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}, \Lambda)_{L^2(\Omega)}. \end{aligned}$$

Mit der Wahl $q_0 := \operatorname{sign} \nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}$, der Cauchy-Schwarzschen Ungleichung und $\Lambda \in K_1(0)$ impliziert das

$$\begin{aligned} \int_\Omega |\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}| \, \mathrm{d}x &\leqslant (\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}, \Lambda)_{L^2(\Omega)} \\ &\leqslant \int_\Omega |\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}| \, |\Lambda| \, \mathrm{d}x \leqslant \int_\Omega |\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}| \, \mathrm{d}x \quad \text{bzw.} \\ \sum_{T \in \mathcal{T}} |T| \, \left|(\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}})_{|T}\right| &= \sum_{T \in \mathcal{T}} |T| \, (\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}} \cdot \Lambda)_{|T} \end{aligned}$$

Außerdem gilt mit der Cauchy-Schwarzschen Ungleichung auf allen $T \in \mathcal{T}$, dass $(\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}} \cdot \Lambda)_{|T} \leqslant (\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}})_{|T}$. Dementsprechend muss sogar für alle $T \in \mathcal{T}$ gelten, dass $(\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}} \cdot \Lambda)_{|T} = (\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}})_{|T}$, d.h. fast überall in Ω gilt $\Lambda(\bullet) \cdot \nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}(\bullet) = |\nabla_{\mathrm{NC}} u_{\mathrm{CR}}(\bullet)|$. □

5. Numerische Realisierung

6. Experimente

6.1. Konstruktion eines Experiments mit exakter Lösung

Um eine rechte Seite zu finden, zu der die exakte Lösung bekannt ist, wähle eine Funktion des Radius $u \in H_0^1([0,1])$ mit Träger im zweidimensionalen Einheitskreis. Insbesondere muss damit gelten $u(1) = 0$ und u stetig. Die rechte Seite als Funktion des Radius $f \in L^2([0,1])$ ist dann gegeben durch

$$f := \alpha u - \partial_r(\operatorname{sign}(\partial_r u)) - \frac{\operatorname{sign}(\partial_r u)}{r},$$

wobei für $F \in \mathbb{R}^2 \backslash \{0\}$ gilt $\operatorname{sign}(F) := \left\{\frac{F}{|F|}\right\}$ und $\operatorname{sign}(0) \in B_1(0)$. Damit außerdem gilt $f \in H_0^1([0,1])$, was z.B. für GLEB relevant ist, muss also noch Stetigkeit von $\operatorname{sign}(\partial_r u)$ und $\partial_r(\operatorname{sign}(\partial_r u))$ verlangt werden und $\partial_r(\operatorname{sign}(\partial_r u(1)) = \operatorname{sign}(\partial_r u(1)) = 0$. Damit f in 0 definierbar ist, muss auch gelten $\operatorname{sign}(\partial_r u) \in o(r)$ für $r \to 0$.

Damit erhält man für die Funktion

$$u_1(r) := \begin{cases} 1, & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1}{6}, \\ 1 + (6r-1)^\beta, & \text{wenn } \frac{1}{6} \leqslant r \leqslant \frac{1}{3}, \\ 2, & \text{wenn } \frac{1}{3} \leqslant r \leqslant \frac{1}{2}, \\ 2(\frac{5}{2} - 3r)^\beta, & \text{wenn } \frac{1}{2} \leqslant r \leqslant \frac{5}{6}, \\ 0, & \text{wenn } \frac{5}{6} \leqslant r, \end{cases}$$

wobei $\beta \geqslant 1/2$, mit der Wahl

$$\operatorname{sign}(\partial_r u_1(r)) = \begin{cases} 12r - 36r^2, & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1}{6}, \\ 1, & \text{wenn } \frac{1}{6} \leqslant r \leqslant \frac{1}{3}, \\ \cos(\pi(6r-2)), & \text{wenn } \frac{1}{3} \leqslant r \leqslant \frac{1}{2}, \\ -1, & \text{wenn } \frac{1}{2} \leqslant r \leqslant \frac{5}{6}, \\ -\frac{1+\cos(\pi(6r-5))}{2}, & \text{wenn } \frac{5}{6} \leqslant r \leqslant 1, \end{cases}$$

die rechte Seite

$$f_1(r) := \begin{cases} \alpha - 12(2-9r), & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1}{6}, \\ \alpha(1 + (6r-1)^\beta) - \frac{1}{r}, & \text{wenn } \frac{1}{6} \leqslant r \leqslant \frac{1}{3}, \\ 2\alpha + 6\pi\sin(\pi(6r-2)) - \frac{1}{r}\cos(\pi(6r-2)), & \text{wenn } \frac{1}{3} \leqslant r \leqslant \frac{1}{2}, \\ 2\alpha(\frac{5}{2} - 3r)^\beta + \frac{1}{r}, & \text{wenn } \frac{1}{2} \leqslant r \leqslant \frac{5}{6}, \\ -3\pi\sin(\pi(6r-5)) + \frac{1+\cos(\pi(6r-5))}{2r}, & \text{wenn } \frac{5}{6} \leqslant r \leqslant 1. \end{cases}$$

Für die Funktion

$$u_2(r) := \begin{cases} 1, & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1-\beta}{2}, \\ -\frac{1}{\beta} r + \frac{1+\beta}{2\beta}, & \text{wenn } \frac{1-\beta}{2} \leqslant r \leqslant \frac{1+\beta}{2}, \\ 0, & \text{wenn } \frac{1+\beta}{2} \leqslant r, \end{cases}$$

erhält man mit der Wahl

$$\begin{aligned} &\operatorname{sign}(\partial_r u_2(r)) \\ &\quad := \begin{cases} \frac{4}{1-\beta} r \left(\frac{1}{1-\beta} r - 1 \right), & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1-\beta}{2}, \\ -1, & \text{wenn } \frac{1-\beta}{2} \leqslant r \leqslant \frac{1+\beta}{2}, \\ \frac{4}{(\beta-1)^3} \left(4r^3 - 3(\beta+3) r^2 + 6(\beta+1) r - 3\beta - 1 \right), & \text{wenn } \frac{1+\beta}{2} \leqslant r \leqslant 1, \end{cases} \end{aligned}$$

die rechte Seite

$$f_2(r) := \begin{cases} \alpha - \frac{4}{1-\beta} \left(\frac{3}{1-\beta} r - 2 \right), & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1-\beta}{2}, \\ -\frac{\alpha}{\beta} \left(r - \frac{1+\beta}{2} \right) + \frac{1}{r}, & \text{wenn } \frac{1-\beta}{2} \leqslant r \leqslant \frac{1+\beta}{2}, \\ \frac{-4}{(\beta-1)^3} \left(16 r^2 - 9(\beta+3) r + 12(\beta+1) - \frac{3\beta+1}{r} \right), & \text{wenn } \frac{1+\beta}{2} \leqslant r \leqslant 1. \end{cases}$$

Damit können Experimente durchgeführt werden bei denen `exactSolutionKnown = true` gesetzt werden kann und entsprechend auch der L^2-Fehler berechnet wird.

Soll nun auch die Differenz der exakten Energie mit der garantierten unteren Energie Schranke (GLEB) berechnet werden, dann werden die stückweisen Gradienten der exakten Lösung und der rechten Seite benötigt.

Dabei gelten folgende Ableitungsregeln für die Ableitungen einer Funktion g, wenn man ihr Argument $x = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$ in Polarkoordinaten mit Länge $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ und Winkel $\varphi = \operatorname{atan2}(x_2, x_1)$, wobei

$$\operatorname{atan2}(x_2, x_1) := \begin{cases} \arctan\left(\frac{x_2}{x_1}\right), & \text{wenn } x_1 > 0, \\ \arctan\left(\frac{x_2}{x_1}\right) + \pi, & \text{wenn } x_1 < 0, x_2 \geqslant 0, \\ \arctan\left(\frac{x_2}{x_1}\right) - \pi, & \text{wenn } x_1 < 0, x_2 < 0, \\ \frac{\pi}{2}, & \text{wenn } x_1 = 0, x_2 > 0, \\ -\frac{\pi}{2}, & \text{wenn } x_1 = 0, x_2 < 0, \\ \text{undefiniert}, & \text{wenn } x_1 = x_2 = 0, \end{cases}$$

auffasst,

$$\begin{aligned} \partial_{x_1} &= \cos(\varphi) \partial_r - \frac{1}{r} \sin(\varphi) \partial_\varphi, \\ \partial_{x_2} &= \sin(\varphi) \partial_r - \frac{1}{r} \cos(\varphi) \partial_\varphi. \end{aligned}$$

Ist g vom Winkel φ unabhängig, so ergibt sich

$$\nabla_{(x_1, x_2)} g = (\cos(\varphi), \sin(\varphi)) \partial_r g.$$

Unter Beachtung der trigonometrischen Zusammenhänge

$$\begin{aligned}\sin(\arctan(y)) &= \frac{y}{\sqrt{1+y^2}},\\ \cos(\arctan(y)) &= \frac{1}{\sqrt{1+y^2}}\end{aligned}$$

ergibt sich

$$(\cos(\varphi), \sin(\varphi)) = (x_1, x_2)\frac{1}{r}$$

und damit

$$\nabla_{(x_1,x_2)} g = (x_1, x_2)\frac{\partial_r g}{r},$$

es muss also nur $\partial_r g$ bestimmt werden.

Die entsprechenden Ableitung lauten

$$\partial_r f_1(r) = \begin{cases} 108, & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1}{6},\\ 6\alpha\beta(6r-1)^{\beta-1} + \frac{1}{r^2}, & \text{wenn } \frac{1}{6} \leqslant r \leqslant \frac{1}{3},\\ (36\pi^2 + \frac{1}{r^2})\cos(\pi(6r-2)) + \frac{6\pi}{r}\sin(\pi(6r-2)), & \text{wenn } \frac{1}{3} \leqslant r \leqslant \frac{1}{2},\\ -\left(6\alpha\beta\left(\frac{5}{2}-3r\right)^{\beta-1} + \frac{1}{r^2}\right), & \text{wenn } \frac{1}{2} \leqslant r \leqslant \frac{5}{6},\\ -\left(\left(18\pi^2 + \frac{1}{2r^2}\right)\cos(\pi(6r-5)) + \frac{1}{2r^2} + \frac{3\pi}{r}\sin(\pi(6r-5))\right), & \text{wenn } \frac{5}{6} \leqslant r \leqslant 1,\end{cases}$$

$$\partial_r u_1(r) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1}{6},\\ 6\beta(6r-1)^{\beta-1}, & \text{wenn } \frac{1}{6} \leqslant r \leqslant \frac{1}{3},\\ 0, & \text{wenn } \frac{1}{3} \leqslant r \leqslant \frac{1}{2},\\ -6\beta\left(\frac{5}{2}-3r\right)^{\beta-1}, & \text{wenn } \frac{1}{2} \leqslant r \leqslant \frac{5}{6},\\ 0, & \text{wenn } \frac{5}{6} \leqslant r,\end{cases}$$

$$\partial_r f_2(r) = \begin{cases} -\frac{12}{(1-\beta)^2}, & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1-\beta}{2},\\ -\frac{\alpha}{\beta} - \frac{1}{r^2}, & \text{wenn } \frac{1-\beta}{2} \leqslant r \leqslant \frac{1+\beta}{2},\\ -\frac{4}{(1-\beta)^3}\left(32r - 9(\beta+3) + \frac{3\beta+1}{r^2}\right), & \text{wenn } \frac{1+\beta}{2} \leqslant r \leqslant 1,\end{cases}$$

$$\partial_r u_2(r) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } 0 \leqslant r \leqslant \frac{1-\beta}{2},\\ -\frac{1}{\beta}, & \text{wenn } \frac{1-\beta}{2} \leqslant r \leqslant \frac{1+\beta}{2},\\ 0, & \text{wenn } \frac{1+\beta}{2} \leqslant r.\end{cases}$$

Mit diesen Informationen kann mit `computeExactEnergyBV.m` die exakte Energie berechnet werden und somit durch eintragen der exakten Energie in die Variable `exactEnergy` im Benchmark und setzen der Flag `useExactEnergy=true` das Experiment durch anschließendes Ausführen von `startAlgorithmCR.m` gestartet werden.

A. Appendix

Die erste Quelle (und wichtigste) ist [Bar15] und dann gibt es bisher noch [Roc70, S. 200]. Um zu testen zitiert man am besten [MM99].

NOTE Bsp wie zitieren funktioniert und um Bib zu testen

Literatur

[ABM14] Hedy Attouch, Giuseppe Buttazzo und Gérard Michaille. *Variational Analysis in Sobolev and BV Spaces. Applications to PDEs and Optimization*. Second Edition. Bd. 17. MOS-SIAM Series on Optimization. Philadelphia: Society for Industrial und Applied Mathematics, Mathematical Optimization Society, 2014. ISBN: 978-1-611973-47-1.

[Aub79] Jean-Pierre Aubin. *Mathematical Methods of Game and Economic Theory*. Bd. 7. Studies in Mathematics and its Applications. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Publishing Company, 1979. ISBN: 0-444-85184-4.

[Bar15] Sören Bartels. *Numerical Methods for Nonlinear Partial Differential Equa-* [redacted] *tions*. Bd. 47. Springer Series in Computational Mathematics. Springer International Publishing, 2015. ISBN: 978-3-319-13796-4. DOI: `10.1007/978-3-319-13797-1`.

[EG92] Lawrence C. Evans und Ronald F. Gariepy. *Measure Theory and Fine Properties of Functions*. CRC Press, 1992. ISBN: 0-8493-7157-0.

[MM99] Max Mustermann und Moritz Mustermann. *Test. subTest*. Third. Bd. 47. SeriesName. testland: Versuch, 1999. ISBN: 978-1-4612-9529-7. DOI: `10.1007/978-3-319-13797-1`.

[Roc70] R. Tyrrell Rockafellar. *Convex Analysis*. New Jersey: Princeton University Press, 1970. ISBN: 0-691-08069-0.

[Zei85] Eberhard Zeidler. *Nonlinear Functional Analysis and its Applications. III: Variational Methods and Optimization*. New York: Springer Science+Business [redacted] Media, LLC, 1985. ISBN: 978-1-4612-9529-7.

[Zei86] Eberhard Zeidler. *Nonlinear Functional Analysis and its Applications. I: Fixed-Point Theorems*. New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo: Springer-Verlag, 1986. ISBN: 0-387-90914-1.

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und noch nicht für andere Prüfungen eingereicht habe. Sämtliche Quellen, einschließlich Internetquellen, die unverändert oder abgewandelt wiedergegeben werden, insbesondere Quellen für Texte, Grafiken, Tabellen und Bilder, sind als solche kenntlich gemacht. Mir ist bekannt, dass bei Verstößen gegen diese Grundsätze ein Verfahren wegen Täuschungsversuchs bzw. Täuschung eingeleitet wird.

Berlin, den 17. Dezember 2020,